

15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017

Interdisziplinäre Produktentwicklung

Hrsg.: Klaus Brökel, Karl-Heinrich Grote, Ralph Stelzer, Frank Rieg, Jörg Feldhusen, Norbert Müller, Peter Köhler

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt.

Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: <http://dx.doi.org/10.17185/duepublico/44616>

URN: <urn:nbn:de:hbz:464-20171010-131707-6>

Link: <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de:443/servlets/DocumentServlet?id=44616>



15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik

Interdisziplinäre Produktentwicklung

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

KT2017

15. Gemeinsames Kolloquium

Konstruktionstechnik

5. und 6. Oktober in Duisburg

Interdisziplinäre Produktentwicklung

- **Modellbasierte Ansätze in der Produktentwicklung**
- **Konstruktionsbegleitende Berechnung und Simulation**
- **Virtualität in der Produktentwicklung**
- **Absicherung der Produktmodelldatenqualität**
- **Wissensmanagement in Engineering-Prozessen**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Herausgeber:



Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Klaus Brökel
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr



Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote



Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer



Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg



Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen



Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller
Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler

ISBN 978-3-940402-15-8

Universität Duisburg-Essen 2017
Universitätsbibliothek
Universitätsstraße 9-11
45141 Essen

Vorwort

Begriffe wie *Industrie 4.0*, *Digitalisierung*, *Smart Engineering*, *Digitaler Zwilling* stehen für aktuelle Trends, in die sich zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten einordnen lassen. Sie bedeuten allerdings nicht, dass die Themenfelder, die mit Begriffen wie *Knowledge Based Engineering*, *Product Lifecycle Management*, *Virtuelles Prototyping* usw. verbunden sind, schon ausreichend bearbeitet wurden. Aber „Schlagwörter“ sollen ja stets auch helfen, notwendigen Entwicklungen den richtigen Schwung zu verleihen. Das setzt natürlich einen gewissen Entwicklungsstand in verschiedenen Bereichen voraus. Das wird auch in zahlreichen Beiträgen dieses Tagungsbandes deutlich. Es ist seit vielen Jahren gute Tradition, dass vor allem junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Konstruktionslehrstühlen verschiedener Hochschulen und Universitäten das Kolloquium nutzen, um ihre Forschungs- und Entwicklungsarbeit zur Diskussion zu stellen.

Das erste *Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik* fand 2003 in Rostock statt. Es wurde von den Konstruktionslehrstühlen der Universitäten Rostock, Dresden und Magdeburg initiiert. Seit 2007 gehören auch die Konstruktionslehrstühle der Universitäten Aachen und Bayreuth zu den Mitveranstaltern und seit drei Jahren auch die der Universitäten Duisburg-Essen und Clausthal. Sehr erfreulich ist, dass in diesem Jahr dieses Angebot zum Gedankenaustausch über aktuelle Problemstellungen auch wieder von anderen Universitäten und Hochschulen sowie von Vertretern aus der industriellen Praxis genutzt wird. Dabei stehen insbesondere Themen im Vordergrund, die sich mit dem qualifizierten Einsatz moderner Informationstechniken in interdisziplinären Produktentwicklungsprozessen beschäftigen. Ging es vor rund 40 Jahren bei der beginnenden Digitalisierung im Bereich der Konstruktionstechnik noch darum, digitale geometrische Repräsentationen der Konstruktionsobjekte zu erzeugen oder Berechnungssysteme aufzubauen, so wird heute mit dem Begriff der Digitalisierung in diesem Bereich der Wandel hin zu digitalen System- und Prozessmodellen verbunden, die miteinander kommunizieren können bzw. informationstechnisch verknüpft und abgesichert sind. Drauf aufbauend fokussieren einige Aktivitäten von „Industrie 4.0“ auf die Einbindung der realen Welt. Das stellt auch die Konstruktionswissenschaftler immer wieder vor neue Herausforderungen.

Die im Tagungsband enthaltenen Vorträge wurden fünf Themenfeldern zugeordnet

- Modellbasierte Ansätze in der Produktentwicklung
- Konstruktionsbegleitende Berechnung und Simulation
- Virtualität in der Produktentwicklung
- Absicherung der Produktmodelldatenqualität
- Wissensmanagement in Engineering-Prozessen.

Etwa die Hälfte der Vorträge wurden auch vom Programmausschuss wissenschaftlich begutachtet. Diese sind entsprechend gekennzeichnet.

Ich möchte allen Tagungsteilnehmern für das Interesse an der Veranstaltung und den Vortragenden für die aufgewendeten Mühen danken. Besonderer Dank gilt dem Programmkomitee und meinen Mitarbeitern, die mit viel Engagement zum Gelingen der Veranstaltung beigetragen haben. Vielen Dank auch an Herrn Dr. Hoffmann von der BMW AG, der uns in seinem einführenden Vortrag mit einem Augenzwinkern Automotive in doppelter Bedeutung erläutert hat. Dieser Vortrag ist aus redaktionellen Gründen allerdings nicht im gedruckten Tagungsband enthalten.

Duisburg, im Juli 2017

Peter Köhler

Inhalt

Der klassische Produktentwicklungsprozess im schwierigen Kontext zum Innovations- und Qualitätsmanagement	1
H. Schnegas Hochschule Wismar	
Systematik zur Differenzierung von Varianten im Kontext der Produktgenerationsentwicklung	9
N. Peglow, J. Powelske, C. Birk, A. Albers, N. Bursac Karlsruher Institut für Technologie - KIT	
Entwicklung und Verifizierung eines Berechnungsprogramms zur thermischen Bewertung von nuklearen Transport- und Lagerbehältern	19
C. Dinkel, F. Rieg Universität Bayreuth	
Analyse und Bewertung von Simulationswerkzeugen für generativ gefertigte Bauteile	29
P. Sembdner, M. Nögel, D. Hofmann, C. Schöne, R. Stelzer TU Dresden	
Berücksichtigung radial aufweitender Lasten am stirnseitig befestigten Freilauf	39
S. Hofmann Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal	
Untersuchung der Steifigkeitsanbindung für die systembasierte Komponentenoptimierung	49
D. Billenstein, F. Rieg Universität Bayreuth	
Auswirkung von Laufflächenbombierungen auf den Schmierfilmaufbau in Druckkammern	59
M. Heß TU Clausthal	
FEM-Analyse an Stäben mit Halbkreisnut und überlagerter Querbohrung zur Überprüfung des Thum'schen Verfahrens	69
A. Daryusi Hochschule Offenburg	
FEM-Modell der grundlegenden Vorgänge einer Anlage zum Zerlegen metallisch umhüllter Bauteile	77
M. Prumbohm, D. Chorzewski, A. Lohrengel TU Clausthal	

Methodische Analyse der Entwicklungsaktivitäten	89
P. Lünemann, W. Wang, R. Stark IPK/TU Berlin	
Methode zur Analyse schlafender Fehlern innerhalb einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse	99
D. Moselewski, G. Jacobs, M. Löwer, F. Sulejmani, C. Konrad, T. Katzwinkel RWTH Aachen	
Entwicklung einer Prüffeldoptimierungsmethodik zur Prozessoptimierung im Prüffeldbetrieb	109
M. Schmitt, K. Grote BMW/OvGU Magdeburg	
Wissensbasierte Absicherung virtueller Lebensdauerprognosen von Elastomerbauteilen	121
M. Mistler, R. Andrae, J. Wortberg, P. Köhler Universität Duisburg-Essen	
Ein Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung für die Nutzung von Potentialen additiver Fertigung in der Produktentwicklung	131
F. Schumacher, T. Richter, T. Vietor BMW/TU Braunschweig	
Sicherheitsgerichtete Produktentwicklung im Sonderfahrzeugbau	141
T. Bläßing Rheinmetall MAN	
Der Einsatz von Druckentlastung im Explosionsschutz – eine innovative Basis für den Leichtbau	151
S. Herbst, F. Engelmann, K. Grote EAH Jena/OvGU Magdeburg	
Vernetzen von freien Skizzen in SysML-Systemmodellen zur Unterstützung der Konstrukteurstätigkeit	161
A. Albers, G. Moeser, M. Salihoglu Karlsruher Institut für Technologie - KIT	
Beiträge und Herausforderungen modellbasierter Systementwicklung in frühen Phasen des PEP aus Sicht der Forschung	171
T. Katzwinkel, G. Jacobs, M. Löwer, C. Konrad, D. Moselewski, F. Sulejmani RWTH Aachen	
Wissen in Produktentwicklungsprozessen – ein Aktivitäten-basierter Analyseansatz	183
W. Wang, P. Lünemann, M. Preidel, R. Stark TU Berlin	

Optimierung generativer Fertigungsverfahren durch konstruktives Teilen und Fügen von Bauteilen	193
C. Haugwitz OvGU Magdeburg	
Konstruktionswerkzeug für die Kostenplanung und normgerechte Gestaltung von elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung	203
R. Hinzelmann, S. Perekopskiy, A. Zörnig, R. Kasper EMB/OvGU Magdeburg	
Varianzsteuerung integraler Produkte durch den prozessbegleitenden Einsatz von Data-Mining Werkzeugen	213
C. Konrad, G. Jacobs, M. Löwer, W. Schmidt RWTH Aachen	
Modellbasierte KBE-Methodenentwicklung im Bereich der konstruktionsbegleitenden Simulation	223
R. Andrae, P. Köhler Universität Duisburg-Essen	
CAD-integrierte Modellierung von Gitterstrukturen für Additive Fertigung	235
P. Koch, J. Lindemann, R. Kordaß, H. Korn, C. Schöne, R. Stelzer IWU/TU Dresden	
Augmented-Reality-basierte Anforderungs-visualisierung zur Unterstützung der Formfindung bei der Nutzung physischer Designmodelle	245
U. Feldinger, T. Vietor VW/TU Braunschweig	
Auslegung von Energiespeichern in Elektrofahrzeugen mittels Digital Mock-Up bei dezentralisierten Antriebssträngen	255
T. Stefaniak, D. Maiwald, G. Püschel, K. Grote OvGU Magdeburg	
Kreativitätsmethoden im digitalen Umfeld – Aktive Förderung von Innovationsimpulsen in standortverteilten Entwicklungsteams	267
A. Albers, B. Walter, M. Klippert, N. Reiß Karlsruher Institut für Technologie - KIT	
Mischreibungsmodell für die Simulation hydrodynamisch wirkender Radialgleitlager unter Einbeziehung statistischer Oberflächeneigenschaften	277
S. Zorn, K. Brökel Universität Rostock	
Effizientere Validierung und Funktionsabsicherung von Fahrerassistenzsystemen auf dem Rollenprüfstand	287
S. Lutz, A. Albers, R. Hettel, M. Behrendt, AVL/Karlsruher Institut für Technologie - KIT	

Auswirkungen hochvernetzter Systeme auf die Modellarchitektur der virtuellen Inbetriebnahme	297
B. Illmer, M. Vielhaber ZeMA/Universität des Saarlandes	
Zweischritt-Glättungsalgorithmus als Basis eines vollautomatisierten Produktentwicklungsprozesses	307
K. Deese, M. Geilen, F. Rieg Universität Bayreuth	
Ein alternativer Ansatz zur numerischen Simulation der Genese von Hirnödemen	317
H. Prüfer Ruhruniversität Bochum	
Der reibungsarme Radnabenmotor mit Radialrillenkugellagern	327
A. Zörnig, R. Hinzelmann, R. Kasper EMB/OvGU Magdeburg	
Simulationsfreie Auslegung von Freiläufen	337
V. Martinewski, A. Lohrengel, A. Rienäcker, G. Ochse, B. Qian TU Clausthal/Universität Kassel	
Analyse von Zielkonflikten bei der Optimierung von Produkten und Möglichkeiten zu deren Lösung	347
T. Guthmann, F. Engelmann, K. Grote EAH Jena/OvGU Magdeburg	
Ein Ansatz zur wissensbasierten Klassifizierung in Engineering-Prozessen im Anlagenbau	357
D. Adamenko, Y. Hooshmand, S. Kunnen, P. Köhler Universität Duisburg-Essen	
Bauteilübergreifende systematische Werkstoffauswahl leichtbaugetriebener Fahrzeugstrukturen – Ein ganzheitlicher Ansatz	369
J. Kaspar, R. Kaiser, M. Vielhaber Daimler AG/Universität des Saarlandes	
Wissensbasierte Daten- und Informationsbereitstellung für den Produktentwicklungsprozess am Beispiel von Schweißkonstruktionen	379
T. Manoharan, A. Loibl, P. Köhler Universität Duisburg-Essen	

Der klassische Produktentwicklungsprozess im schwierigen Kontext zum Innovations- und Qualitätsmanagement

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar, University of Applied Sciences: Technology, Business and Design
Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Bereich Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik
Philipp Müller Str. 14, 23952 Wismar
Email: henrik.schnegas@hs-wismar.de

Inhalt: Mit der VDI 2221 wurde primär für rational denkende Ingenieure eine Methodik für den Produktentwicklungsprozess (PEP) geschaffen, mit der neben Varianten- und Anpassungskonstruktionen auch Innovationen geschaffen werden sollen, was jedoch im Widerspruch zu aktuellen psychologischen Erkenntnissen über Kreativität und Innovation steht. Der vorliegende Beitrag stellt ein Arbeitsmodell vor, mit dem der PEP auf der Basis der seit 2015 eingeführten neuen Qualitätsnorm DIN EN ISO 9001 erstmalig auch risikobasiert betrachtet und mittels PDCA-Zyklus kontinuierlich verbessert werden kann. Qualitätswerkzeuge werden zur Selbstverständlichkeit im Konstruktionsprozess und durch Werkzeuge aus dem Innovationsmanagement wie Ideengenerierungs- und Bewertungstools ergänzt. Aufgezeigt wird, wie das rationale Denken und Handeln, die logischen geradlinigen Prozesse und die frühzeitige Evaluierung auf der Basis bekannter technischer, ökonomischer und juristischer Restriktionen, was dem Qualitäts- und Produktentwicklungsmanagement eigen ist, mit den aktuellen Erfordernissen des Innovationsmanagements wie intuitives Denken und Handeln, zufällige, chaotische laterale Prozesse und die Aufhebung von Denkbarrieren verknüpft werden können.

Abstract: Guideline VDI 2221 is a rule for rational thinking productdevelopment engineers. Guideline is also an instruction for creation of innovative products. But there is a contradiction in case of actually scientific psychological results in creativity and innovation. In this paper a new model is given. The model ist the combination of traditional product development by VDI 2221, the new Quality standard DIN EN ISO 9001 and the Innovationmanagement and the Methodology of Innovationprozess. Quality tools are normal parts of the designprocess. Tools oft the innovationsmanagement are also itegrated in to the traditional method.

Stichwörter: Produktentwicklungsprozess, VDI 2221, Innovationsmanagement, Kreativitäts- und Innovationsmethoden, Qualitätsmanagement, DIN EN ISO 9001:2015.

Keywords: Productdevelopmentprocess, VDI 2221, Innovationmanagement, Creativity- and Innovationmethods, Qualitymanagement, DIN EN ISO 9001:2015.

1 Qualitätssicherung im Produktentwicklungsprozess

Qualität wird nach der Norm DIN EN ISO 9000:2015-11 als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ definiert. Die Qualität gibt damit an, in

welchem Maße ein Produkt den bestehenden Anforderungen entspricht. Eine Anforderung wird nach DIN EN ISO 9000:2015 als „ein Erfordernis oder eine Erwartung, das oder die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist“ definiert. Anforderungen sind demzufolge Aussagen über die notwendige Beschaffenheit oder Fähigkeit eines Produktes oder eines Prozesses und werden im Regelfall im Pflichtenheft, Lastenheft bzw. der Anforderungsliste in der Planungsphase des Produktentwicklungs- bzw. –verbesserungsprozesses nach VDI 2221 festgelegt und während der Konzept-, Entwurfs- und Planungsphase umgesetzt.

Da ein untrennbarer Zusammenhang zwischen der Qualität eines Produktes und der Tätigkeit des Konstrukteurs im Produktentwicklungsprozess besteht, wurden bereits in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts geeignete Qualitätswerkzeuge entwickelt und für den Konstruktionsprozess zur Verfügung gestellt. Abbildung 1 zeigt hierzu einige Beispiele. Für die Planungsphase sind das das Kano-Modell, nach dem Basis-, Leistungs- und Begeisterungsmerkmale definiert und gemäß Six Sigma als Voice of Customer in der Anforderungsliste verankert werden. Möglich sind auch die Definition möglicher Risiken, wie sie aktuell in der DIN EN ISO 9001:2015 konsequent bereits bei der Produktentwicklung analysiert und z.B. in einem Papier „Critical for Quality“ identifiziert werden müssen. Um die Kundenwünsche, deren geplante funktionelle Umsetzung und ggf. den Markt zu Beginn der Produktentwicklung zu berücksichtigen steht das House of Quality oder auch Quality Function Deployment für die Anwendung zur Verfügung.

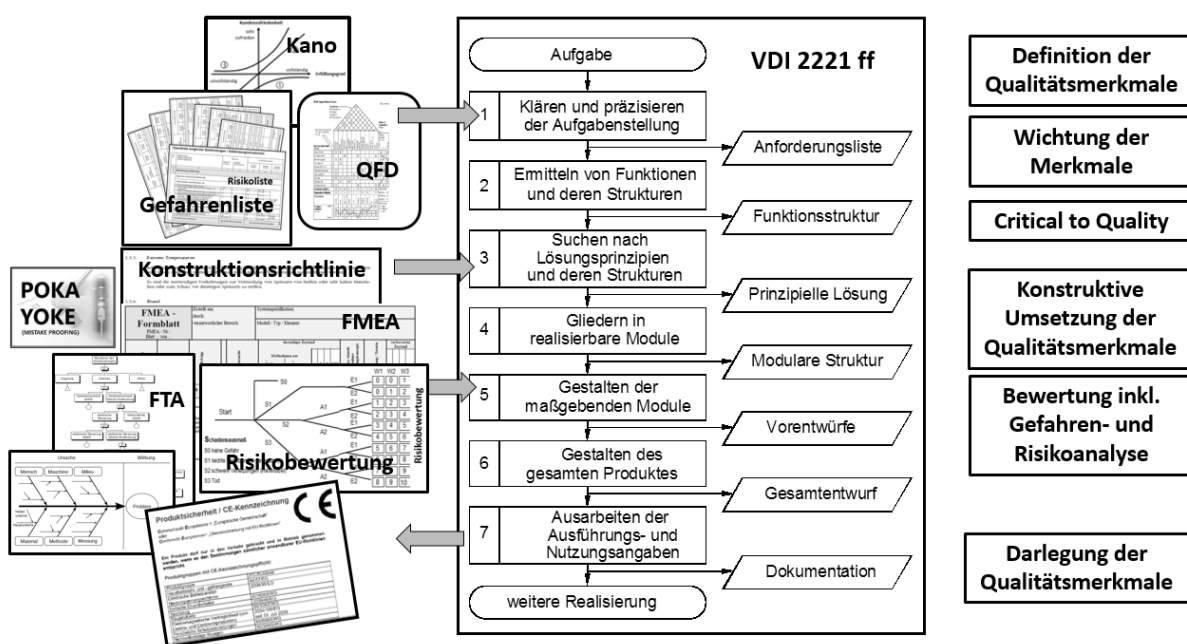


Bild 1: Qualitätsmanagementwerkzeuge im PEP nach VDI 2221

In der Konzeptphase und auch Entwurfsphase wird für ein erfolgreiches Produkt die Nutzung von Konstruktionskatalogen mit qualitativ hochwertigen Wiederholteilen und –lösungen empfohlen. Das Prinzip des Poka Yoke soll spätere Fehlanwendungen vermeiden helfen. Gefahren und Risiken, die gemäß aktueller Qualitätsrichtlinie 9001 bereits im Produktentwicklungsprozess erfragt werden sollen, können mit der FMEA, FTA oder dem Ishikawa-Diagramm erfasst werden. Genannte Methoden sind Werkzeuge, die bereits in den 40er Jahren zur Schaffung einer höheren Qualität und damit für eine Energie- und Ressourcenschonung erdacht worden sind. Abbildung 2 zeigt zwei Karikaturen, die den aktuellen Status von Qualitätsmanagementwerkzeugen bei der Produktentwicklung offenlegen. Eine aktuelle Umfrage im Jahr 2016 ergab, dass 74% der befragten Konstruktionsbüros keine und 21% zum Teil Qualitätswerkzeuge anwenden. In nur 5% der Konstruktionsabteilungen gehörten Qualitätswerkzeuge zum Konstruktionsalltag dazu.

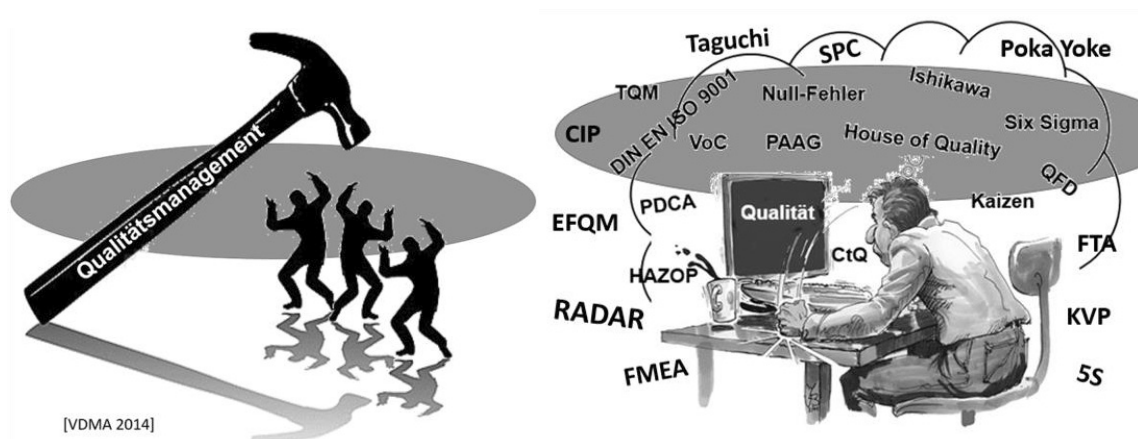


Bild 2: Qualitätsmanagementwerkzeuge und empfundene Bedrohung [3]

2 Innovation, Innovationsmanagement vs. Qualitätsmanagement

Innovation bedeutet das Hervorbringen von Produkten bzw. Dienstleistungen, die es bis zum Veröffentlichungszeitpunkt in gleicher oder ähnlicher Weise noch nicht gibt.

Innovation ist jedoch nicht gleich Innovation. Vorgeschlagen wird die Einteilung von Innovationen bzw. Innovationsstrategien in 3 Kategorien:

Kategorie 1: Ein Produkt existiert und soll innovativ verändert werden.

Kategorie 2: Es existiert ein Problem ohne Lösung → Problemorientierte Innovation.

Kategorie 3: Es existiert noch gar nichts → Freie Innovation.

Die Methodik nach VDI 2221 ist vor allem für die Kategorie 2 definiert. Der Konstrukteur sucht rational und systematisch nach der Lösung für ein konkretes Problem. Kategorie 1 bezieht sich auf Anpassungs- oder Variantenkonstruktionen. Im Kern bleibt ein bestehendes Produkt erhalten, kann aber innovative Teillösungen als Verbesserung bekommen.

Das Hervorbringen von „Freien Innovationen“ ist im Unterschied zu der in VDI 2221 geplanten systematischen Vorgehensweise jedoch kein rationaler, planbarer Prozess mit einem konkret vorgegebenen Problem. Wahre Innovation ist das Ergebnis von chaotischen, unberechenbaren, zufälligen und nicht selten unerwarteten Ereignissen und steht damit auch in einem absolut entgegen gerichteten Kontext zum Qualitätsmanagement, welches von planbaren, fest definierten und eindeutig festgelegten abrechenbaren Zielkriterien ausgeht. Betrachten wir den PEP nach VDI 2221, muss für die Produktentwicklung in Phase 1 eine Anforderungsliste definiert worden sein, die wiederum das Ergebnis der Analyse eines konkreten Problems ist. Innovation nach VDI 2221 basiert demzufolge schon auf dem Vorliegen einer konkreten Zielstellung mit quantitativen abrechenbaren Kenngrößen.

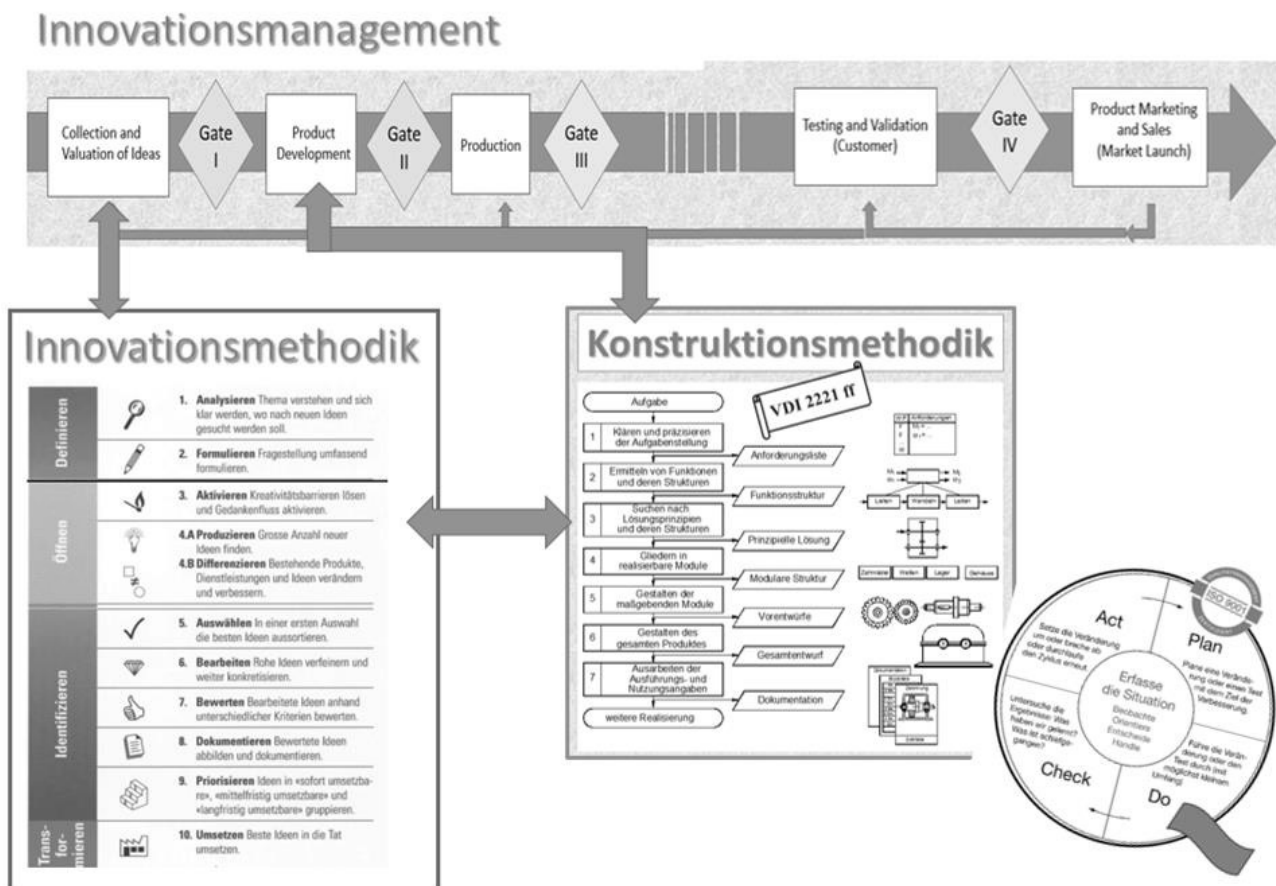


Bild 3: Innovations- und Konstruktionsmethodik im Innovationsmanagement

Gegenwärtig wird in vielen Unternehmen wegen des sinkenden Innovationsgrades der deutschen Wirtschaft ein Innovationsmanagement integriert. Da es hierfür noch keinen einheitlichen Standard gibt, ist die Vielfalt auf dem Markt grenzenlos. Aus unterschiedlichen recherchierten Ansätzen wurde ein 4-Tore-Modell (s. Abb. 3) erarbeitet. Unterstützt werden soll vor allem die Freie Innovation. Für Ingenieure existiert ebenfalls eine rational erscheinende Innovations-Methodik (s. Abb. 3), die 10 einzelne Arbeitsschritte definiert, die abzuarbeiten sind, um das Gate I (Produktidee) zu erreichen. Danach schließt sich in bewährter Weise der Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 an. In der Konzeptphase kann wiederum auf die Innovationsmethodik zurückgegriffen werden, um so z.B. innovative Lösungen für Teilfunktionen zu generieren.

In der Innovationsmethodik gibt es neben einer Themenkreisdefinition und –analyse, einen spielerischen, ablenkenden Geist-Öffnungs-Arbeitsschritt. Die Anwendung von Kreativitätstechniken schließt sich an, wobei je nach Fragestellung (Verbesserung oder total neu) entsprechende Techniken anzuwenden sind, bevor wiederum geeignete Ideen rational und systematisch bewertet, die Existenz recherchiert und als konkrete Aufgabenstellung der Produktentwicklung zur Verfügung gestellt werden. Eingeschlossen ist auch eine Teilinnovation, die auf den Markt bestehende Produkte identifiziert, diese jedoch verändert und weiterentwickelt. Abbildung 4 zeigt die Vorgehensweise bis zum Erreichen der konkreten innovativen Produktidee im Gate I.

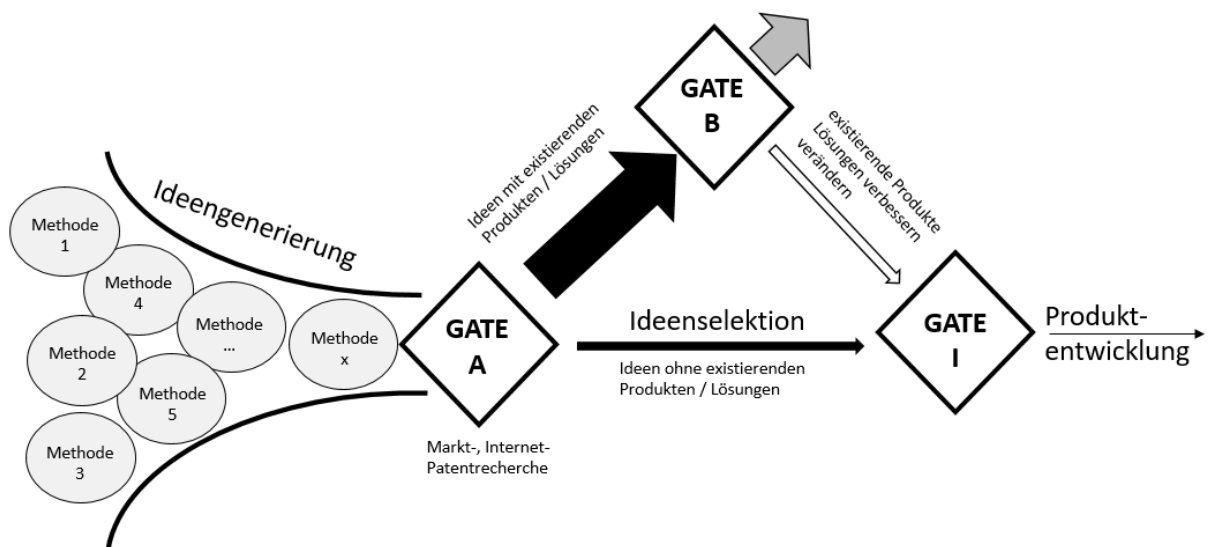


Bild 4: Ideengenerierung und –auswahl im Innovationsmanagement

3 Qualitätsmanagement nach DIN EN ISO 9001:2015

Im November 2015 wurde die grundlegend überarbeitete Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9901:2015 veröffentlicht. Bis September 2018 müssen alle zertifizierten Unternehmen ihr Qualitätsmanagement auf die neue Norm umgestellt haben. Gegenüber der Revision von 2008 sind grundsätzliche Änderungen eingepflegt worden. Die Änderungen können mit 8 Schwerpunkten angegeben werden:

1. Strategische Ausrichtung der Organisation

Das Qualitätsmanagementsystem muss zukünftig in die strategische Ausrichtung der Organisation eingebunden werden. Die oberste Leitung muss dazu sicherstellen, dass die Qualitätspolitik und die Qualitätsziele mit der strategischen Ausrichtung und dem Kontext der Organisation vereinbar sind.

2. Erweiterung der Zielgruppen

Die ISO 9001:2015 fordert zukünftig eine Festlegung von für das QM-System relevanten interessierten Parteien und deren Anforderungen. Die neue Norm erweitert hier die Kundenorientierung um weitere Zielgruppen.

3. Prozessmanagement wird wichtiger

ISO 9001:2015 legt größeres Gewicht auf den prozessorientierten Ansatz und auf die Forderung nach einem umfassenden und systematischen Prozessmanagement.

4. Verteilung der Verantwortlichkeiten

In der ISO 9001:2015 nimmt die oberste Leitung für das Qualitätsmanagement stärker in die Verpflichtung.

5. Risikomanagement

Völlig neu aufgenommen in die ISO 9001:2015 wurde die Forderung nach einem systematischen Umgang mit Risiken und Chancen. Organisationen müssen zukünftig Risiken und Chancen identifizieren, analysieren, bewerten sowie Gegenmaßnahmen planen, umsetzen und ihre Wirksamkeit kontrollieren.

6. Wissensmanagement

Die Revision fordert einen systematischen Umgang mit Wissen. Dazu gehört, das notwendige Wissen zur Durchführung der Prozesse festzuhalten, aufrechtzuerhalten und für alle Mitarbeiter verfügbar zu machen.

7. Dokumentation – Papier-QM-Handbuch nicht mehr erforderlich

Ein ausgedrucktes Handbuch ist nicht mehr zwingend erforderlich und gilt nicht mehr als praktikabel. Die Veröffentlichung im Internet bzw. firmeninternen Netz ist erlaubt.

8. Einbindung der Produktentwicklung

Im Abschnitt 8 der DIN EN ISO 9001:16 ist erstmalig auch die Entwicklung der Produkte verpflichtend in das Qualitätsmanagement mit eingebunden.

Was bedeutet das nun konkret für die Berücksichtigung des Innovationsmanagements, der Innovationsmethodik und der Konstruktionsmethodik? Sicherlich eine bewusstere aber auch verpflichtende Integration und die Schaffung eines ganzheitlichen abrechenbaren Prozesses.

4 Innovations-, Produktentwicklungs- und Qualitätsmanagement als ganzheitliches System

In den Abbildungen 3 und 4 wurde bereits ein ganzheitliches System vorgestellt, wie es die Forderung nach einer Prozessorientierung (s. Punkt 3) unterstützen kann und in diesem Abschnitt noch tiefergehender erklärt werden soll.

Gemäß Kapitel 8 der neuen DIN EN ISO 9001 soll die Produktentwicklung verpflichtend in das QM mit einbezogen werden und der Produktentwicklungsprozess risikoorientiert ausgerichtet werden (s. Punkt. 5). Die im Abschnitt 1 vorgestellten Analysewerkzeuge FMEA, FTA und Ishikawa können angewendet werden, müssen zusätzlich aber auch auf den Konstruktionsprozess z.B. als Prozess-FMEA erweitert werden.

Geht es um die Innovation, ist dieses z.B. als strategische Ausrichtung der Leitung (s. Punkt 1) zu kennzeichnen. Der eigentliche Innovationsprozess mit der Innovationsmethodik ist zwar immer noch nicht mit Kennzahlen quantifizierbar. Im Rahmen der neuen Qualitätsnorm ist aber die Schaffung eines geeigneten Umfeldes zur Absicherung des Innovationsprozesses möglich aber auch notwendig. Dazu gehören:

- Absicherung von Maßnahmen bzw. Schaffung von Rahmenbedingungen, die fördernde bzw. schädigende Innovationskriterien gemäß Abb. 5 unterstützen bzw. unterdrücken. Wichtig erscheint z.B. die Schaffung von zeitlichen Freiräumen, angenehmer Betriebs-Atmosphäre, gesundheitsfördernde Maßnahmen, die Wissensbereitstellung und Vermittlung (siehe z.B. 4 und 6).

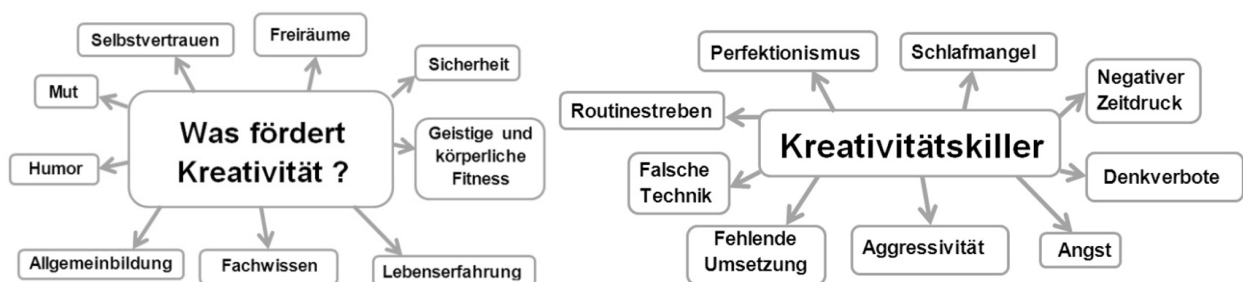


Bild 5: Rahmenbedingungen für Innovation

Ausgehend von Initiativen in den USA oder in Asien stehen zur Schaffung qualitativ hochwertiger Innovation Kreativitätslaboratorien hoch im Kurs. Umgesetzt werden wissenschaftliche Erkenntnisse, wonach Kreativität und Innovation nicht am Arbeitsplatz entstehen, sondern eher in den unterschiedlichsten Freiräumen, wie aus der Abbildung 6 (links) hervorgeht.

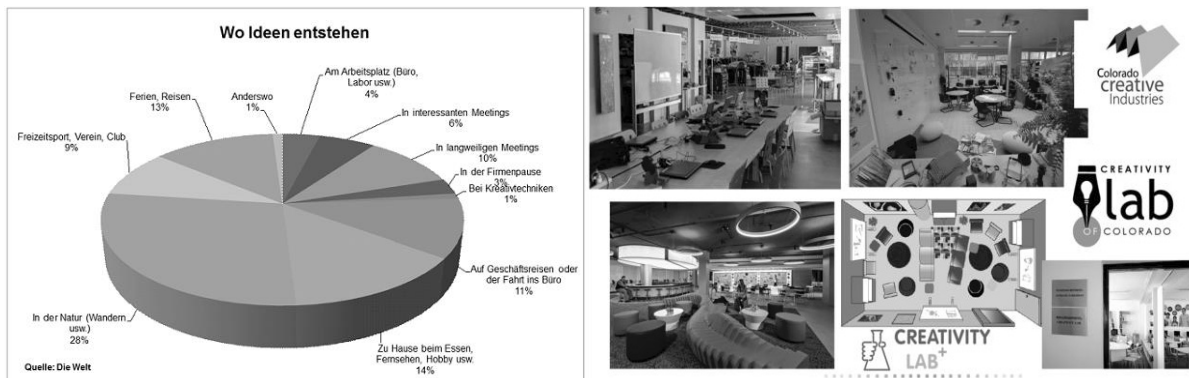


Bild 6: Orte für qualitative Innovation

Die Punkte 4 und 6 verlangen nach einer Wissensvermittlung und nach mehr Eigenverantwortlichkeit. Im Rahmen des Innovationsmanagements kann z.B. per Internet notwendiges Wissen für Kreativitätstechniken bereitgestellt werden. Mitarbeiter können Kreativitätstechniken entdecken, sich selber auditieren, welche Verfahren z.B. am besten geeignet sind – zeichnerische oder verbale, Einzelarbeit oder Gruppenarbeit, mit oder ohne öffentliche Präsentation. Nach einem Selbstaudit können Datenbanken erstellt werden, mit denen ideale Innovations-Teams zusammengestellt werden können.

Werden Mitarbeiter geschult, deren Stärken gezielt genutzt, werden Prozesse eindeutig definiert und durch die Leitung unterstützt und herrscht eine angenehme, nicht zu vergessen eine humorvolle Umgebung vor, lassen sich qualitativ hochwertige Produktideen und endgültige Produkte bereits in der Produktentwicklungsphase noch besser entwickeln.

Literatur

- [1] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte,
- [2] VDI Verlag, 05/1993
- [3] DIN EN ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen, Beuth Verlag, 11/2015.
- [4] Schnegas, Henrik: Kreativitäts- und Innovationsmethoden / Entrepreneurship, Wismar, 03/2017.
- [5] Schnegas, Henrik: Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit technischer Systeme, Wismar, 09/2016

Systematik zur Differenzierung von Varianten im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Natalie Peglow, Jonas Powelske, Clemens Birk, Albert Albers, Nikola Bursac

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

Kaiserstr. 10, D-76131 Karlsruhe

E-Mail: {Natalie.Peglow, Jonas.Powelske, Clemens.Birk}@partner.kit.edu;

{Albert.Albers, Nikola.Bursac}@kit.edu

Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

Inhalt: Dem Megatrend Individualisierung folgend versuchen Unternehmen zunehmend den vielfältigen Kundenwünschen mit einem variantenreichen Produktportfolio zu entsprechen. Die hohe Variantenanzahl erfordert einen steigenden strukturellen und organisatorischen Aufwand, dem die Unternehmen wiederum mit Hilfe eines systematischen Variantenmanagements zu begegnen versuchen. Hierfür ist es notwendig, sowohl die angebotene als auch die angestrebte Variantenvielfalt innerhalb des Produktportfolios kritisch zu hinterfragen. Im Rahmen dieses Beitrags werden anhand von Fallbeispielen aus der Industrie charakterisierende Aspekte für Varianten empirisch untersucht. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Systematik vorgeschlagen, die eine frühzeitige Einordnung ermöglichen, ob das bearbeitete Objekt als Variante oder neue Produktgeneration zu verstehen ist. Die Einordnung erfolgt anhand von binären Leitfragen und einer Formel zur Differenzierung. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich im Anschluss nutzen, um die Auswirkungen auf das vorhandene Produktportfolio abzuschätzen und strategische Entscheidungen zu unterstützen. Die Anwendung der Systematik ist ebenfalls anhand eines Fallbeispiels aus der Industrie dargestellt.

Abstract: Following the megatrend individualization companies are increasingly trying to meet the diverse customer requirements with a varied product portfolio. The large number of variants requires an increasing structural and organizational effort which companies try to address with a systematic variant management. It is necessary to question both the offered as well as the desired variety of variants critically. In this article at first empirical case studies are conducted to identify characterizing aspects of variants. Based on the findings a systematic is proposed which allows an early classification whether the edited object is to be understood as a variant or a new product generation. The classification is based on binary guiding questions and on a calculation formula for differentiation. The result can be used to assess the impact on the existing portfolio and to support strategic decisions. The application of the systematic is illustrated by a case study from the industry.

Stichwörter: Variantenvielfalt, Variantenmanagement, Bewertungssystematik, Formel zur Differenzierung

Keywords: variant diversity, variant management, evaluation systematic, calculation formula for differentiation

1 Einführung

Im Jahr 2000 bot Porsche seinen Kunden mit dem Porsche Boxster und Porsche 911 zwei Serienmodelle an, die in zwei (Boxster) und vier (911) Varianten bestellbar waren. Im Jahr

2017 sind drei weitere Modelle (Panamera, Macan und Cayenne) hinzugekommen, sodass Kunden inzwischen aus mehr als 50 verschiedenen Varianten wählen können [1]. Eine solche Diversifikation des Produktportfolios ist nicht nur in der Automobilbranche, sondern - infolge des Megatrends Individualisierung - in nahezu allen Branchen zu beobachten. Neben Standardlösungen bieten Unternehmen oftmals eine Vielzahl von Produktvarianten und Sonderkonstruktionen an, um den Markt- und Kundenanforderungen zu entsprechen. Eine kostengünstige Realisierung der benötigten Varianten ist entscheidend, um insbesondere wettbewerbsfähige Marktanteile zu sichern. Unternehmen sehen sich zunehmend mit den einhergehenden strategischen, operativen und organisatorischen Herausforderungen konfrontiert und versuchen diese mit Hilfe von Standardisierungsmethoden [2] und einem systematischen Variantenmanagement [3] zu adressieren. Dabei sind die angebotene sowie die angestrebte Variantenvielfalt innerhalb des Produktportfolios kritisch zu hinterfragen. Zielführend ist es bereits in der Frühen Phase [4] der Produktgenerationsentwicklung bei der Bewertung von Varianten anzusetzen [5]. Ein entsprechender Ansatz wird im Folgenden vorgestellt, der strategische Entscheidungen hinsichtlich der Variantenbildung frühzeitig unterstützt.

2 Stand der Forschung

2.1 PGE – Produktgenerationsentwicklung

Der Ansatz der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS [6] erweitert bisherige Erkenntnisse der klassischen Konstruktionsmethodik [7] und des Innovationsmanagements [8] mit dem Ziel reale Produktentwicklungsprozesse hinsichtlich ihres Neuentwicklungsanteils beschreiben zu können. Aufgrund strenger Abgrenzungen ist eine Einordnung von Produkten in bestehende Ansätze [7] schwer möglich. Der PGE zufolge liegen den meisten Produktentwicklungsprozessen Referenzprodukte als bestehende Lösungen zugrunde, von denen Teilsysteme und Strukturelemente die Basis einer neuen Produktgeneration (PG) bilden [9]. Das Basis-Referenzprodukt ist das Referenzprodukt einer PG, von der die überwiegende Anzahl an Teilsystemen aus Ziel- und Objektsystem [10] sowie Strukturelementen (z.B. Funktions-, Baustruktur) übernommen oder diese als Grundlage für Variationen [11] verwendet werden. Mit Hilfe der in der PGE dargestellten Entwicklungsaktivitäten sind zu entwickelnde Produkte durch anteilige Kombination der Übernahme- (ÜV), Gestalt- (GV) und Prinzipvariation (PV) eindeutig beschreibbar [6].

2.2 Der Variantenbegriff

In der Literatur sind Varianten bezüglich ihres hohen Anteils an gleichen Merkmalen bestimmt [12, 13]. Die Art der Merkmale umfasst die Produktgestalt, strukturelle Merkmale sowie den Produktzweck, der sich aus Elementen des Zielsystems erschließt [13, 14]. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses finden in Unternehmen neben den für Kunden sichtbaren Varianten, sogenannte interne Varianten Einsatz [15]. Mit Fokus auf den Zeitraum nach Markteinführung führen die Autoren im Kontext der PGE folgende Definition an: Eine Variante ist eine PG, die einen hohen ÜV-Anteil zu ihrem Varianten-Referenzprodukt aufweist. Diese unterliegen demselben Produktgenerationszyklus und existieren weitgehend parallel am Markt. Das Varianten-Referenzprodukt ist somit eine spezielle Form des Basis-Referenzprodukts. Die Variante ist zu ihrem Varianten-Referenzprodukt durch eine differente Ausprägung der charakterisierenden Merkmale abgegrenzt, um individuellen Kunden- und Marktanforderungen gerecht zu werden sowie um Wettbewerbsvorteile zu generieren. Im Gegensatz zu Varianten hat jede PG vorwiegend das Ziel, einen existierenden Produktgenerationszyklus am Markt abzulösen und einen neuen Zyklus aufzuspannen.

2.3 Variantenmanagement

Als Resultat der zunehmenden Produktindividualisierung und dem Anstieg der Variantenanzahl ist mit dem Variantenmanagement im Laufe der Zeit ein eigenes Forschungsfeld entstanden [16]. Gegenstand der Forschung ist es ganzheitliche Ansätze zu schaffen, um die Variantenvielfalt über den gesamten Produktlebenszyklus beherrschbar zu machen [17]. Dies bedeutet eine unternehmensspezifische, optimale Variantenanzahl hinsichtlich Kosten und Nutzen zu finden [18]. Variantenmanagement ist als eine Querschnittsfunktion im Unternehmen zu verstehen, die häufig von Interessensgegensätzen geprägt ist [19]. Daher sind Entscheidungen hinsichtlich der Einführung einer Variante im Konsens der produkt- und prozessseitigen Unternehmensbereiche zu treffen [17].

3 Forschungsbedarf und Methodik

Aus dem Stand der Forschung wird ersichtlich, dass es bereits zahlreiche Literatur zum Variantenmanagement gibt. Allerdings wurde bisher nicht untersucht, wie die Variantenbildung im Kontext der PGE beschrieben werden kann. Dies soll langfristig dazu genutzt werden bereits in der Frühen Phase das Produktportfolio strategisch zu steuern. Dafür soll

nachfolgend auf Basis des Standes der Forschung eine Systematik aufgezeigt werden, die zur Beantwortung folgender Forschungsfrage heranzuziehen ist:

Wie kann die Einordnung einer Variante unter Verwendung des PGE Ansatzes in der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung unterstützt werden?

Zunächst werden drei Fallstudien aus der Entwicklungspraxis vorgestellt, mit deren Hilfe charakterisierende Aspekte für Varianten identifiziert werden. Die ermittelten Aspekte werden durch eine Fragebogenstudie mit 363 Teilnehmern bei einem internationalen Automobilzulieferer validiert. Anhand der Ergebnisse der Fallstudien sind Leitfragen und eine Formel zur Differenzierung abgeleitet. Dadurch wird Managern, Produktentwicklern, angrenzenden Funktionsbereichen und Forschern ein einfach anzuwendendes Instrument zur Verfügung gestellt, um eine Einordnung eines neuen Produkts in das Produktportfolio vorzunehmen. Die transparent abgeleitete Einordnung kann anschließend als Grundlage für eine Abschätzung der strukturellen und organisatorischen Auswirkungen dienen, die wiederum den strategischen Entscheidungsprozess unterstützt.

4 Untersuchung und Ergebnisse

4.1 Charakterisierende Aspekte für Varianten

Anhand von drei Fallstudien aus der Praxis werden charakterisierende Aspekte für Varianten im Folgenden identifiziert. Die erste Fallstudie umfasst die Untersuchung jeder PG_i (i=1,...,4) von Hochdruckpumpen nach Markteinführung in Zusammenarbeit mit einem internationalen Automobilzulieferer (Bild 1).

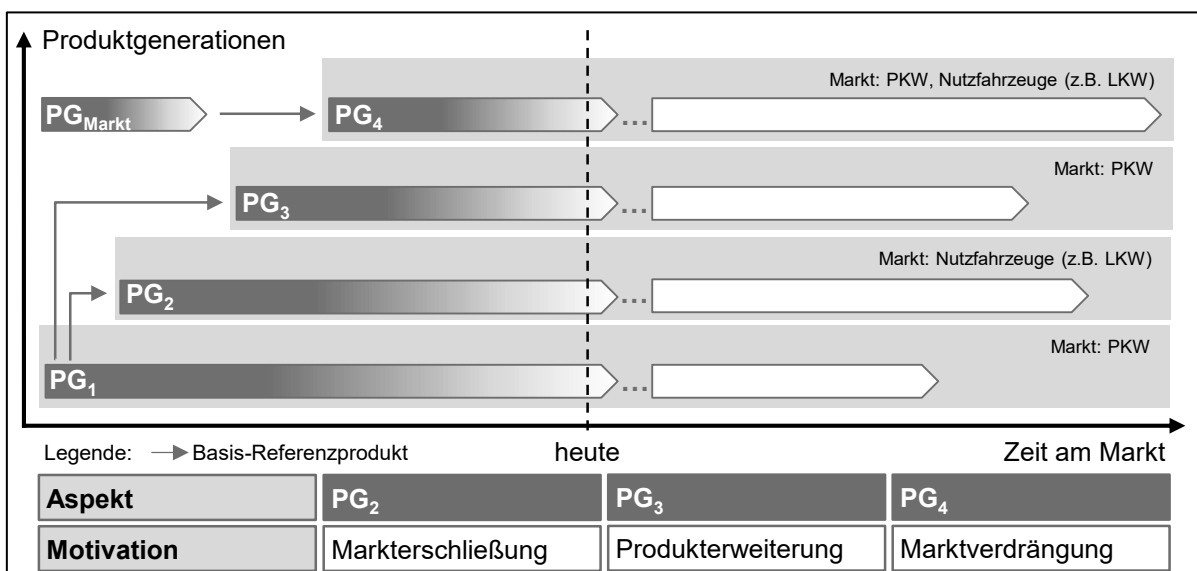


Bild 1: Produktgenerationen von Hochdruckpumpen eines internationalen Automobilzulieferers

Insbesondere PG₁ ist Basis-Referenzprodukt für PG₂ und PG₃ und somit unterliegen PG₁, PG₂ und PG₃ demselben Antriebskonzept. PG₄ beruht hauptsächlich auf einem im Unternehmen bis dato noch nicht adaptierten, aber am Markt anderer Anwendungsbereiche bekannten Antriebskonzept. Infolgedessen wurde ein neues, einheitliches Fertigungskonzept konzipiert, das ausschlaggebend für die PG₄ und deren Varianten ist. Für die Entwicklung jeder neuen PG war unter anderem eine Leistungssteigerung in Form der Erhöhung des Einspritzdrucks ausschlaggebend. Darüber hinaus war die Motivation hinter PG₂ die Erschließung des Nutzfahrzeugmarktes. Die PG₁ war nicht in der Lage die steigenden Leistungsanforderungen des PKW-Marktes abzudecken, weswegen das Ziel der PG₃ eine Produkterweiterung der PG₁ ist. Aufgrund der Leistungsgrenzen der PG₁ wird mit der PG₄ langfristig das Ziel verfolgt die PG₁, PG₂ und PG₃ am Markt abzulösen. Die zweite Fallstudie ist in der Vorausentwicklung eines internationalen Automobilzulieferers verortet. Gegenstand der Betrachtung sind mechatronische Antriebe, welche bei der Entwicklung besonders von der Fertigungstechnik beeinflusst sind. In einem konkreten Fall sollte die Ansteuerelektronik eines Elektromotors kostengünstiger umgesetzt werden, wobei zwei unterschiedliche Varianten hinsichtlich der Funktionsumfänge zu realisieren sind. Als Randbedingung sind dieselben Fertigungsverfahren und Montageschritte beizubehalten. Die erste Variante basiert auf dem Vorgängerprodukt und dient als Grundlage für die zweite Variante mit kleinerem Funktionsumfang. Trotz unterschiedlicher Leiterplattengröße sind beide Varianten mit denselben Prozessschritten herstellbar. Die dritte Fallstudie ist bei einem Werkzeugmaschinenhersteller in der Entwicklung einer neuen PG von Laser-Schneidanlagen zu finden. Um den unterschiedlichen Kundenanforderungen hinsichtlich des Bearbeitungsraums von Blechgrößen gerecht zu werden, entwickelte der Hersteller drei unterschiedliche Varianten, wobei die kleinste Ausführung als Varianten-Referenzprodukt für die beiden anderen Varianten diente. Bei identischer Funktions- und Baustruktur wurden weitestgehend nur Länge und Breite des Bearbeitungsraums und die davon abhängigen Teilsysteme variiert.

Aus den Fallstudien resultieren folgende charakterisierende Aspekte für Varianten:

- Die Motivation zur Entwicklung eines neuen Produkts ist bestimmend für die Einordnung in das Produktportfolio. Am Beispiel der Hochdruckpumpen liegt der Fokus von Varianten auf einer verstärkten Produktindividualisierung und nicht auf der Verdrängung eines bestehenden Produkts am Markt (1. Fallstudie).

- Der hohe ÜV-Anteil von Teilsystemen ist beispielsweise auf dieselben Fertigungsverfahren und Montageschritte der mechatronischen Antriebe zurückzuführen (2. Fallstudie).
- Die Übernahme von Strukturelementen spiegelt sich unter anderem in der Funktions- und Baustruktur der Werkzeugmaschinen wider (3. Fallstudie).

Im Rahmen der ersten Fallstudie ist jede PG als Variation zu einem Basis-Referenzprodukt zu verstehen (vgl. Kapitel 2.1). Des Weiteren existieren für jede PG Varianten, die genau einem Produktgenerationszyklus zugeordnet sind (vgl. Kapitel 2.2). Bei diesem internationalen Automobilzulieferer für Hochdruckpumpen wurde eine strukturierte Fragebogenstudie mit 363 Teilnehmern durchgeführt (Bild 2). Insgesamt wurden 638 Mitarbeiter des Unternehmens kontaktiert, um die Ursachen für eine hohe Variantenanzahl des Produktgenerationszyklus der PG₄ zu validieren. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 56,90%. Mehrere Antworten waren möglich.

Aus der Fragebogenstudie geht hervor, dass eine hohe Variantenanzahl insbesondere auf Kunden- (89,53%) und Marktanforderungen (56,20%) zurückzuführen ist. Kundenanforderungen spiegeln spezielle Kundenwünsche wider, wohingegen Marktanforderungen unter anderem gesetzliche Rahmenbedingungen umfassen. Weniger werden die Kostenanforderungen (39,12%), Qualitätsanforderungen an das Produktdesign (14,60%) und an die Fertigungsprozesse (9,92%) genannt. Sonstige Ursachen sind mit 7,99% beziffert. Der charakterisierende Aspekt der Produktindividualisierung resultiert aus der dritten Fallstudie und ist auf steigende Kunden- und Marktanforderungen zurückzuführen. Die Fragebogenstudie bestätigt dies.

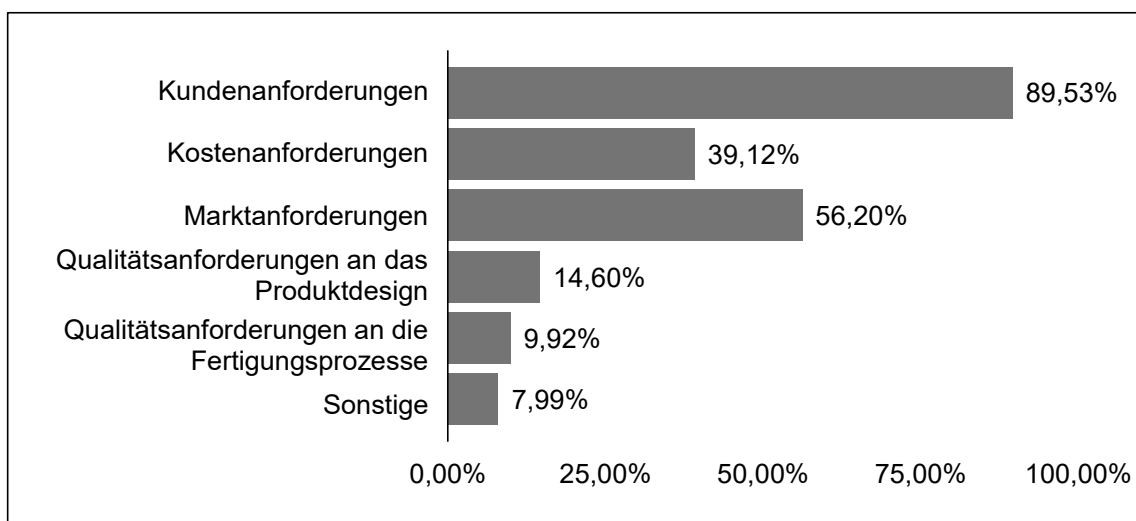


Bild 2: Ursachen für eine hohe Variantenanzahl, n=363, Multiple Choice

4.2 Grundlage der Systematik zur Differenzierung von Varianten

Basierend auf den charakterisierenden Aspekten für Varianten wird nachfolgend eine Systematik zur Differenzierung von Varianten vorgestellt. Mit Hilfe der Systematik können Manager, Produktentwickler, funktionsübergreifende Bereiche und Forscher (nachfolgend: Anwender) eine Einordnung eines bearbeiteten Objekts in das unternehmenseigene Produktportfolio vornehmen. Diese Einordnung folgt der Fragestellung, ob das bearbeitete Objekt als ein neues Produkt, eine neue PG oder eine neue Variante zu verstehen ist. Binäre Leitfragen ($i \in \{1, \dots, 6\}$) dienen der Abfrage der charakterisierenden Aspekte. Angelehnt an die strategische Unternehmensausrichtung nehmen Experten des Unternehmens vorab eine Gewichtung der Leitfragen vor ($g_i \in \{\mathbb{Q}^+ \mid \sum_{i=2}^6 g_i = 1 \wedge 0 \leq g_i \leq 1\}$, für $i \in \{2, \dots, 6\}$). Die Anwender können darauf aufbauend die Leitfragen mit nein=0 und ja=1 ($x_i \in \{0,1\}$) beantworten. Die erste Leitfrage gilt als eine K.O.-Abfrage, ob das bearbeitete Objekt ein neues Produkt ($x_1=0$) oder ob eine weitere Differenzierung notwendig ist ($x_1=1$). Dabei spiegelt die Formel zur Differenzierung das Antwortverhalten und die Gewichtung wider:

$$x_2 g_2 + \dots + x_n g_n \geq \frac{1}{2}, \text{ dann Variante}_{n+1} \quad (1)$$

$$x_2 g_2 + \dots + x_n g_n < \frac{1}{2}, \text{ dann PG}_{n+1} \quad (2)$$

Nachfolgend sind die Leitfragen mit einer beispielhaften Gewichtung aufgelistet, wobei die Beantwortung mit Experten des internationalen Automobilzulieferers für Hochdruckpumpen erarbeitet wurde. Als Beispiel ist eine Pumpe mit zwei anstatt einem Kolben gewählt (Tabelle 1). Die Gewichtung, die Anzahl und der Inhalt der Leitfragen sind abhängig von den unternehmensspezifischen Anforderungen individuell anzupassen.

Tabelle 1: Beispielhafte Anwendung der Leitfragen zur Differenzierung

i	Leitfragen	g_i	Antwort	x_i
1	Es existiert ein Basis-Referenzprodukt des bearbeiteten Objekts am Markt?		ja	1
2	Das Basis-Referenzprodukt des bearbeiteten Objekts ist am Markt verfügbar?	0,05	ja	1
3	Mit dem bearbeiteten Objekt ist keine Ablösung eines bestehenden Produkts am Markt vorgesehen?	0,05	nein	0
4	Das bearbeitete Objekt ist durch zulässige Anpassungen von Teilsystemen (z.B. Produktions-, Validierungsprozesse) zu seinem Basis-Referenzprodukt charakterisiert?	0,3	ja	1
5	Das bearbeitete Objekt ist durch ein zulässiges Erweitern, Weglassen oder Austauschen von Merkmalen zu seinem Basis-Referenzprodukt charakterisiert?	0,3	ja	1
6	Das primäre Ziel des bearbeiteten Objekts ist eine stärkere Produktindividualisierung?	0,3	ja	1

Eine Pumpe mit zwei Kolben hat die am Markt verfügbare Pumpe mit einem Kolben ($x_2=1$) als Basis-Referenzprodukt ($x_1=1$). Somit ist die Formel zur Differenzierung anzuwenden. Das Ergebnis von 0,95 besagt, dass die Pumpe mit zwei Kolben eine neue Variante ist:

$$1 \cdot 0,05 + 0 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,3 = 0,95 \geq \frac{1}{2}, \text{ somit Variante} \quad (3)$$

Zwei Kolben sind als Ausnahmen zu sehen, die eine mögliche Option bieten die PG₂ zu ersetzen ($x_3=0$). Zusätzlich ist eine Produktindividualisierung zu Grunde gelegt ($x_6=1$). Die Pumpe mit zwei Kolben basiert auf demselben Antriebskonzept, weist in hohem Maße Gleichteile auf ($x_5=1$) und das Fertigungsprinzip unterliegt zulässigen Anpassungen ($x_4=1$).

5 Diskussion und Ausblick

Die im Beitrag vorgestellten Forschungsergebnisse bestätigen, dass dem Variantenbegriff in der Industrie eine große Bedeutung zukommt. Die Fallstudien zeigen, dass eine Differenzierung von Varianten frühzeitig im Produktentwicklungsprozess notwendig ist, die einer flexibel gestaltbaren Methode unterliegt. Im Kontext der PGE ist mit der vorgestellten Systematik eine praxistaugliche Differenzierung zwischen einer neuen Variante und einer neuen PG möglich. Diese bietet den Anwendern die Möglichkeit eine nachvollziehbare Einordnung neuer Produkte ins Produktportfolio vorzunehmen. Auf dieser Basis können etwaige Risiken bei der Erweiterung des Produktportfolios frühzeitig erkannt werden. In diversen Forschungsprojekten der Autoren ist die Varianteneinordnung ein zentraler Ausgangspunkt der weiteren Forschungstätigkeiten. Beispielsweise wird eine Methodik entwickelt, die eine ganzheitliche Bewertung von neuen Varianten und somit die Transparenz strategischer Entscheidungen bereits in der Angebotsphase unterstützt. Ein weiteres Einsatzgebiet der Systematik sind Methoden für das Variantenmanagement im Kontext der PGE am Beispiel der Baukastenstrukturierung von Werkzeugmaschinen und mechatronischer Antriebe.

Literatur

- [1] Homepage Porsche: Internetseite des Herstellers Porsche: www.porsche.com, zuletzt abgerufen am 12.04.2017
- [2] Albers, A; Scherer, H; Bursac, N.; Rachenkova, G.: Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation, 2015

- [3] Thiebes, F.; Plankert, N.: Umgang mit Komplexität in der Produktentwicklung – Komplexitätsbeherrschung durch Variantenmanagement. In: Komplexitätsmanagement in Unternehmen, S. 165-185, Hrsg. Schoeneberg, K.-P., Springer Gabler 2014.
- [4] Albers, A.; Rapp, S.; Birk, C.; Bursac, N.: Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (2017).
- [5] Albers, A.; Walch, M.; Lohmeyer, Q.: Zielsystemorientiertes Variantenmanagement einbaufertiger Systembaugruppen. In: 23. DfX-Symposium 2012, 2012.
- [6] Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderung aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: H. Binz und B. Bertsche (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2012 (2012).
- [7] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [8] Henderson, R.; Clark, K.: Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. In: Administrative science quarterly (1990), S. 9-30.
- [9] Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S.: PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. In: Forschung im Ingenieurwesen (12/2016), S. 1-19. DOI: 10.1007/s10010-016-0210-0.
- [10] Albers, A.; Lohmeyer, Q.; Ebel, B.: Dimensions of Objectives in interdisciplinary product development projects. In: Proceedings of the 18th International Conference of Engineering Design (ICED11), Impacting Society through Engineering Design (2011), S. 256-265.
- [11] Klingler, S.: Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung, 2017.
- [12] Rathnow, P.: Integriertes Variantenmanagement. In: Innovative Unternehmensführung, Band 20, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1993
- [13] Franke, H.-J.; Firchau, N. L.: Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen – Erfahrungen, Methoden und Instrumente zur erfolgreichen Beherrschung. In: VDI-Berichte 1645, S.1-21, VDI-Verlag, Düsseldorf 2001
- [14] Norm DIN 199, Teil 2: Begriffe im Zeichnungs- und Stücklistenwesen. Berlin: Beuth 1977.
- [15] Eversheim, W.; Schenke, F.-B.; Warnke, L.: Komplexität im Unternehmen verringern und beherrschen – Optimale Gestaltung von Produkten und Produktionssystemen. In: Komplexitätsmanagement, Hrsg. von Dietrich Adam, Gabler 1998.
- [16] Bayer, T.: Integriertes Variantenmanagement. Variantenkostenbewertung mit faktorenanalytischen Komplexitätstreibern. In: Schriften zu Management, Organisation und Information, Hrsg. von Hagen Lindstädt, Band 25, Rainer Hampp Verlag, München u. Mering 2010
- [17] Wildemann, H.: Variantenmanagement. Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess. Präambel der 20. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum 2012
- [18] Renner, I.: Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Dissertation, Technische Universität München, 2007.
- [19] Heina, J.: Variantenmanagement. Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt. Wiesbaden: Gabler 1999. Zugl. Cottbus: Brandenburgische TU, Diss. 1999.

Entwicklung und Verifizierung eines Berechnungsprogramms zur thermischen Bewertung von nuklearen Transport- und Lagerbehältern

Christian Dinkel, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth

Email: christian.dinkel@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de>

Inhalt: Die Abfuhr der Nachzerfallswärme ist eines von mehreren Schutzziele von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente (T/L-Behälter). Die Finite Elemente Analyse (FEA) ist dabei eine wichtige Methode für die thermische Auslegung derartiger Behälter. Von besonderem Interesse ist ein gasgefüllter Ringspalt, der den Behälter in einen inneren und einen äußeren Teil trennt. Um den Einfluss des Spaltes, der im Verhältnis zu den übrigen Abmessungen eines T/L-Behälters äußerst klein ist, effizient in einer FE-Simulation mit allen für die Wärmeübertragung nötigen Effekten abzubilden, wird im Rahmen eines Forschungsprojekts eine spezielle Randbedingung entwickelt, die als sogenannte thermische Spaltbedingung (TSB) bezeichnet wird. Mithilfe dieser TSB soll es möglich sein, die Einflüsse des Ringspaltes auf die Wärmeübertragung zu berücksichtigen, ohne diesen zu vernetzen. Zur Beschreibung der thermischen Vorgänge werden analytische Gleichungen aufgestellt. Die Herausforderung liegt in der Definition dieser analytischen Gleichungen. Die korrekte Funktionsweise der thermischen Spaltbedingung wird mittels Prüfstandversuchen verifiziert. Wird eine TSB erfolgreich aufgestellt, führt ihre Verwendung zu einer deutlichen Vereinfachung des Modellierungsaufwands und ermöglicht eine kurze Berechnungszeit bei gleichzeitiger Berücksichtigung der entscheidenden thermischen Effekte im Ringspalt.

Abstract: The dissipation of decay heat is one among other protection objectives of nuclear transport- and storage casks (T/S-cask). The Finite Element Analysis (FEA) is an important method for the thermal evaluation of such casks. A gas filled annular gap which divides the cask in inner and outer part is of particular interest. In comparison to the remaining dimensions the gap is very small. In order to include its influences in thermal calculations efficiently, a special boundary condition, called Thermal Gap Condition (TGC), is developed within the frame of a research project. With the help of the TGC, it is possible to consider the influences of the annular gap on the heat transfer without the need of meshing this area. Analytical equations are used to describe the thermal processes. The correct creation of these equations is a big challenge. The proper functioning of the Thermal Gap Condition is verified by test-bench experiments. After the successful implementation of a TGC the modeling effort and the calculation duration is reduced significantly, whereby the thermal effects of the annular gap are considered.

Stichwörter: thermische Finite Elemente Analyse, Transport- und Lagerbehälter, Lagrange-Multiplikator-Methode.

Keywords: thermal Finite Element Analysis, Transport- and Storage Cask, Lagrange Multiplier Method.

1 Thermische Simulation von Transport- und Lagerbehältern

Um die Festigkeit der eingesetzten Materialien bei Transport- und Lagerbehältern (T/L-Behälter) nicht zu schwächen, muss sichergestellt werden, dass derartige Behälter in der Lage sind, die anfallende Nachzerfallswärme nach außen abzuführen. Diese entsteht auch bei abgebrannten, eingelagerten Brennelementen. Aus diesem Grund ist es wichtig die herrschenden Temperaturen im Inneren von T/L-Behältern zu kennen. Die Finite Elemente Analyse (FEA) ist dabei eine etablierte Methode, um die Temperaturverteilung und Wärmeflüsse innerhalb eines Behälters zu simulieren.

Eine besondere Herausforderung bei der FE-Simulation von T/L-Behältern ist die Berücksichtigung kleiner, gasgefüllter Spalte, die den Wärmetransport signifikant beeinflussen können, da die Wärmeleitfähigkeit von Fluiden deutlich geringer als die von metallischen Werkstoffen ist [1]. Von besonderem Interesse ist dabei ein Helium-gefüllter Ringspalt, der den Behälter in einen inneren und einen äußeren Teil trennt, wie in Bild 1 gezeigt ist. Im Innenbehälter werden die Brennelemente im sogenannten Tragkorb positioniert, der Außenbehälter sorgt für hohe mechanische Stabilität und Abschirmung der radioaktiven Strahlung. Der Ringspalt existiert, um eine unterschiedlich starke thermische Ausdehnung von Innen- und Außenbehälter zu ermöglichen und um Fertigungstoleranzen auszugleichen.

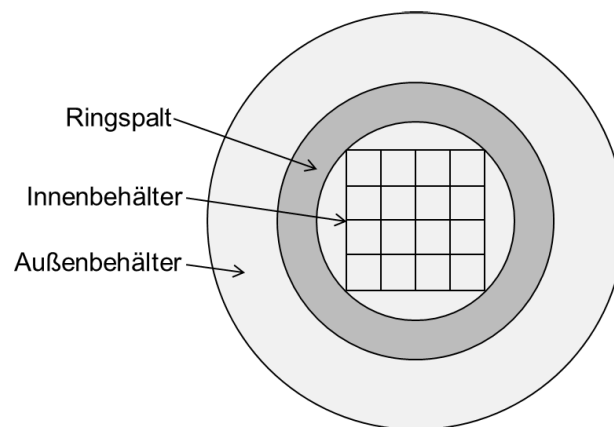


Bild 1: Schematische Darstellung des gasgefüllten Ringspalt in einem T/L-Behälter

In Fluiden treten mit Konvektion und Wärmestrahlung zwei weitere Wärmetransportmechanismen auf, die in Feststoffen, in denen Wärme ausschließlich mittels Wärmeleitung transportiert wird, nicht existieren. Da die Abmaße eines solchen Spalt im Vergleich zu den übrigen Behälterabmessungen zudem außerordentlich klein sind, wäre eine ausführliche Bewertung des thermischen Behälterverhaltens, beispielsweise mittels Strömungssi-

mulationen oder umfangreichen FE-Analysen, die auch derartige gasgefüllte Spalte berücksichtigen würden, hinsichtlich Modellierungs- und Berechnungsdauer sehr aufwändig, da eine sehr feine Vernetzung des Spaltes nötig wäre, um eine ausreichende Ergebnisgüte zu erzielen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts des Lehrstuhls für Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth in Zusammenarbeit mit dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat der Schweiz (ENSI) wurde ein Berechnungswerkzeug auf Basis der Finite Elemente Analyse entwickelt, das in der Lage ist, eine schnelle Bewertung des thermischen Verhaltens von T/L-Behältern durchzuführen.

Die besondere Innovation ist die Abbildung der thermischen Effekte des gasgefüllten Ringspaltes, der in Bild 1 stark überskaliert abgebildet ist, ohne diesen zu vernetzen. Dazu wurde eine spezielle Randbedingung geschaffen, die als thermische Spaltbedingung (TSB) bezeichnet wird, und auf Basis von analytischen Gleichungen die Wärmeübertragungsvorgänge des gasgefüllten Ringspaltes zusammenfasst. Als Grundlage für den Einbau der TSB dient das FE-Programm *Z88* [2], weswegen das Berechnungstool als *Z88ENSI* bezeichnet wird. Die korrekte Funktionsweise der thermischen Spaltbedingung wird mittels Prüfstandversuchen verifiziert und in diesem Beitrag vorgestellt.

2 Entwicklung des Berechnungsprogramms *Z88ENSI*

2.1 Simulation von stehenden T/L-Behältern

Im Fall von stehenden T/L-Behältern wird davon ausgegangen, dass ein konzentrischer Ringspalt zwischen Innen- und Außenteil des Behälters existiert, wie Bild 1 veranschaulicht. Ist dies der Fall, können analytische Gleichungen genutzt werden, um die thermischen Vorgänge im Ringspalt zu beschreiben. Dabei wurde Wärmestrahlung im Rahmen des Projektes aufgrund eines geringen Einflusses sowie einer erhöhten Berechnungsdauer ausgeschlossen. In Abhängigkeit der jeweils herrschenden geometrischen und thermodynamischen Parameter können zwei verschiedene thermische Spaltbedingungen (siehe Kapitel 2.2) automatisiert im entwickelten Berechnungsprogramm verwendet werden. Den grundsätzlichen Ablauf des Programms *Z88ENSI* zeigt Bild 2.

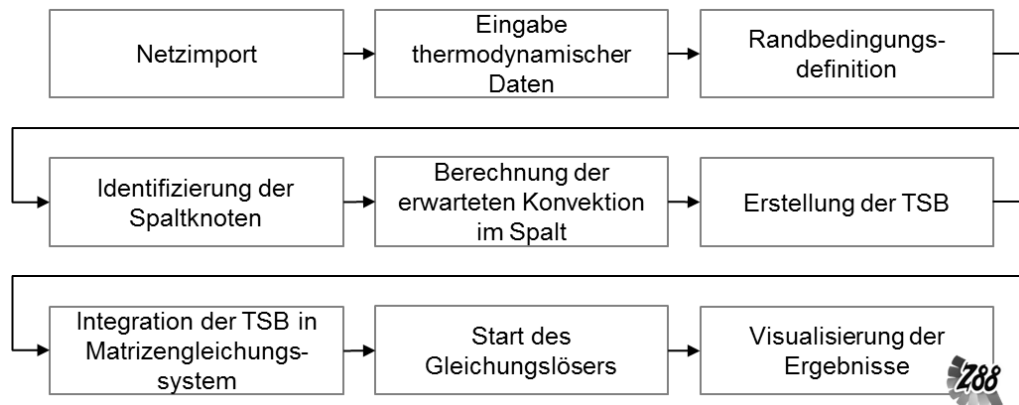


Bild 2: Programmablauf des entwickelten Berechnungstools *Z88ENSI*

Nachdem ein vernetzter Behälter sowie die nötigen thermodynamischen Daten importiert wurden, werden die FE-Randbedingungen, wie Wärmeströme und fixierte Temperaturen, definiert. Die thermodynamischen Inputparameter werden benötigt, um in einem späteren Schritt die Nusseltzahl im Spalt zu berechnen, die dazu dient zu beurteilen, ob Konvektion auftritt. Grundsätzlich wird der Fall betrachtet, dass Nachzerfallswärme im Inneren des Behälters aufgrund der eingelagerten Brennelemente entsteht, die an die Umgebung abgeführt werden soll. Somit entsteht ein Wärmefluss vom Behälterinneren nach außen. Im nächsten Schritt muss der Spalt zwischen Innen- und Außenbehälter innerhalb des Berechnungstools identifiziert werden, das heißt das Programm muss erkennen, wo sich der Spalt befindet. Dabei werden diejenigen Knoten identifiziert, die direkt an Innen- und Außenseite des Spaltes liegen. In Abhängigkeit der geometrischen und thermodynamischen Verhältnisse im Ringspalt kann im Weiteren überschlägig berechnet werden, welchen Beitrag Konvektion an der Gesamtwärmeübertragung im Spalt leistet. Auf Basis dieser analytischen Berechnungen wird eine thermische Spaltbedingung aufgestellt, die reine Wärmeleitung im Ringspalt oder Wärmeleitung und Konvektion gekoppelt betrachtet. Eine ausführliche Beschreibung der TSB folgt in Kapitel 2.2. Ist das Gleichungssystem aufgestellt, wird der direkte Gleichungslöser *Pardiso* [3] genutzt, um den Lösungsvektor – in diesem Fall den Vektor der Knotentemperaturen – zu berechnen. Die Ergebnisse, wie etwa die Temperaturverteilung innerhalb eines T/L-Behälters oder der Wärmefluss, können mittels der grafischen Benutzeroberfläche von *Z88Aurora* [2] visualisiert werden.

2.2 Thermische Spaltbedingung

Im entwickelten Berechnungsprogramm *Z88ENSI* wird die jeweils geeignete thermische Spaltbedingung vollautomatisch auf Basis der vorliegenden Parameter des Ringspaltes

zwischen Innen- und Außenbehälter eingebaut. Eine TSB wird immer zwischen einem Knotenpaar definiert, bestehend aus je einem am Spaltrand liegenden FE-Knoten des Innen- und Außenbehälters (blaue und rote Knoten), wie Bild 3 zeigt. Dabei ist der Spalt nicht mit finiten Elementen bestückt. Innen- und Außenbehälter hingegen liegen als vernetztes FE-Modell vor.

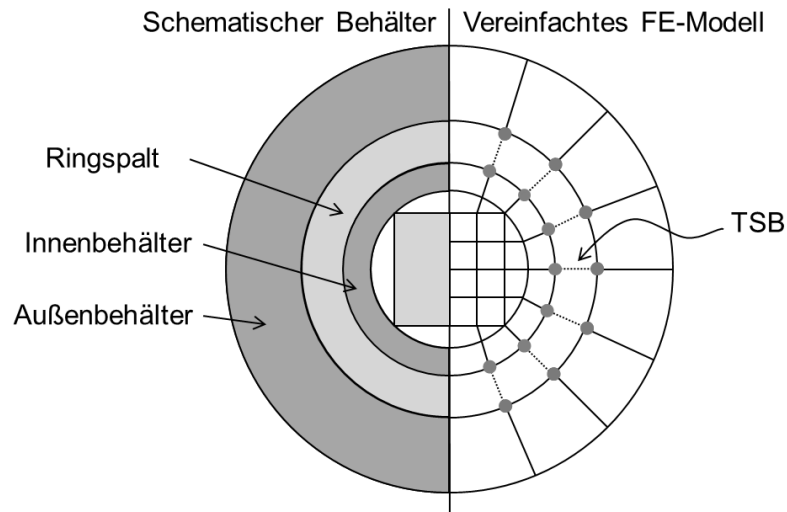


Bild 3: Einbau der thermischen Spaltbedingung zwischen Knoten des Innen- (blau) und Außenbehälters (rot)

Grundlegend stehen zwei TSB zur Verfügung: die erste TSB berücksichtigt Wärmeleitung als einzigen Wärmeübertragungsmechanismus im Spalt, wohingegen die zweite mögliche TSB Leitung und Konvektion in das Gleichungssystem einbauen kann. Beide TSB beruhen auf analytischen Gleichungen. Gleichung (1) zeigt den Zusammenhang für reine Wärmeleitung nach [1]:

$$T_{AB} = T_{IB} - \frac{\dot{Q}}{2\pi l \lambda_{He}} \ln \frac{r_{AB}}{r_{IB}} \quad (1)$$

Die Indizes AB und IB in Gleichung (1) implizieren den Bezug auf Außen- bzw. Innenbehälter. Dies bedeutet, dass die Temperatur des Außenbehälters T_{AB} aus der Temperatur des Innenbehälters T_{IB} subtrahiert um den Temperaturabfall aufgrund der Wärmeleitung im Ringspalt berechnet wird. Hierbei symbolisiert \dot{Q} die über den Ringspalt transportierte Wärmemenge, l die Spaltbreite, λ_{He} die Wärmeleitfähigkeit des Fluids (hier: Helium) und $r_{IB/AB}$ die Radien von Innen- bzw. Außenbehälter. Somit beruht diese TSB auf dem analytischen Zusammenhang für Wärmeleitung durch zylindrische Schichten [1].

Für den Fall, dass Konvektion ebenfalls zum Wärmetransport im Ringspalt beiträgt, wird die TSB aus Gleichung (1) modifiziert, indem die Wärmeleitfähigkeit des Fluids λ_{He} um den Faktor der Nusseltzahl Nu entsprechend Gleichung (2) vergrößert wird [1]:

$$\lambda_{WL,K} = Nu \cdot \lambda_{He} \quad (2)$$

Somit ergibt sich eine neue Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{WL,K}$, die die Einflüsse von Wärmeleitung und Konvektion im Spalt berücksichtigt (Index WL,K : Wärmeleitung und Konvektion). Diese wird wiederum in Gleichung (1) eingesetzt, wodurch sich eine modifizierte TSB ergibt. Diese analytische Methode erlaubt es, die Einflüsse von Konduktion und Konvektion gemeinsam zu berücksichtigen [1].

Ist eine TSB definiert, muss diese in das Matrizengleichungssystem der FEA eingebaut werden. Hierfür wird die Lagrange-Multiplikator Methode verwendet, die in [4, 5] näher erläutert wird.

3 Verifizierung der TSB

Die korrekte Funktionsweise der entwickelten thermischen Spaltbedingung sowie des gesamten Berechnungsprogramms wurde mittels Prüfstandversuchen verifiziert. Um Prüfstandversuche durchführen zu können, wurde ein in den Abmaßen deutlich verkleinerter sowie vereinfachter Behälternachbau entwickelt. So wurde die reale Behälterhöhe von über vier Metern auf 0,4 Meter verringert. Um die konvektiven Strömungsprozesse nicht zu beeinflussen, wurde die Spaltgeometrie beibehalten. Die Spaltbreite des Versuchsstand beträgt 10 mm. Der Prüfstandbehälter ist in Bild 4 dargestellt.

Dieser ist mit umfangreicher Sensorik versehen, die die Temperatur sowie den Druck im Inneren erfassen kann (siehe Bild 4, links). Der Innenbehälter wird elektrisch beheizt, wobei die Temperatur bzw. die Wärmeleistung regelbar ist. Dadurch stellt sich ein Wärmefluss von innen nach außen ein, der über den Ringspalt transportiert werden muss (siehe Bild 4, Mitte). Der gesamte Aufbau ist – entsprechend der Realität – mit Helium befüllt. Um sicherzustellen, dass keine Luft eindringen kann, wird der Behälter während der Versuche mit einem geringfügigen Überdruck gefüllt.

Zur Verifizierung der TSB wurde der Prüfstandsaufbau in ein FE-Modell überführt und mithilfe des neu entwickelten Simulationsprogramms *Z88ENSI* berechnet. Dabei wird der Prüfstand und die durchgeführten Messungen vereinfacht in der FE-Simulation abgebildet.

So wird beispielsweise Wärmestrahlung nicht innerhalb der TSB berücksichtigt. Weiterhin wurde in der Finite Elemente Analyse kein Deckel- und Bodensystem modelliert, wodurch Wärmeströme, die den Behälter über diese Flächen verlassen, nicht in der Simulation abgedeckt werden. Ein Ausschnitt eines beispielhaften Simulationsergebnisses ist in Bild 4, rechts, zu sehen.

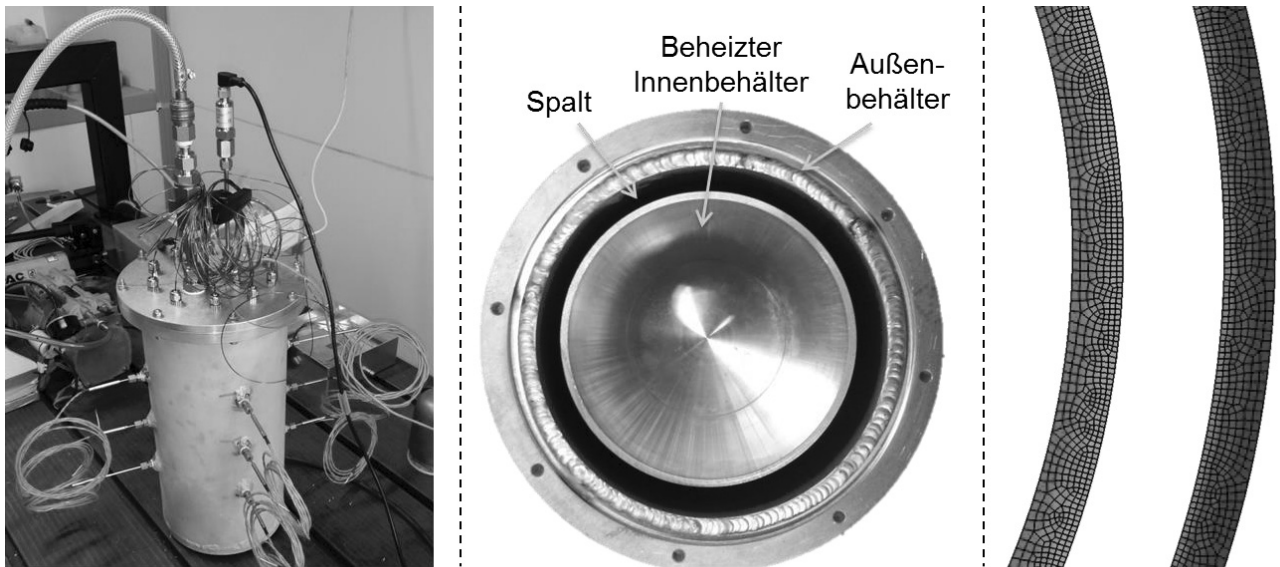


Bild 4: Bild des Versuchsbehälters (links), Bild des geöffneten Behälters (Mitte) und Ausschnitt einer beispielhaften Temperaturverteilung der FE-Simulation (rechts)

Im Zuge der hier gezeigten Verifizierung wurden drei Versuche bei unterschiedlichen Temperaturniveaus durchgeführt und diese mit der Simulation verglichen. Da der Spalt in der Simulation nicht vernetzt wird, liegen im Spalt keine Temperaturergebnisse vor, weswegen der Temperaturverlauf über die Spaltbreite nicht zur Verifizierung genutzt werden kann. Daher wird die Temperatur jeweils an der Innen- und Außenseite des Spaltes gemessen. Die identischen Positionen werden auch in der FE-Simulation ausgewertet. Tabelle 1 stellt jeweils die Temperatur von Simulation und Experiment an Innen- und Außenseite des Spaltes für drei verschiedene Temperaturniveaus gegenüber. Die genannten relativen Abweichungen beziehen sich auf die Unterschiede zwischen Experiment und Simulation.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Simulations- und Messergebnisse

	Innenseite Spalt	Außenseite Spalt
$T_{\text{Sim}} [^{\circ}\text{C}]$	201,2	171,7
$T_{\text{Exp}} [^{\circ}\text{C}]$	199,0	161,5
Rel. Abweichung [%]	1,1	6,3
$T_{\text{Sim}} [^{\circ}\text{C}]$	148,9	119,4
$T_{\text{Exp}} [^{\circ}\text{C}]$	148,1	118,4
Rel. Abweichung [%]	0,5	0,8
$T_{\text{Sim}} [^{\circ}\text{C}]$	104,9	75,4
$T_{\text{Exp}} [^{\circ}\text{C}]$	100,7	81,7
Rel. Abweichung [%]	4,2	-7,7

Alle Temperaturergebnisse der Versuche sind mit dem Index *Exp* in Tabelle 1 gekennzeichnet, die der Simulation mit *Sim*. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen zwischen -7,7 und +6,3 % variieren und nicht konstant über verschiedene Temperaturniveaus bleiben. Bei Temperaturniveau 2 treten sowohl an der inneren als auch der äußeren Spaltseite äußerst geringe Abweichungen auf, wohingegen Temperaturniveau 1 und 3 höhere relative Abweichungen aufweisen. Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen, sowohl in Bezug auf die TSB als auch bezüglich. des FE-Modells, werden die Abweichungen als akzeptabel eingestuft.

4 Fazit

Durch den Einsatz einer TSB können die thermischen Auswirkungen eines zylindrischen Spaltes innerhalb einer FEA berücksichtigt werden, ohne diesen zu vernetzen. Dadurch wird die Simulationsdauer im Vergleich zu herkömmlichen Simulationen signifikant reduziert, was ausdrückliches Ziel des Forschungsprojekts ist. Es konnte gezeigt werden, dass die TSB die Wärmeübertragungsvorgänge ausreichend gut abbilden kann. Soll ein möglichst exaktes, quantitatives Ergebnis ermittelt werden, ist der Einsatz einer TSB unter Umständen nicht geeignet. Soll jedoch in kurzer Zeit die Auswirkung von bestimmten Parametern untersucht werden, ist es zweckmäßig, die Modellierung zu vereinfachen und die Berechnungsdauer zu verkürzen, indem eine TSB verwendet wird.

Zukünftig soll *Z88ENSI* derartig erweitert werden, dass auch nicht-konzentrische Spaltgeometrien mithilfe neuer thermischer Spaltbedingungen berechnet werden können.

Literatur

- [1] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [2] 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.
- [3] Intel Math Kernel Library 11.2 (Reference Manuel), 2014.
- [4] Dinkel, Christian; Goller, Daniel; Glenk, Christian; Rieg, Frank: Informationsübertragung zwischen Knoten in der Finite-Elemente-Analyse am Beispiel der Wärmeübertragung. 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Rostock: 2016.
- [5] Wriggers, Peter: Computational Contact Mechanics. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006.

Analyse und Bewertung von Simulationswerkzeugen für generativ gefertigte Bauteile

Philipp Sembdner, Moritz Nögel, Dirk Hofmann, Christine Schöne, Ralph Stelzer

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen

Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD (KTC)

George-Bähr-Str. 3c, 01062 Dresden

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

Internet: <http://www.tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm/ktc>

Inhalt: Im vorliegenden Beitrag werden die Simulationswerkzeuge Additive Works Amphyon, Simufact additive, 3DSIM exasim und Geonx Virfac Additive Manufacturing vorgestellt, verglichen und bewertet. Dafür werden spezifische Bewertungskriterien aufgestellt. Ferner werden besondere Funktionen einzelner Simulationsprogramme aufgezeigt sowie die derzeit bestehenden Defizite erörtert.

Abstract: In this paper the simulation tools Additive Works Amphyon, Simufact additive, 3DSIM exasim und Geonx Virfac Additive Manufacturing are presented, compared and evaluated. For that specific criteria were defined. Furthermore, special functions of the simulation programs are presented and the current deficits are discussed.

Stichwörter: Generative Fertigung, Prozesssimulation, Inherent strain Methode, Fertigungsanalyse

Keywords: Additive manufacturing, process simulation, inherent strain method, manufacturing analysis

1 Einleitung

Durch die fortschreitende Entwicklung der generativen Fertigung ist es im zunehmenden Maße möglich, metallische Bauteile mit Freiformgeometrie oder filigranen Leichtbau-Gitterstrukturen in kleiner Stückzahl herzustellen. Trotz der hohen Konstruktionsfreiheit hat diese Technologie Grenzen, die u. a. in fehlenden Konstruktionsmethoden [1], der Fertigungsvorbereitung oder im Fertigungsprozess [2] liegen. Die Fertigung ist durch instationäre Effekte geprägt, welche das resultierende Temperaturfeld stark beeinflussen [3]. Durch die Abkühlvorgänge werden thermische Eigenspannungen in das Bauteil induziert, was zu einem Verzug im Bauteil führt. Im ungünstigsten Fall ist der Verzug so groß, dass die festgelegten Toleranzen überschritten werden und das Bauteil mit angepassten Parametern (Geometrie, Fertigung) erneut hergestellt werden muss. Durch das Einbinden einer vorgelagerten Fertigungssimulation (auch Verzugs- oder Prozesssimulation genannt) in die Prozesskette der generativen Bauteilfertigung können mögliche Defekte vorher erkannt

werden. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Vergleich und der Bewertung von Simulationsprogrammen für die additive Fertigung.

2 Physikalische Grundlagen

Für die Verzugssimulation der generativen Fertigung sind in der praktischen Anwendung zwei mögliche Ansätze bekannt (Bild 1). Ein Ansatz ist die Multi-Skalen-Simulation. Diese besteht aus drei separaten Berechnungen. Im ersten Modell wird die Wärmequelle simuliert. Hier wird der effektive Absorptionskoeffizient des Materials bestimmt. Mit dieser Information wird im Zweiten, dem Hatching-Modell, ein Quader (Größe z. B.: Länge: 1mm, Breite: 1mm, Höhe: 3 Schichten) als repräsentatives Volumenelement thermo-mechanisch simuliert. Das Ziel ist die Berechnung der Summe aus thermischer und plastischer Dehnung. Diese wird als inherent strains (dt.: bleibende Dehnungen) bezeichnet. Das Schichtmodell (drittes Modell) ist eine rein mechanische Simulation. Die Grundlage dafür ist ein vernetztes Modell mit Hexagonal-Elementen. Das Bauteil wird schichtweise aufgebaut und die inherent strains werden als mechanische Last in jedes Element eingebracht. Dabei wird die Dehnungsverteilung in die unteren Schichten abgeleitet. Ist das Bauteil vollständig aufgebaut stellt sich der Gesamtverzug ein. [2]

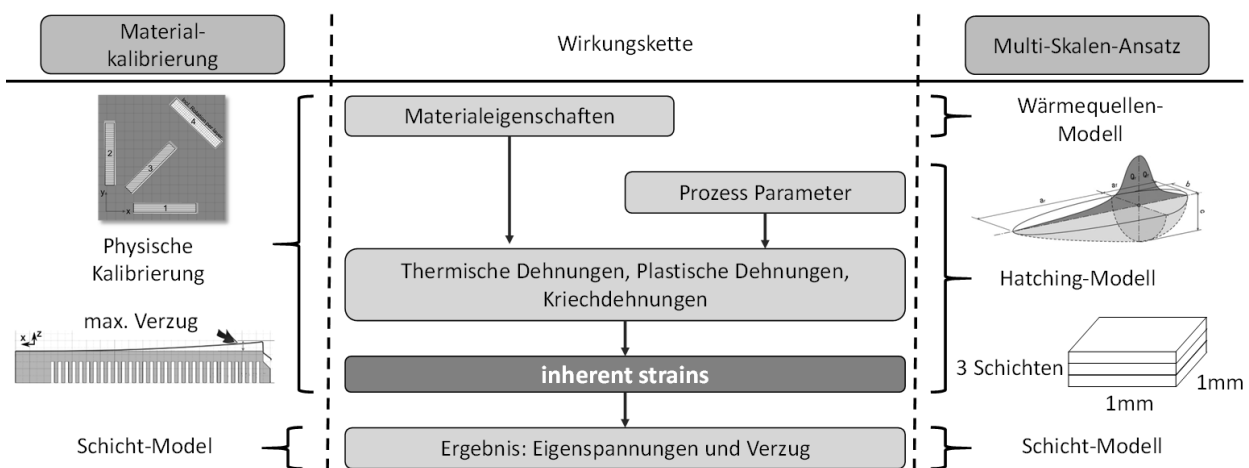


Bild 1: Wirkungskette von Eigenspannungen und Verzug mit verschiedenen Simulationsansätzen nach [2, 5, 17]

Der zweite Simulationsansatz ist die Materialkalibrierung. Dafür wird eine Kalibrierungsgeometrie physisch gefertigt und im Anschluss der maximale Verzug in z-Richtung gemessen. Als Geometrie haben sich sogenannte Cantilever (Bild 1 links) etabliert. Aus diesem Verzug werden die inherent strains ermittelt. Anschließend wird das Schichtmodell berechnet. Diese Berechnung ist äquivalent zum Multi-Skalen-Ansatz.

3 Prozesskette mit integrierter Verzugsimulation

In Bild 2 wird die Prozesskette der additiven Fertigung mit integrierter Fertigungssimulation dargestellt. Zu Beginn des Prozesses wird ein Konstruktionsmodell erstellt. Anschließend wird das Bauteil im Pre-Prozess [8] innerhalb der computergestützten Arbeitsplanung (CAP) für die Simulation vorbereitet. Dieser Bearbeitungsschritt erfolgt zumeist in separaten Softwarewerkzeugen wie z. B. Materialise Magics. Der Pre-Prozess beinhaltet folgende Kernpunkte:

- Netzbearbeitung (Verfeinerung, Reparatur etc.)
- Orientierung und Positionierung des Bauteils im Bauraum
- Generierung von Stützstruktur (Support)

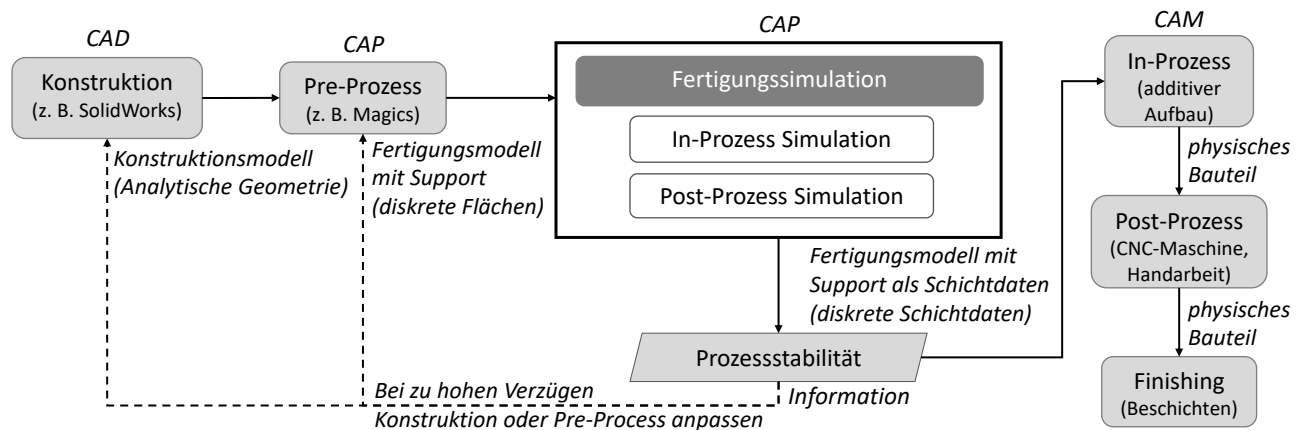


Bild 2: Prozesskette mit integrierter Fertigungssimulation

In der Fertigungssimulation wird der generative Aufbau des Modells simuliert (In-Prozess Simulation). Dazu wird das vorbereitete Modell aus dem Pre-Prozess mit der Stützgeometrie in Form diskreter Daten (z. B. im STL-Dateiformat) importiert. Daraufhin wird das Material bestimmt und das Modell für die Simulation vernetzt. Das Ergebnis der In-Prozess Simulation sind die Eigenspannungen und der Verzug nach dem schichtweisen Aufbau. Der Post-Prozess simuliert das Entfernen des Bauteils von der Bauplattform und des Supports und somit die Relaxation der Eigenspannungen. Des Weiteren kann der Einfluss einer Wärmebehandlung (z. B. Spannungsarmglühen) simuliert werden.

Im Anschluss an die Fertigungssimulation erfolgt die Auswertung der Ergebnisdaten, wobei die Stabilität des Fertigungsprozesses beurteilt wird. Sollte hierbei eine Ergebnisgröße implizieren, dass z. B. ein Riss entsteht oder der Verzug zu hoch ist, muss diese Information für das Anpassen des Konstruktionsmodells oder des Pre-Prozesses (z. B. Änderung der Supportstruktur) verwendet werden. Auf diese Weise ist eine Fertigung nach dem

„First Time Right“-Prinzip möglich und das Fertigen von fehlerbehafteten Ausschussteilen wird reduziert.

4 Bewertung ausgewählter Simulationswerkzeuge

Die Basis der Untersuchungen bilden vier Simulationswerkzeuge. Das erste Programm ist Amphyon (Version 1.3) der Firma Additive Works GmbH [9]. Die Wurzeln dieses Programms liegen im Forschungsprojekt InSiGen [10] der Universität Bremen. Die Betaversion erschien im April 2016, das Release erfolgte im Oktober 2016. Der verwendete Solver ist von Additive Works selbst entwickelt worden.

Das zweite Programm ist Simufact Additive (Version 1.0) [11]. Die Simufact Engineering GmbH („**Simulating Manu**facturing“) ist ein deutsches Unternehmen, das 2015 von der MSC Software Corporation übernommen wurde. Die Kernkompetenz lag zu Beginn im Bereich der Simulation von Umformprozessen. Um die Produktpalette zu erweitern, wurde eine Software für die Schweißsimulation entwickelt. Hieraus ist Simufact Additive zur Simulation von metallbasierten, additiven Fertigungsverfahren entstanden. Grundlage ist der Marc-Solver von MSC Software. Dieser wurde speziell für nichtlineare FEM Berechnungen entwickelt.

Das dritte Simulationswerkzeug ist 3DSIM von ExaSIM [12]. Dieses ist aus einem Forschungsprojekt der University of Louisville entstanden und verwendet einen cloud-basierten Ansatz. Die zu simulierenden Modelle werden dazu auf einen Server hochgeladen und anschließend berechnet. Die Ergebnisse können dann heruntergeladen und mithilfe eines externen Viewers (z. B. ParaView) betrachtet werden. Dieses Werkzeug stand zum Untersuchungszeitpunkt nur als Beta-Version zur Verfügung.

Das letzte Programm ist Virfac von GeonX [13]. Die Firma GeonX wurde 2012 als Start-Up mit dem Ziel gegründet, Simulationswerkzeuge für Fertigungstechniker zu entwickeln. Aus dieser Idee ist Virfac („**Virtual F**actory“) entstanden. Virfac basiert auf einem Parasolid-Kern von Siemens PLM. Für die Berechnungen wird der FE-Solver Morfeo verwendet [14]. Zu Beginn lag der Schwerpunkt von GeonX auf der Simulation von Schweißprozessen. Aus dieser Entwicklung ist das Additive Manufacturing Tool entstanden. In diesem Beitrag wurde die Version 1.4.0 getestet.

4.1 Anforderungen an die Simulationsprogramme und Analyse

In Tabelle 1 wird ein Auszug der ermittelten Anforderungen an die Simulationsprogramme gezeigt, welche sich aus dem Stand der Technik ergeben. [2, 3, 6, 7, 8, 16]

Tabelle 1: Anforderungen an die Simulationswerkzeuge

Art	ID	Priorität	Beschreibung	Amphyon	Simufact	exaSIM	Virfac
	1.1	A	Verfahren: Selektives Laserschmelzen (SLM)	✓	✓	✓	✓
	1.2	B	Verfahren: Elektronenstrahlschmelzen (EBM)				
	2.1	C	Import von Datenformaten mit kontinuierlicher Geometriebeschreibung (z. B. *.stp)				✓
	2.2	A	Import von Datenformaten mit diskreter Geometriebeschreibung (z. B. *.stl)	✓	✓	✓	○
	2.3	A	Export von Datenformaten für die Fertigung mit diskreter Geometriebeschreibung (*.stl, *.cli etc.)	✓	✓	✓	
	2.4	C	Export von ParaView Daten (*.vtu, *.vtk)			✓	✓
	2.5	B	Export der verformten Struktur (Pre-Deformed)	✓	✓	✓	
	2.6	A	Import von Stützstruktur	✓	✓		○
	2.7	B	Programmierschnittstelle API vorhanden				
	2.8	A	Export von Simulationsergebnissen (z. B.: *.txt)	✓	✓		
	3.1	A	Vernetzen der Struktur	✓	✓	✓	✓
	3.2	A	Einstellen der Netzgröße	✓	✓	✓	✓
	3.3	B	Erstellen von Stützstruktur	○	✓	✓	
	3.4	A	Materialdatenbank erweiterbar oder editierbar	✓	✓	✓	✓
	4.1	A	Bauteilorientierung einstellbar	✓	✓		✓
	4.2	A	Einstellen von Baukammerabmaß und -geometrie	✓	✓	✓	
	5.1	B	Wärmequellen-Modell		○	○	○
	5.2	B	Hatching-Modell		○	○	○
	5.3	A	Materialkalibrierung	✓	✓	✓	✓
	6.1	A	Trennen des Bauteils von der Plattform	✓	✓	✓	✓
	6.2	B	Wärmebehandlung des Bauteils	○	✓		
	6.3	A	Entfernen der Stützstruktur	✓	✓		
	7.1	A	Eigenspannungen im Bauteil (graph. Darstellung)	✓	✓	✓	✓
	7.2	A	Verzug des Bauteils (graph. Darstellung)	✓	✓	✓	✓
	7.3	B	Optimierte Stützstruktur (Geometriemodell)	○		✓	
	7.4	B	Optimierter Scanvektor (Fertigungsdaten)	○			
	7.5	B	Optimierte Prozessparameter (Fertigungsdaten)	○			
	7.6	A	Pre-Deformed Modell (Geometriemodell)	✓	✓		
	7.7	B	Optimierung der Orientierung (Geometriemodell)	✓			

Die Anforderungen wurden gewichtet. Eine A-Priorität ist eine wesentliche Forderung bei der Anwendung eines Simulationsprogramms. Anforderungen der Kategorie B sind Wünsche mit hohem Gewicht, die den Simulationsprozess wesentlich unterstützen. Dazu zählt z. B. die verwertbare Bereitstellung von Simulationsergebnissen. Eine C-Priorität beinhaltet hilfreiche Zusatzfunktionen.

Ein Haken bedeutet, dass diese Anforderung bereits umgesetzt wurde und ein Kreis, dass es in den nächsten Versionen umgesetzt werden soll.

4.2 Bewertung anhand der Anforderungen

Im Folgenden werden die Programme mit Punkten bewertet (Tabelle 2). Eine erfüllte Anforderung mit Priorität A entspricht drei Punkten, mit Priorität B zwei Punkten und mit Priorität C einem Punkt. Zusätzlich werden die Anforderungen der Ergebnisausgabe und der Schnittstelle mit dem Faktor zwei gewichtet, da es sich bei diesen zwei Arten um sehr zentrale Anforderungsbereiche handelt und diese somit von besonderer Relevanz sind.

Tabelle 2: Gewichtete Bewertung der Programme

Art	Amphyon	Simufact	exaSIM	Virfac
Grundlagen	3	3	3	3
Schnittstellen (*2)	28	28	18	8
Pre-Prozess	6	8	6	6
Geometrie	6	6	3	3
Berechnungsmethode	3	3	3	3
Nachbehandlung	6	8	3	3
Ergebnisausgabe (*2)	22	18	16	12
Gesamtpunktzahl	74	74	52	38
Platzierung	1	1	3	4

Im Ergebnis der Untersuchungsreihe teilen sich Amphyon und Simufact die erste Platzierung. Beide Programme erfüllen wichtige Anforderungen bei der Schnittstellenbetrachtung. Amphyon weist umfangreichere Funktionen bei der Ergebnisausgabe auf. Durch das Erstellen einer Stützstruktur verfügt Simufact über einen erweiterten Pre-Prozess. Außerdem bietet diese Software die Möglichkeit nach dem Aufbauprozess eine Wärmebehandlung zu simulieren.

ExaSIM belegt den dritten Rang. Es erfüllt bereits Grundanforderungen der Priorität A und bietet die Möglichkeit online zu arbeiten. Es bestehen somit keine hohen Hardwareanforderungen an einen Rechnerarbeitsplatz. Bei der durchgeführten Untersuchung funktionierte der Ansatz zufriedenstellend und die Berechnungszeiten waren im Vergleich zu den anderen Simulationsprogrammen kürzer. Ein Nachteil ist jedoch die Verwendung des Amazon Web Services (AWS) als Cloud-basierte Lösung. Im Rahmen einer Untersuchung der Uni Bochum wurden bei AWS Sicherheitslücken entdeckt, wobei auch Teile bestehender EU-Datenschutzrichtlinien nicht umgesetzt werden [4]. Allein dieser Umstand macht es vielen Unternehmen schwer, das Programm zu nutzen. Da die additive Fertigung häufig im Prototypenbau in Verbindung mit datenschutzrechtlich sensiblen Daten zum Einsatz kommt, ist der Versand dieser Daten an Dritte als kritisch zu betrachten.

Virfac ist auf Rang vier mit 38 Punkten. Dieses Programm erfüllt in vielen Bereichen noch nicht die notwendigen Grundanforderungen. Zudem berechnet Virfac die Modelle mit Dirichlet-Randbedingungen erst ab der Bauteilunterseite (Bild 3). Dies stellt eine zu starke Vereinfachung für eine Simulation der additiven Fertigung dar. Bei dickwandigen Bauteilen ist durch diesen Ansatz der Verzug zu hoch. Bei dünnwandigen Bauteilen sind die Verschiebungen zu klein, da das Bauteil durch die Randbedingungen komplett eingespannt ist und es so zu keinen Deformationen kommt, die jedoch in der Realität vorhanden wären. Demnach sind die Ergebnisse dieser Simulation für das Erkennen von Spannungsmaxima oder potentiellen Rissstellen und somit für die Erhöhung der Prozesssicherheit bis dato nicht hilfreich.

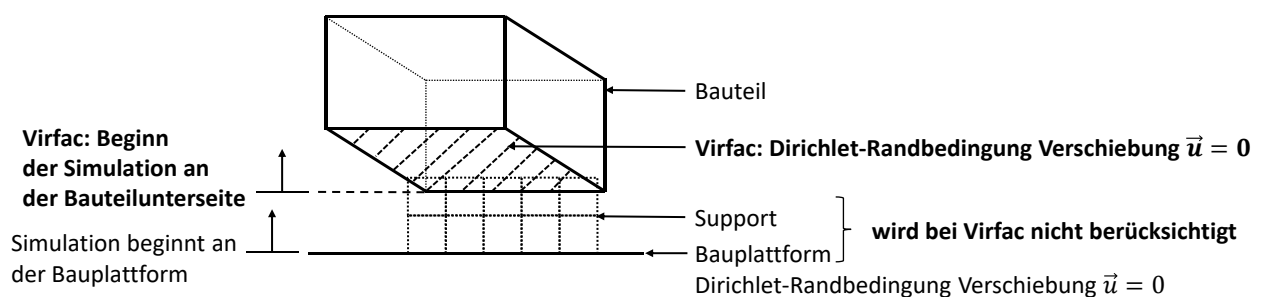


Bild 3: Unterschiede zwischen den Modellierungsansätzen

4.3 Erarbeitung umzusetzender Maßnahmen

Eine denkbare Maßnahme ist die Etablierung einer prozessübergreifenden Schnittstelle zur Informationsversorgung. Diese kann z. B. durch eine Struktur auf Basis der XML-Auszeichnungssprache oder durch Erweiterung bestehender Formatbeschreibungen (z. B. AMF – Additive Manufacturing File Format) [15] abgebildet werden. Die möglichen Ein-

und Ausgangsgrößen für diese Schnittstelle sind in Bild 4 dargestellt. Zentraler Ansatz hierbei ist die effiziente Bereitstellung der Simulationsergebnisse für andere Prozesse innerhalb der Prozesskette.

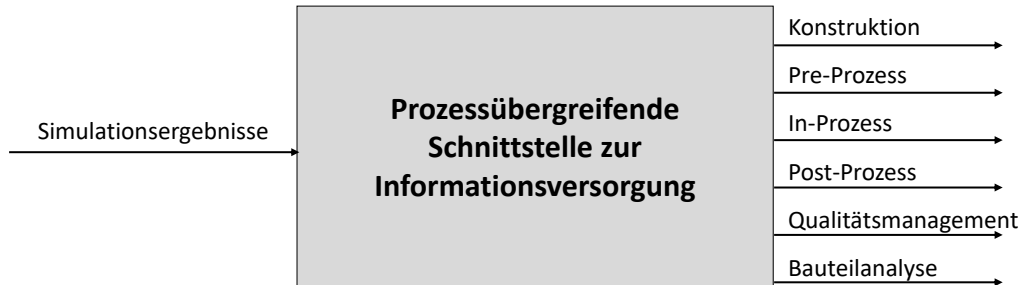


Bild 4: Prozessübergreifende Schnittstelle zur Informationsversorgung

Hinsichtlich der Änderungen am Konstruktionsmodell kann beispielsweise die lokale Anpassung von Wandstärken aus den Ergebnissen der Simulation vorgeschlagen werden. Ebenfalls möglich wäre bei massiven Bauteilen das Einfügen von Gitterstrukturen, um den thermischen Energieeintrag und somit den Verzug zu reduzieren. Ferner kann z. B. empfohlen werden, um wie viel eine Funktionsfläche aufgedickt werden muss, sodass diese Fläche auch nach der generativen Fertigung und der computergestützten Nachbearbeitung (z. B. NC-Drehen) ihre technologischen Eigenschaften erfüllen kann. Bild 5 zeigt dies exemplarisch an einem Lagerbock.

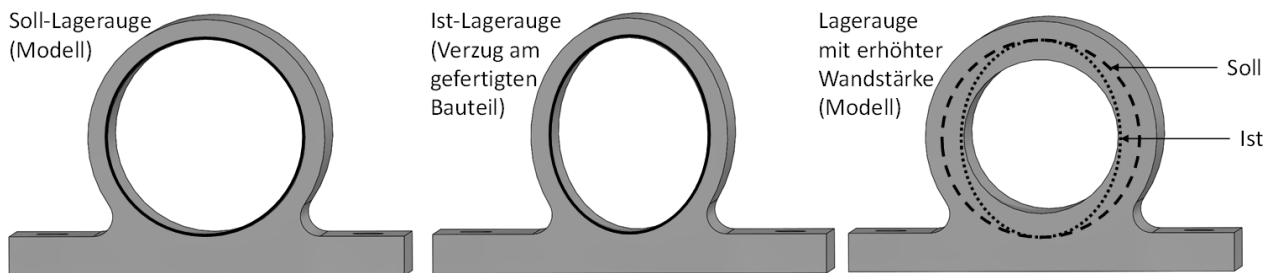


Bild 5: Beispiel zur Aufdickung von Funktionsflächen, die im Post-Prozess NC-gestützt bearbeitet werden

Für den Pre-Prozess könnten beispielsweise Verbesserungen bei Art und Platzierung von Support aus den Simulationsergebnissen vorgeschlagen werden. Jede Supportart hat verschiedene Vor- und Nachteile und ist dementsprechend nicht für jede Bauteilstruktur geeignet. Zudem kann der Support unterschiedlich platziert oder hinzugefügt werden. Durch eine geeignete Gestaltung erhöht sich damit die Prozessstabilität. In Kombination mit den Simulationsergebnissen wird dieser Schritt am digitalen Modell iterativ bis zum Erreichen eines eindeutigen Zielkriteriums durchgeführt (Bild 6).

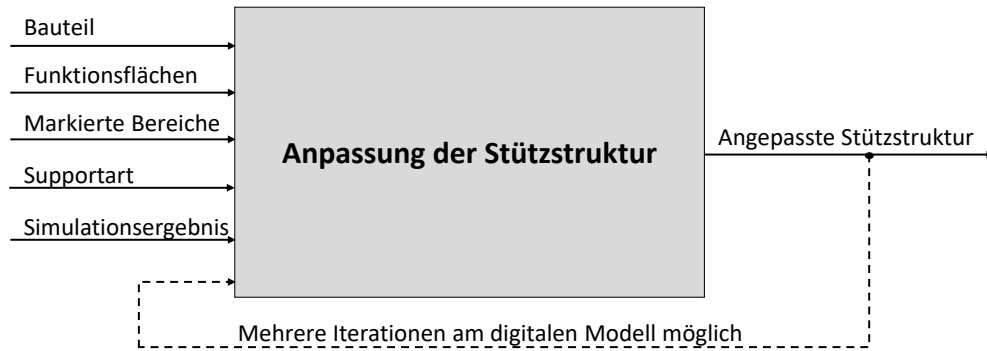


Bild 6: Ein- und Ausgangsgrößen einer Supportoptimierung

Bezüglich des Post-Prozesses ist es denkbar, fertigungsrelevante Informationen aus der Verzugssimulation (z. B. über nachzubearbeitende Funktionsflächen) der NC-gestützten Bearbeitung zuzuführen. Hinsichtlich des nachgelagerten Qualitätsmanagements könnten Empfehlungen für gezielte Qualitätskontrollen an Stellen erhöhter Rissgefahr etc. auf Basis der Simulation gegeben werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden vier Simulationssysteme miteinander verglichen und bewertet. Amphyon und Simufact erzielten beim Funktionsvergleich der Systeme die besten Ergebnisse. Dabei fielen der Schnittstellenbereich und die Ergebnisausgabe besonders positiv auf. Bei den meisten Programmen war die grafische Oberfläche übersichtlich aufgebaut und die Bedienung intuitiv. Das in ExaSIM verwendete Konzept ist vielversprechend, allerdings bestehen hierbei noch Fragen bezüglich des Datenschutzes. Virfac zeigte noch Defizite u. a. in der Bedienbarkeit, den Schnittstellen und der Ergebnisqualität.

Für eine vollständige Validierung muss im nächsten Schritt die Ergebnisgüte der einzelnen Simulationswerkzeuge untersucht werden. Unter Verwendung einheitlich definierter Material- und Prozessparameter müssen die Ergebniswerte der Programme miteinander und mit Ergebnissen aus realen Bauteiluntersuchungen verglichen und bewertet werden. Nur so ist eine gültige Aussage zur Sinnhaftigkeit und Nutzbarkeit der Simulationsergebnisse zu treffen.

Das in diesem Beitrag dargestellte Thema wurde im Rahmen des Zwanzig20 Agent-3D Basis Projektvorhabens „Rahmenbedingungen für die additiv-generative Fertigung“ bearbeitet. Die Förderung erfolgt durch das BMBF (Förderkennzeichen: 03ZZ0204B).

Literatur

- [1] M. Süß, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, D. Hofmann, C. Schöne, R. Stelzer, B. Kieback: Untersuchung zu Konstruktionsempfehlungen für kleine Strukturen beim Elektronenstrahlschmelzen; In: Proceedings of the 13 th Rapid.Tech Conference, Erfurt, 2016, S.279-289
- [2] N. Keller: Verzugsminimierung bei selektiven Laserschmelzverfahren durch Multi-Skalen-Simulation; Dissertation, Universität Bremen, 2016
- [3] T. A. Krol, M. F. Zäh, C. Seidel, J. Schilp: Simulationsbasierte Optimierung der Bauteilmaßhaltigkeit bei Strahlschmelztechnologien; In: ANSYS Conference & 30th CADFEM Users' Meeting, Kassel, 2012
- [4] T. Schreiber: Amazon Web Services Security, Seminarthesis, Ruhr Universität Bochum, 2011
- [5] P. Mehmert: Calibration – experimental background; In: Simufact Additive 1.0 Trainingsunterlagen, Hamburg, 2016
- [6] T. Töppel, B. Müller, K. P. J. Hoeren, G. Witt: Eigenspannungen und Verzug bei der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen; In: Schweißen und Schneiden 68, Heft 4, 2016, S.176-186
- [7] H. Schafstall, P. Khazan, T. Töppel, R. Kordaß: Comparison of Approaches for Structural Simulation of Additively Manufactured Metal Parts; In: Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC, Berlin, 2016
- [8] VDI Richtlinie 3405: Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen; Düsseldorf, 2014
- [9] Additive Works GmbH: Prozess- und Simulationssoftware für Additive Manufacturing; <https://additive.works/de/start>, 2016, Aufgerufen am 28.06.2017
- [10] BCCMS Universität Bremen: BCCMS: InSiGen; <https://www.bccms.uni-bremen.de/en/isemp/research/insigen/>, 2012, Aufgerufen am 28.06.2017
- [11] Simufact engineering GmbH: Softwarelösung für Additive Fertigung; <https://www.simufact.de/simufact-additive.html>, 2017, Aufgerufen am 28.06.2017
- [12] 3DSIM LLC: Additive Manufacturing Simulation; <http://3dsim.com>, 2017, Aufgerufen am 28.06.2017
- [13] GEONX S.A.: Additive Manufacturing Simulation using Virfac; <http://www.geonx.com/index-3.html>, 2017, Aufgerufen am 28.06.2017
- [14] Altair: Advanced Parallel Simulations for Manufacturing | Virfac®; <http://www.altairhyperworks.in/partner/virfac>, 2017, Aufgerufen am 28.06.2017
- [15] A. M. Martha: Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung; Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2015
- [16] C. Seidel: Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen; Dissertation, Technische Universität München, 2016
- [17] J. Katsuyama, T. Tobita, H. Itoh, K. Onizawa: Effect of Welding Conditions on Residual Stress and Stress Corrosion Cracking Behavior at Butt-Welding Joints of Stainless Steel Pipes; In: ASME Journal of Pressure Vessel Technology 134 (2): 021403-021403-9 (2012), 2012

Berücksichtigung radial aufweitender Lasten am stirnseitig befestigten Freilauf

Dipl.-Ing. Sebastian Hofmann

Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal

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

Email: hofmann@imw.tu-clausthal.de; Internet: <https://www.imw.tu-clausthal.de>

ORCID: 0000-0001-5982-9436

Inhalt: Kraftschlüssige Freiläufe bauen an den Klemmstellen im Inneren des eigentlichen Freilaufs hohe zur Funktionserfüllung notwendige Normalkräfte auf. Diese radial aufweitenden Lasten wirken im Fall der stirnseitigen Befestigung über eine Mehrschraubenverbindung auf letztere rück. Die Mechanismen, die hinter dieser Rückwirkung stehen und Möglichkeiten diese Rückwirkung auf die Belastungssituation in der ebenfalls kraftschlüssigen stirnseitigen Verschraubung abzuschätzen, werden in diesem Artikel erläutert. Es wird auf die Möglichkeiten der Abschätzung der entstehenden Zusatzlasten in der Reibfuge über ein einfaches Starrkörpermodell und über das für eine elastomechanische Näherung genutzte RITZ'sche Verfahren eingegangen.

Abstract: Out of the frictional operating principle of freewheel clutches result high normal loads at the clamping points inside the freewheel clutch. These radial widening loads react on the front mounted multi bolted joints of the clutch. Mechanisms leading to this reaction and possibilities for estimating the reaction on the frictional front mount are to be discussed in this article. Estimating the additional forces in the frictional joint is explained using a simple rigid body model and elastomechanical approximation based on the RITZ approximation method.

Stichwörter: Freilauf, stirnseitig, Befestigung, Verschraubung, radiale Aufweitung, radiale Zusatzkraft

Keywords: freewheel clutch, front mount, bolted joint, radial widening, additional radial force

1 Einleitung

Freiläufe sind richtungsabhängige selbstständig schaltende Kupplungen. Als solche finden sie in vielfältigen Bereichen Anwendung, z.B. als Schaltfreilauf, Überholkupplung oder Rücklaufsperre. In der industriellen Anwendung sind heutzutage kraftschlüssige (Radial-) Freiläufe am weitesten verbreitet. In diesen wird die Freilauffunktion dadurch realisiert, dass sich Klemmelemente (Klemmrollen oder Klemmkörper) bei Drehung in Sperrrichtung zwischen Innen- und Außenring verklemmen und somit ein Drehmoment übertragen werden kann. Eine Möglichkeit der Verbindung des Freilaufs mit der kundenspezifischen Anschlusskonstruktion stellt die stirnseitige Befestigung über eine Mehrschraubenverbindung dar. In Bild 1 ist der Kraftfluss an einem stirnseitig befestigten Freilauf schematisch darge-

stellt. Diese Art der Befestigung wird vor allem bei der Verwendung als Rücklaufsperrung häufig eingesetzt.

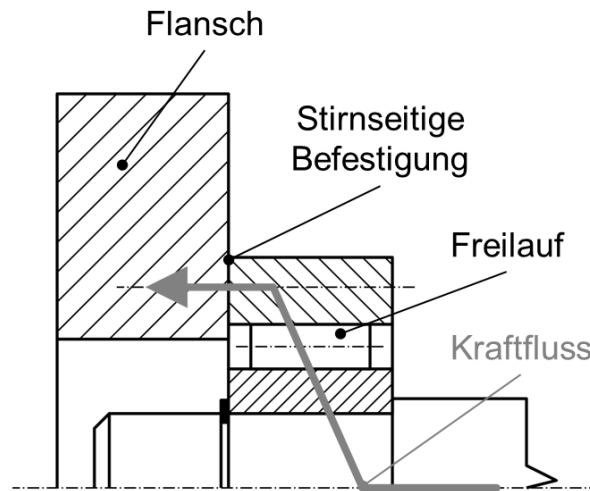


Bild 1: Stirnseitig befestigter Freilauf

Infolge des Verklemmens bei Bewegung des (kraftschlüssigen) Freilaufs in Sperrrichtung entsteht unter anderem eine hohe Normalkraft in radialer Richtung am Freilaufaußenring. Für die Schraubenverbindung ergeben sich durch die Radialkräfte an den Klemmstellen spezifische Lasten, die die kraftschlüssige Übertragbarkeit reduzieren bzw. im Betrieb sogar gänzlich aufheben können. Durch die hohen zur sicheren Funktionserfüllung des Freilaufs erforderlichen Normalkräfte F_{NK} an den Klemmstellen kann es zu einer lokalen oder auch globalen Aufhebung des Kraftschlusses in der stirnseitigen Verbindung kommen. Dies äußert sich z.B. in der Beobachtung, dass die Schrauben, nachdem sie bei der Montage in der Mitte der Durchgangsbohrung platziert wurden (siehe Bild 2 links) und die Verbindung während ihrer Betriebsdauer mit wechselnden Drehmomenten T beansprucht wurde, in einseitige Anlage geraten (siehe Bild 2 rechts).

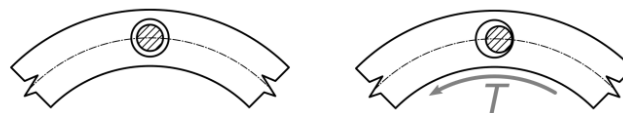


Bild 2: links: Schraube am Freilaufaußenring nach Montage

rechts: Einseitige Anlage der Schraube am Freilaufaußenring unter Drehmomentbelastung

2 Analytisches Modell

Dem theoretischen Modell liegt der in Bild 3 dargestellte Aufbau zugrunde. Der Freilaufaußenring (AR) wird im Mitnahmebetrieb an den Klemmstellen am Innendurchmesser d_{AR} durch ein Drehmoment T , hervorgerufen durch die Klemmkraft in Umfangsrichtung F_{UK}

und die sich hierbei über den Klemmwinkel α_K ergebenden Klemmnormalkräfte F_{NK} , belastet. Hierbei findet die Belastung näherungsweise durch Linienlasten statt. An den Verschraubungsstellen auf dem Lochkreis d_T wird das Drehmoment über Tangentialkräfte F_T abgestützt und in die Umgebungskonstruktion geleitet.

Die durch das zu übertragende Drehmoment T am Lochkreis r_T bzw. d_T der stirnseitigen Verschraubung hervorgerufenen Kräfte F_T stehen im Gleichgewicht mit den Klemmkräften in Umfangsrichtung F_{UK} . Der Drehmomentaufbau findet an den Klemmstellen, genauer am Innendurchmesser d_{AR} des Freilaufaußenrings, statt und somit ergibt sich aus dem Gleichgewicht der Drehmomente am Freilaufaußenring der folgende Zusammenhang:

$$F_{UK} = \frac{2 \cdot T}{d_{AR}} = F_T \cdot \frac{d_T}{d_{AR}} = F_T \cdot C_D \quad (1)$$

Hierbei gibt der Faktor C_D das Verhältnis der Kraftangriffsorte am Freilaufaußenring wieder und wird deshalb als Lochkreisverhältnis bezeichnet.

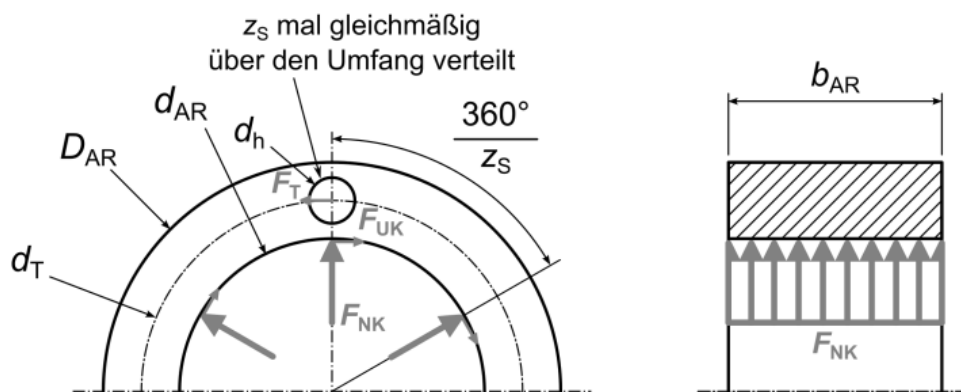


Bild 3: Freilaufaußenring mit Klemm- und Verschraubungskräften

Zwischen der Normalkraft F_{NK} und der Umfangskraft F_{UK} an der Klemmstelle gilt über den Klemmwinkel α_K der bekannte Zusammenhang und daraus folgt eine Abhängigkeit der Umfangskräfte und des Drehmoments von den Klemmnormalkräften:

$$F_{NK} = \frac{F_{UK}}{\tan(\alpha_K)} = \frac{F_T}{\tan(\alpha_K)} \cdot \frac{d_T}{d_{AR}} = \frac{T}{r_T \cdot \tan(\alpha_K)} \cdot C_D \quad (2)$$

Die freilaufspezifischen hohen Klemmnormalkräfte bewirken eine zusätzliche radiale Kraftkomponente ΔF_R in der Reibfuge der stirnseitigen Befestigung. Aus der Vorstellung des Reibkegels für die Gesamtverbindung (siehe Bild 4) ergibt sich somit der folgende Zusammenhang:

$$(\mu \cdot z_S \cdot F_{SV})^2 = \Delta F_R^2 + F_T^2 \quad (3)$$

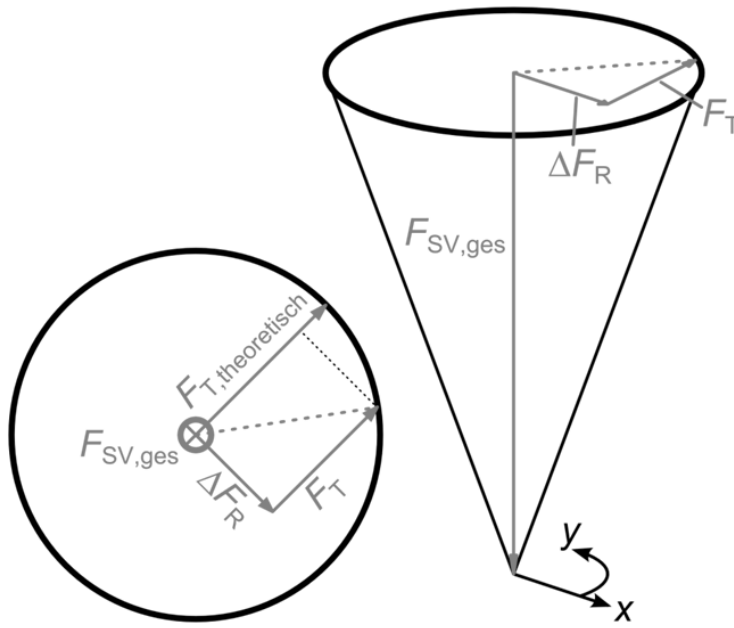


Bild 4: Reibkegel für die Gesamtverbindung

Die Übertragbarkeit bei einem reinen Drehmoment (ohne aufweitende Klemmnormalkräfte) berechnet sich aus der Anzahl z_S mit der Vorspannkraft F_{SV} montierten Schrauben auf dem Lochkreis r_T und dem Reibwert der stirnseitigen Verbindung μ zu

$$T_{theoretisch} = \mu \cdot z_S \cdot r_T \cdot F_{SV} = F_{T,theoretisch} \cdot \frac{d_T}{2} \quad (4)$$

Gegenüber der theoretischen Übertragbarkeit reduziert sich die Übertragbarkeit unter Berücksichtigung der radialen Zusatzkraft in der Reibfuge. Dies wird durch die relative Übertragbarkeit β_R beschrieben, die das Verhältnis von übertragbarem Moment T unter Berücksichtigung der freilaufspezifischen Last zu übertragbarem theoretisch reinem Torsionsmoment $T_{theoretisch}$ wiedergibt.

$$\beta_R = \frac{T}{T_{theoretisch}} \quad (5)$$

Die theoretische Übertragbarkeit β_R hängt vom Lochkreisverhältnis C_D , dem Klemmwinkel α_K und der infolge der Klemmnormalkraft F_{NK} in der Reibfuge entstehenden Zusatzkraft ΔF_R , ausgedrückt über das Kräfteverhältnis $\Delta F_R/F_{NK}$, ab.

$$\beta_R = \sqrt{\frac{1}{1 + \left[\frac{1}{\tan(\alpha_K)} \cdot C_D \cdot \frac{\Delta F_R}{F_{NK}} \right]^2}} \quad (6)$$

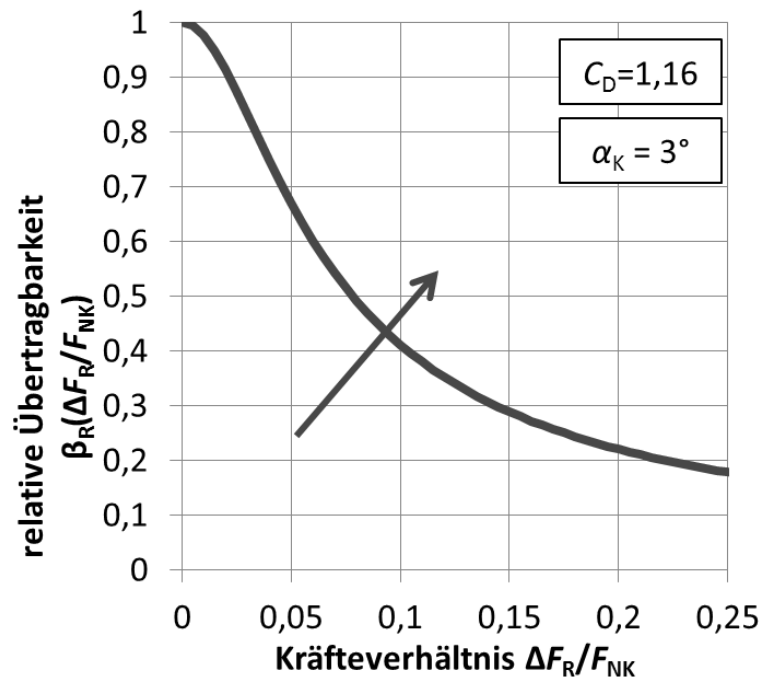


Bild 5: Relative Übertragbarkeit mit positiver Beeinflussung

Für die relative Übertragbarkeit ergibt sich somit z.B. bei einem Lochkreisverhältnis von 1,16 und einem Klemmwinkel von 3° der in Bild 5 dargestellte Verlauf. Typischerweise übersteigt das Kräfteverhältnis hierbei Werte von 0,25 nicht.

Ziel ist eine möglichst hohe relative Übertragbarkeit β_R durch geschickte Wahl der konstruktiven Parameter gemäß Gleichung (6) zu erreichen (Pfeil in Bild 5). Dies könnte zum einen durch einen großen Klemmwinkel erreicht werden, hierbei ist jedoch das Funktionskriterium des Freilaufs zu beachten. Als obere Grenze für den Klemmwinkel α_K werden in STÖLZLE [1] 6° genannt. Eine weitere Möglichkeit die Übertragungsfähigkeit zu steigern ist das Lochkreisverhältnis C_D möglichst klein zu wählen (siehe Bild 6 rechts).

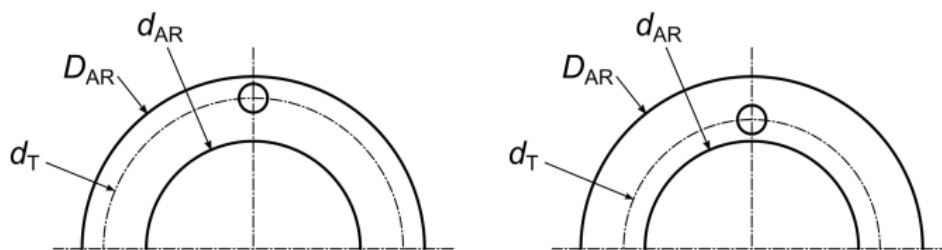


Bild 6: Lochkreisverhältnis C_D am Freilaufaußenring (links: großes C_D ; rechts: kleines C_D)

3 Abschätzung der Kräfte in der stirnseitigen Reibfuge

Als Haupteinflussgröße auf die relative Übertragbarkeit β_R ist das Kräfteverhältnis $\Delta F_R/F_{NK}$ zu sehen. Dieses kann über ein einfaches Starrkörpermodell, elastomechanische Näherungsverfahren oder FE-Simulationen abgeschätzt werden (siehe Bild 7).

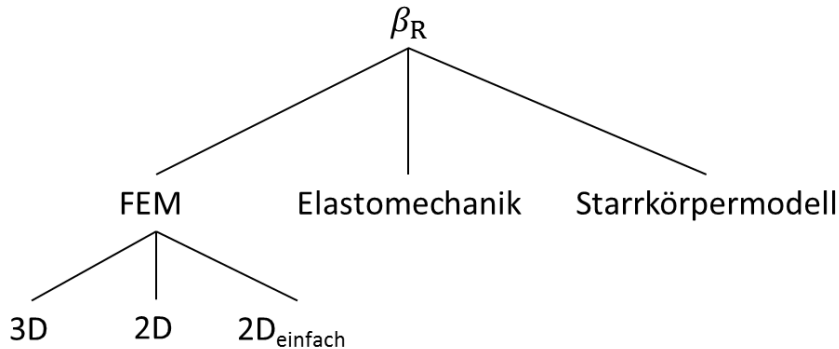


Bild 7: Mögliche Vorgehensweisen zur Abschätzung der relativen Übertragbarkeit

Dem Starrkörpermodell liegt die Vorstellung zweier parallelgeschalteter Federn zugrunde (siehe Bild 8), die von den Klemmnormalkräften radial aufgeweitet werden. Vereinfachend werden die Klemmnormalkräfte an den n_K Klemmstellen des Freilaufs zu einem über den Umfang des Innenrings konstanten Innendruck p_K zusammengefasst.

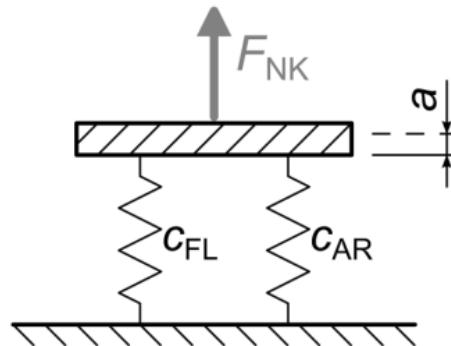


Bild 8: Parallelschaltung zweier Federn

Aus den Kräftegleichgewichten in radialer Richtung der beiden stirnseitig miteinander verbundenen Hohlzylinder (siehe Bild 9) des Flanschs mit seiner radialen Steifigkeit c_{FL} und des Freilaufaußenrings mit der radialen Steifigkeit c_{AR} ergibt sich für das Kräfteverhältnis der folgende Zusammenhang:

$$\frac{\Delta F_R}{F_{NK}} = \frac{c_{FL}}{c_{AR} + c_{FL}} \quad (7)$$

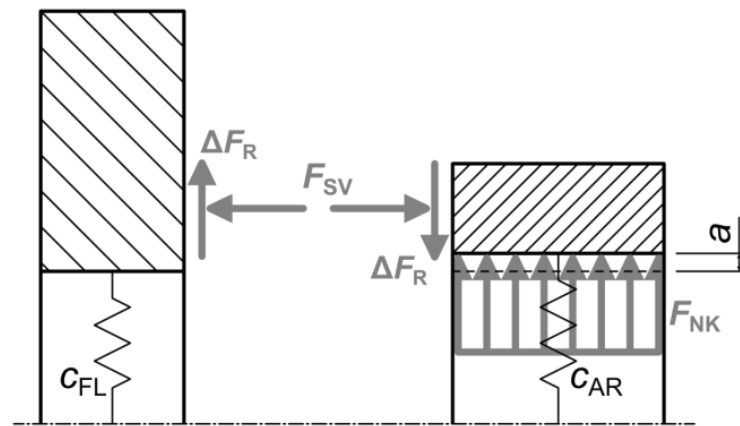


Bild 9: Freischnitt am stirnseitig befestigten Freilauf

Die Steifigkeit der beiden stirnseitig miteinander verbundenen Hohlzylinder kann nach KOLLMANN [2] berechnet werden. Hiernach gilt z.B. für die Steifigkeit des Freilaufaußenrings

$$c_{AR} = \frac{2 \cdot \pi \cdot E_{AR} \cdot b_{AR}}{\left(1 + \left(\frac{d_{AR}}{D_{AR}}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{1 - \left(\frac{d_{AR}}{D_{AR}}\right)^2}{1 + \nu_{AR}}\right)} \quad (8)$$

Grundlage für die Berechnung der Steifigkeiten nach [2] ist die Annahme eines ebenen Spannungszustandes und eines linear-elastischen Materialverhaltens. Letzteres kann für Freiläufe ohne Probleme angenommen werden, da eine plastische Verformung der Klemmelemente und Klemmflächen nicht erwünscht ist und die Systeme dementsprechend ausgelegt sind. Die Annahme eines ebenen Spannungszustandes bedeutet gleichzeitig eine Vernachlässigung von Axial- und Schubspannungen. Dies stellt eine starke Vereinfachung der real vorliegenden Spannungs- und somit auch Verformungsverhältnisse dar, welche in erster Näherung verwendet werden kann, jedoch eine Überbewertung der entstehenden Kraftkomponente nach sich zieht.

Eine genauere Möglichkeit der Abschätzung des Kräfteverhältnisses $\Delta F_R/F_{NK}$ unter Betrachtung eines dreidimensionalen Spannungszustands stellt z.B. die Nutzung des Näherungsverfahrens nach RITZ [3] dar.

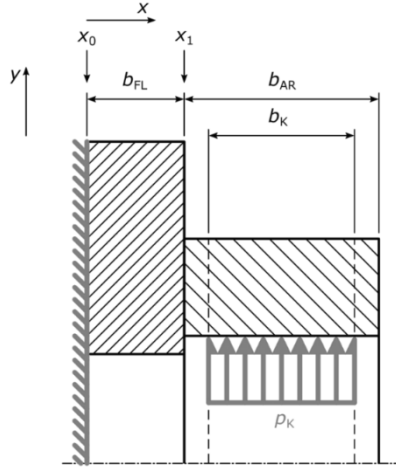


Bild 11: Vereinfachtes Freilauf-Flansch-System für die Näherung nach Ritz

In Bild 11 ist das entsprechend vereinfachte System eines stirnseitig befestigten Freilaufs dargestellt, anhand dessen mithilfe des RITZ'schen Näherungsverfahrens die radiale Zusatzkraft ΔF_R an der Stelle X_1 berechnet werden soll. Da mithilfe dieses Verfahrens auch Effekte in axialer Richtung berücksichtigt werden können, wird der eigentliche Freilaufkontakt über die Klemmbreite b_K in der Mitte des Freilaufaußenrings mit der Breite b_{AR} modelliert. Wird für die Berechnungen zum einen Rotationssymmetrie und zum anderen eine einseitig feste Einspannung an der Stelle X_0 angenommen, so lassen sich die folgenden Randbedingungen formulieren:

$$\begin{aligned} u_{FL,x}(x=0, y) &= 0 \\ u_{FL,y}(x=0, y) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Diese Randbedingungen müssen durch die gewählten Ansatzfunktionen für die Flanschverformung in axialer ($u_{FL,x}$) und radialer Richtung ($u_{FL,y}$) erfüllt werden. Werden als Ansatz allgemeine Polynomfunktionen gewählt, so erfüllen z.B. die nachfolgenden Ansatzfunktionen die Randbedingungen nach Gleichung (9).

$$\begin{aligned} u_{FL,x}(x, y) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot x^i \cdot y^j \\ u_{FL,y}(x, y) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} \cdot x^i \cdot y^j \end{aligned} \quad (10)$$

Unter der Annahme eines vollständigen Reibschlusses an der Kontaktstelle (X_1) zwischen Freilaufaußenring (AR) und Flansch (FL) gelten die folgenden Übergangsbedingungen:

$$\begin{aligned} u_{FL,x}(x=b_{FL}, y) &= u_{AR,x}(x=b_{FL}, y) \\ u_{FL,y}(x=b_{FL}, y) &= u_{AR,y}(x=b_{FL}, y) \end{aligned} \quad (11)$$

Diese werden wiederum z.B. durch die folgenden Ansatzfunktionen erfüllt:

$$\begin{aligned} u_{AR,x}(x = b_{FL}, y) &= u_{FL,x}(x = b_{FL}, y) + \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^q c_{kl} \cdot (x - b_{FL})^k \cdot y^l \\ u_{AR,y}(x = b_{FL}, y) &= u_{FL,y}(x = b_{FL}, y) + \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^q d_{kl} \cdot (x - b_{FL})^k \cdot y^l \end{aligned} \quad (12)$$

Die zu bestimmenden Koeffizienten a_{ij} , b_{ij} , c_{kl} und d_{kl} werden in einen allgemeinen Lösungsvektor \mathbf{v} eingetragen. Für die entsprechenden Verzerrungs-Matrizen \mathbf{E}_{AR} und \mathbf{E}_{FL} der beiden miteinander stirnseitig verbundenen Hohlzylinder gilt:

$$\mathbf{E}_{AR} = \mathbf{B}_{AR} \cdot \mathbf{v} \quad \text{und} \quad \mathbf{E}_{FL} = \mathbf{B}_{FL} \cdot \mathbf{v} \quad (13)$$

Mit der Elastizitätsmatrix \mathbf{C} können durch Integration über die Volumen der Einzelkörper die Steifigkeitsmatrizen \mathbf{K}_{AR} und \mathbf{K}_{FL} berechnet werden. Werden diese zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix \mathbf{K} zusammengefasst, so kann über die Kenntnis der angreifenden Kräfte (Klemmnormalkräfte F_{NK} als Innendruck p_K über die Klemmbreite b_K), ausgedrückt über den Lastvektor \mathbf{f} , das Gleichungssystem (14) nach dem Lösungsvektor \mathbf{v} aufgelöst werden.

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{v} = (\mathbf{K}_{AR} + \mathbf{K}_{FL}) \cdot \mathbf{v} = \mathbf{f} \quad (14)$$

Aus dem Lösungsvektor können anschließend über die gewählten Ansatzfunktionen (Gleichung (10) und (12)) die Verformungen und über die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen auch die Spannungsverläufe abgeschätzt werden.

Für Polynomgrade $(n, m, p, q) \geq 4$ werden hierbei im Vergleich zu entsprechenden FE-Berechnungen deutlich bessere Genauigkeiten für die radialen Zusatzkräfte (bestimmt über die an der Kontaktstelle X_1 über die Querschnittsfläche integrierten Spannungen) erreicht als über das Starrkörpermodell.

4 Zusammenfassung

Aus dem vorgestellten Starrkörpermodell lassen sich konstruktive Hinweise zur optimalen Gestaltung der stirnseitigen Verbindung ableiten. Da die Steifigkeit des Freilaufaußenrings auf die Klemmelementbelastungen rückwirkt, ist eine Anpassung dieser Größe in der Regel nicht zu empfehlen. Eine Möglichkeit ist jedoch, die Anschlusskonstruktion im Kontaktbereich der stirnseitigen Befestigung in radialer Richtung möglichst weich auszuführen (siehe z.B. Bild 12 rechts).

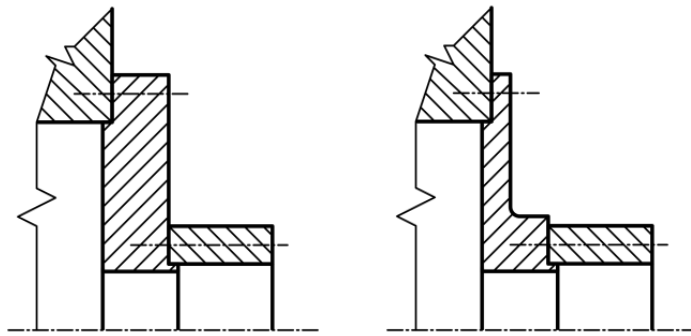


Bild 12: Optimierung der Flanschsteifigkeit (rechts: besser)

Weiterhin kann über elastomechanische Näherungsverfahren (wie z.B. das RITZ'sche Näherungsverfahren) oder die Nutzung der FEM eine gute Abschätzung der infolge der freilaufspezifischen, funktionsbedingten hohen Klemmnormalkräfte entstehenden radialen Zusatzkräfte in der stirnseitigen Reibfuge vorgenommen werden. Die Auswirkung dieser Zusatzkräfte kann anschließend in der Berechnung der stirnseitigen Schraubenverbindung berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] Stölzle, Karl; Hart, Sigwalt: Freilaufkupplungen : Berechnung und Konstruktion. Berlin, Heidelberg: Springer, 1961 (Konstruktionsbücher 19). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-51093-9>
- [2] Kollmann, Franz Gustav: Welle-Nabe-Verbindungen : Gestaltung, Auslegung, Auswahl. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1984 (Konstruktionsbücher 32) <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-61727-0>
- [3] Ritz, Walter: Über eine neue Methode zur Lösung gewisser Variationsprobleme der mathematischen Physik. In: Journal für die reine und angewandte Mathematik 135 (1909), S. 1-61.
URL <http://www.digizeitschriften.de/dms/img/?PID=GDZPPN002166739>

Danksagung

Teile dieses Artikels beruhen auf Ergebnissen, die im Zuge des von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern inhaltlich betreuten und von der Arbeitsgemeinschaft „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) finanziell geförderten Projekts „Stirnseitige Befestigung von Freiläufen“ (FVA-Nr. 704, IGF-Nr. 17841 N) entstanden sind. Der Autor möchte sich hiermit nochmals für die ihm zuteilgewordene Unterstützung bedanken.

Untersuchung der Steifigkeitsanbindung für die systembasierte Komponenteoptimierung

Daniel Billenstein, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth

Email: daniel.billenstein@uni-bayreuth.de; Internet: www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: Die Berücksichtigung von angrenzenden Bauteilen und die daraus resultierende Kontaktproblematik in der Finite Elemente Analyse (FEA) ist eine große Herausforderung für die Konditionierung des Gleichungssystems. Derartige Probleme haben auch in der Topologieoptimierung bei der Abbildung des elastischen Umfeldes und somit bei der systembasierten Komponenteoptimierung eine große Relevanz. Insbesondere wenn das Optimierungsziel die Maximierung der Steifigkeit ist, ergeben sich numerische Instabilitäten, die strengere Anforderungen an die zu wählenden Kontakteinstellungen erfordern.

Zur Vermeidung dieses Effektes können in der FE-Modellbildung Koppelbedingungen eingesetzt werden, welche ebenfalls die Freiheitsgrade mehrerer Knoten benutzerdefiniert verbinden können, jedoch ist dabei eine höhere numerische Stabilität gegeben. Diese Art der Modellierung erlaubt zudem die Anbindung von Steifigkeiten, welche auf einen oder wenige Punkte reduziert wurde, wodurch eine klassische Kontaktsimulation nicht mehr möglich ist.

Die dazu durchgeführten FE-Untersuchungen zeigen Modellierungsstrategien mit Koppelbedingungen, die deren Potential zur Anbindung von Steifigkeiten bestätigen und teils nur geringe Abweichungen zu den jeweiligen Referenzlösungen aufweisen. Allerdings treten in Kontaktnähe, wie bei einer klassischen Kontaktberechnung, unerwünschte Effekte (z. B. Einschnürungen) auf. Daraus resultierend eignen sich Koppelbedingungen vor allem bei der Anbindung reduzierter Steifigkeiten.

Abstract: Considering adjacent parts in finite element analysis (FEA) leads to a contact problem, which is a big challenge for the condition of the system of linear equations. The same problem also applies for topology optimization. In the so called system-based part optimization numerical instabilities occur, especially if the optimization target is set to stiffness maximization. In this case the product developer has to choose the contact parameters much more carefully.

To avoid this effect you can build the finite element model using couplings, which also enable the user-defined linkage of several nodes' degrees of freedom. Couplings moreover allow the connection of parts, which are reduced to one or few points, which cannot be done in a classic contact simulation.

The executed investigations on modeling strategies with couplings yield only small deviations from the particular reference solutions, which confirms their potential to connect stiffnesses. However in the contact zone unwanted effects (e.g. neckings) occur, like they do in a contact simulation. According to this, couplings are primarily qualified for the connection of reduced stiffnesses.

Stichwörter: Topologieoptimierung, Kontaktsteifigkeits-Stege, Koppelemente.

Keywords: Topology optimization, contact stiffness supports, couplings.

1 Systembasierte Komponentenoptimierung

Die Finite Elemente Analyse (FEA) ist in der industriellen Praxis nicht mehr aus dem Produktentwicklungsprozess wegzudenken. Das tiefere Produktverständnis und in der Folge die Senkung von Herstellkosten sind hierfür die entscheidenden Gründe [1]. Die Untersuchung der Kontaktproblematik in der FEA und die damit einhergehende Möglichkeit zur Erweiterung der Systemgrenzen auf Baugruppen hat zusätzlich dazu beigetragen das Detailwissen zu erhöhen [2].

Infolgedessen ist auch in der Topologieoptimierung das Ziel, ein möglichst exaktes Abbild der Realität zu schaffen, ohne dabei Abstriche bei den Details sowie dem elastischen Umfeld machen zu müssen. Die Abbildung des elastischen Umfeldes mithilfe der Kontaktrechnung führt hierbei allerdings zu großen numerischen Problemen. Insbesondere wenn das Optimierungsziel die Maximierung der Steifigkeit ist, ergeben sich strengere Anforderungen an die vom Anwender zu wählenden Kontakteinstellungen [3]. Die in der Kontaktmechanik notwendigen Einstellparameter erstrecken sich dabei von der Kontaktdiskretisierung, dem Lösungsalgorithmus bis hin zur Kontaktsteifigkeit [4].

Am Beispiel eines Balkens im 3-Punkt-Biegeversuch lässt sich erkennen, dass bei falsch gewählten Kontaktparametern Designvorschläge resultieren, welche besonders an der Kontaktzone nicht dem erwarteten Ergebnis entsprechen (siehe Bild 1). Die zu hohe Kontaktsteifigkeit beispielsweise führt zu sogenannten Kontaktsteifigkeits-Stegen. Bei diesen Designvorschlägen, wird der Kraftfluss entlang der Kontaktzonen geleitet, während der restliche Bauraum entfernt wird.

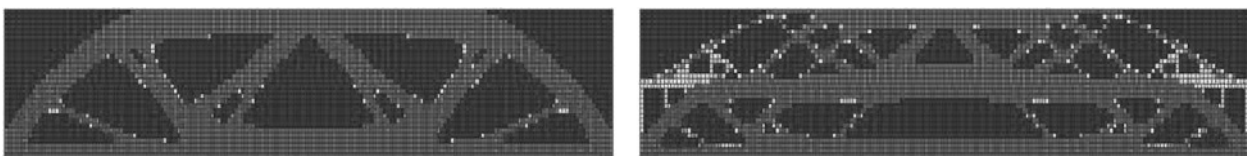


Bild 1: Designvorschläge eines Balkens im 3-Punkt-Biegeversuch mit horizontaler, mittiger Kontaktzone (links: Realitätsnaher Designvorschlag; rechts: Unrealistischer Designvorschlag mit Kontaktsteifigkeits-Steg entlang der Kontaktzone) [3]

Neben dieser Kontaktberechnung verfügen ebenfalls sogenannte Koppelemente über das Potential, Steifigkeiten gleichen und auch unterschiedlichen Elementtyps miteinander zu verbinden, oder auch, beispielsweise aus Gründen des Know-how-Schutzes, reduzierte Strukturen an vernetzte FE-Modelle anzubinden [5, 6]. Damit sind Koppelemente grundsätzlich dazu befähigt, beide Anbindungen von Steifigkeiten – Gesamtsteifigkeiten sowie

reduzierte Steifigkeiten – realitätsnah umzusetzen. Diese Funktionalität, Knoten- bzw. Freiheitsgradbeziehungen benutzerdefiniert festzulegen, soll daher als Alternative zur numerisch instabilen Kontaktberechnung für die Topologieoptimierung untersucht werden.

2 Grundlagen der Koppellemente

Die betrachteten Koppellemente können im Wesentlichen in zwei Kategorien – idealsteif und idealweich – eingeteilt werden. Die idealsteif gekoppelten Knoten (Slaveknoten) folgen den Bewegungen des Referenz-/Masterknotens entlang der gewählten Freiheitsgrade, als wären sie mit einem starren Balken verbunden. Dabei können entweder alle oder beliebige Kombinationen translatorischer bzw. rotatorischer Freiheitsgrade gekoppelt werden [6]. Die zugehörige mathematische Beziehung unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse aus Bild 2 zeigt die folgende Gleichung [7]:

$$\begin{pmatrix} u_x^S \\ u_y^S \\ u_z^S \\ \theta_x^S \\ \theta_y^S \\ \theta_z^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & d_z & -d_y \\ 0 & 1 & 0 & -d_z & 0 & d_x \\ 0 & 0 & 1 & d_y & -d_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x^M \\ u_y^M \\ u_z^M \\ \theta_x^M \\ \theta_y^M \\ \theta_z^M \end{pmatrix} \quad (1)$$

Im Gegensatz dazu ist bei der idealweichen Variante eine Relativbewegung zwischen den gekoppelten Knoten erlaubt und somit wird keine Versteifung in das FE-System eingebracht. Die rotatorische und translatorische Kopplung von mindestens zwei Knoten mit einem Referenzknoten erfolgt gemittelt auf Basis des Momenten- und Kräftegleichgewichts. Demgemäß entspricht die resultierende Kraft bzw. das resultierende Moment, das an den gekoppelten Knoten auftritt, den tatsächlich am Referenzknoten angreifenden Kräften und Momenten [8, 9]. Die aus diesem Gleichgewicht resultierenden analytischen Gleichungen können [8] entnommen werden.

Sowohl die idealsteifen als auch die idealweichen Koppellemente können Freiheitsgrade verschiedener FE-Komponenten koppeln. Daher wird ihre Eignung als Ersatz für die Kontaktberechnung in der Topologieoptimierung in der Art untersucht, dass bei den beiden betrachteten FE-Modellen valide Verschiebungsergebnisse resultieren.

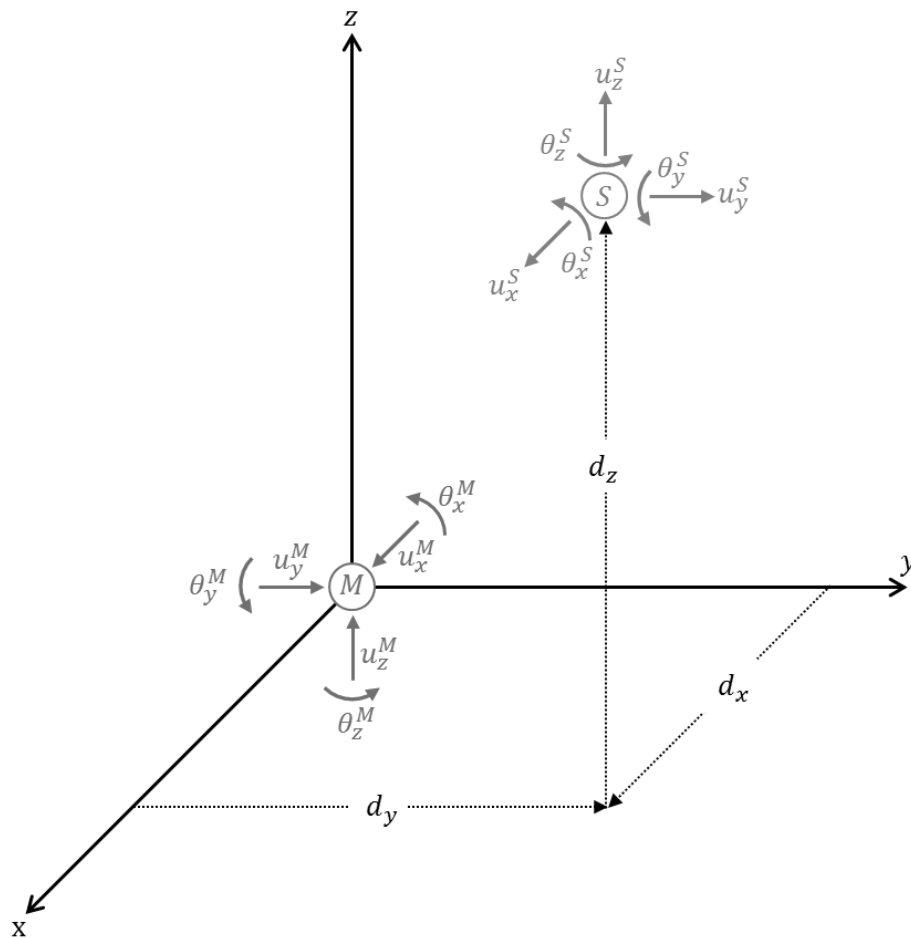


Bild 2: Geometrische Beziehung zwischen dem Referenz-/Masterknoten und einem gekoppelten Knoten (Slaveknoten)

3 FE-Modellbildung mithilfe von Koppellementen

Die beiden Beispiele repräsentieren zum einen die Anbindung einer Gesamtsteifigkeit und zum anderen die einer reduzierten Steifigkeit. An den vorhandenen Kontaktzonen werden dabei die beiden Koppeltypen auf verschiedene Arten eingesetzt und gegen Referenzergebnisse verglichen.

Zum Einbau der Koppelbeziehungen in die Grundgleichung der linearen FEA $KU = F$ stehen im Allgemeinen drei verschiedene Methoden zur Verfügung, wobei für die nachfolgenden Untersuchungen das gestörte Lagrange-Verfahren mit einem Strafparameter von 10^{-8} verwendet wurde [10].

3.1 Anbindung von Gesamtsteifigkeiten

Das FE-Modell zur Anbindung von Gesamtsteifigkeiten besteht aus zwei in Kontakt stehenden Würfeln (Material: E295), welche einen Druckstab darstellen (siehe Bild 3 links). Das für die FE-Simulationen erwartete Referenzergebnis lässt sich analytisch ermitteln nach Rieg et al. [1]:

$$|u_{ref}| = \frac{F}{K} = \frac{p \cdot A}{\frac{E \cdot A}{l}} = \frac{100 \text{ N/mm}^2 \cdot 60 \text{ mm}}{210000 \text{ N/mm}^2} = \frac{1}{35} \text{ mm} \quad (2)$$

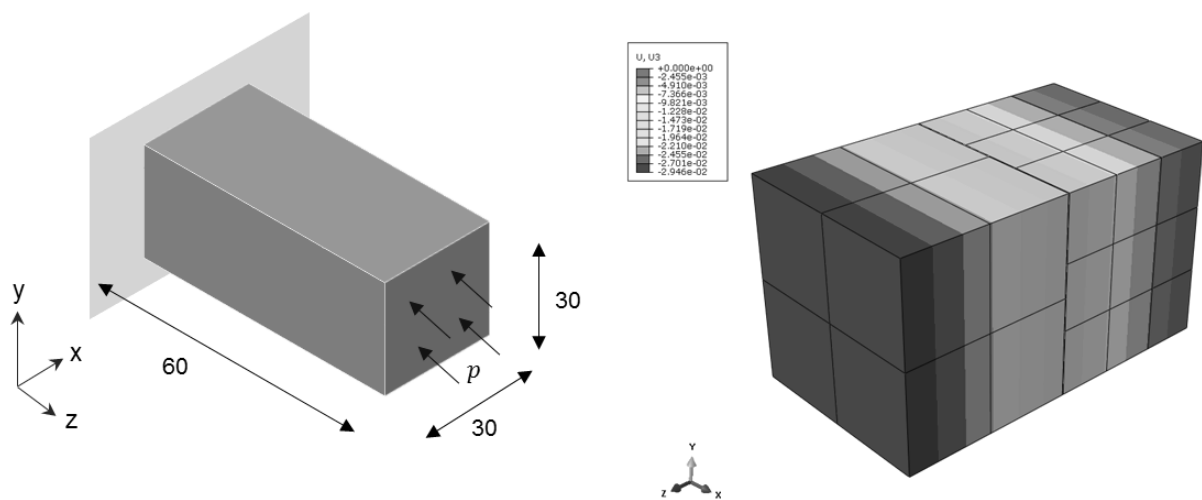


Bild 3: Modellparameter des untersuchten Druckstabes (links) sowie die Kontaktsimulation als Referzergebnis (rechts) [6]

Eine Vergleichsberechnung mittels verklebtem Kontakt (siehe Bild 3 rechts) ergibt eine Abweichung zum analytischen Ergebnis von 3,12 % bezüglich der Stauchung in z-Richtung bei einem realistischen Gesamtverformungsbild. Diese beiden Ergebnisse dienen im Folgenden als Referenz für die Simulationen mittels Koppellementen.

Die Verknüpfung der Knoten der beiden nichtkonformen Hexaedernetzen kann anhand verschiedener Systematiken erfolgen (siehe Bild 4).

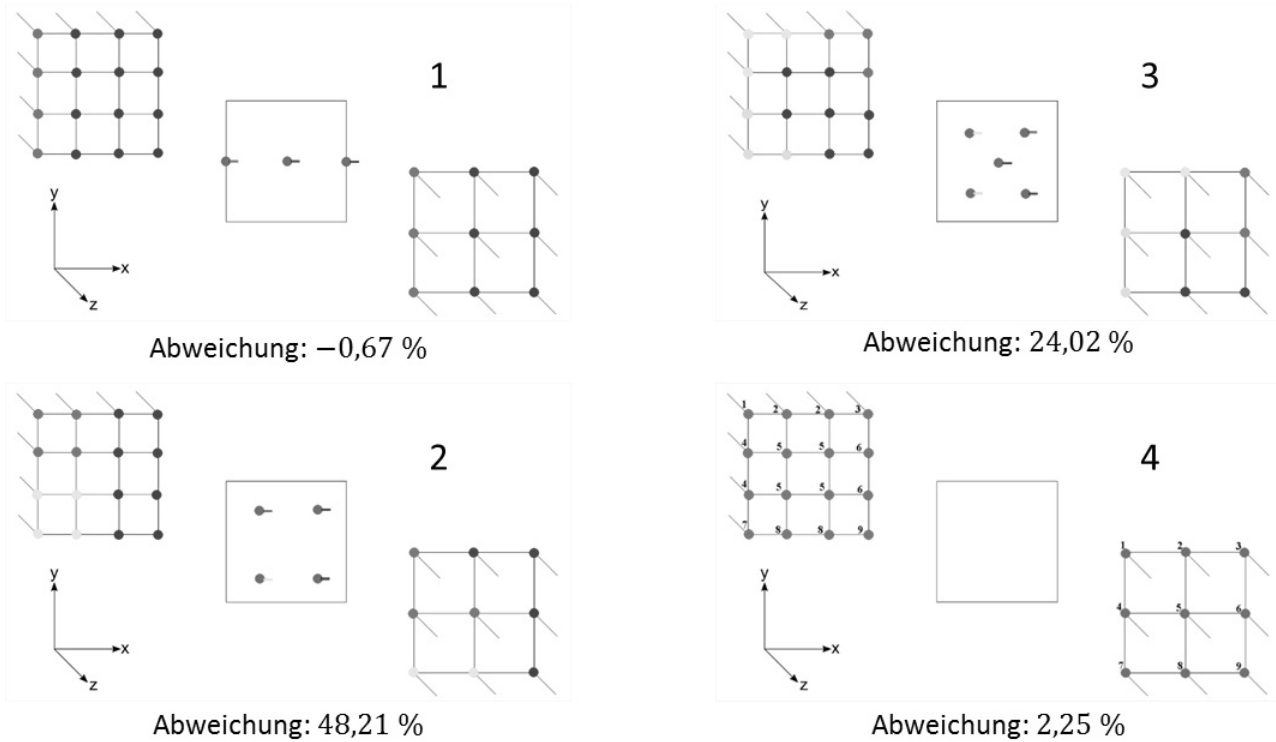


Bild 4: Zuordnungssystematiken zwischen den beiden FE-Komponenten des Druckstabes

Die jeweils in Bild 4 gezeigten Systematiken beschreiben die mit idealsteifen Koppellementen und über Referenzpunkte (grüne Punkte im jeweils mittleren Feld) verbundenen Knoten des ersten Würfels (jeweils links oben) und des zweiten Würfels (jeweils rechts unten). Die Abweichungen der einzelnen Varianten zeigen, dass es Zuordnungsschemata gibt, welche sehr gute Ergebnisse erzielen (Variante 1 und 4), jedoch schon bei kleinen Änderungen des Zuordnungsschemas starke Streuungen in den Verschiebungsergebnissen resultieren können. So ist zwischen der zweiten und dritten Variante lediglich die Zuordnung der Innenknoten unterschiedlich, jedoch in den Abweichungen der Verschiebungen ergeben sich stark unterschiedliche Werte von $48,21 \%$ und $24,02 \%$.

Ebenso wurden alle eben gezeigten Modellvarianten mit der idealweichen Kopplung berechnet, wobei die Abweichungen zum analytischen Referenzergebnis bei mindestens $15,03 \%$ lagen. Die jeweils korrespondierenden Varianten mit idealsteifen Koppellementen liefern stets bessere Ergebnisse, wobei diese Koppellemente aufgrund von falschem Modellverhalten – beispielsweise Durchdringungen sowie Einschnürungen (siehe Bild 5) – und der fehlenden, allgemeingültigen Systematik nicht als Ersatz zur Kontaktberechnung bei der Anbindung von Gesamtsteifigkeiten empfohlen werden können.

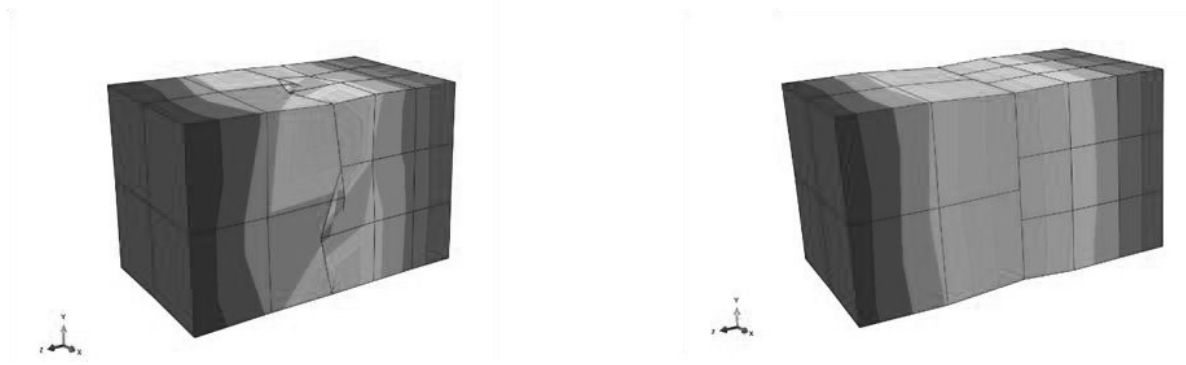


Bild 5: Fehlerhaftes Modellverhalten im Kontaktbereich bei der Verwendung von idealsteifen Koppellementen (links: Durchdringung; rechts: Einschnürung)

3.2 Anbindung von reduzierten Steifigkeiten

Die Anbindung von reduzierten Steifigkeiten wird anhand einer klassischen Verbindung zwischen einem Bolzen und einem Augenstab (Material: E295) untersucht (siehe Bild 6).

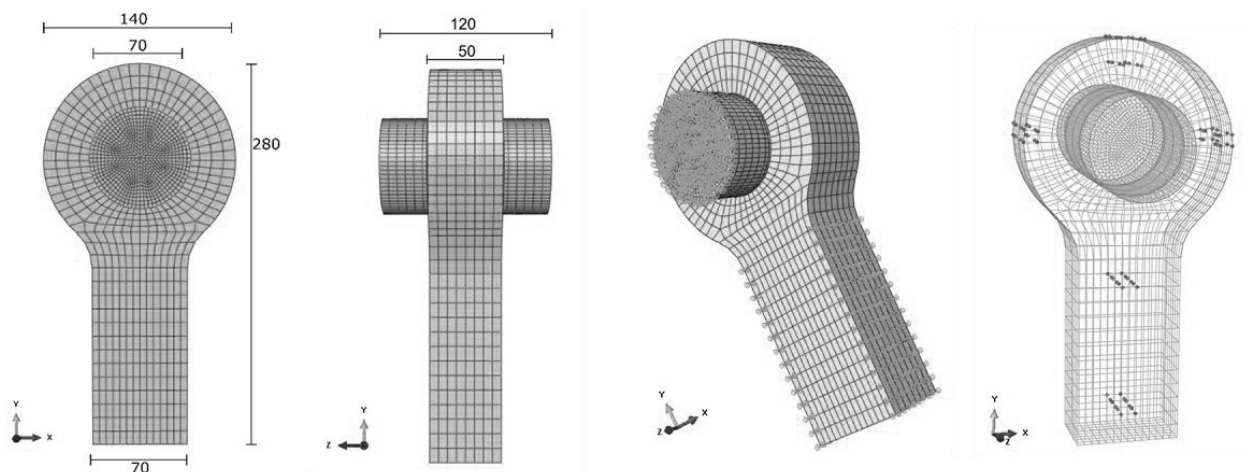


Bild 6: Modellparameter, Festhaltung sowie Auswerteknoten der Bolzenverbindung (v.l.n.r.)

Der Bolzen ist dabei an den beiden Stirnflächen festgehalten, während der Augenstab seitlich geführt ist und von einer Druckkraft ($-28,5714 \text{ N/mm}^2$) gelängt wird.

Der Kontakt der zylindrischen Berührungsflächen wird anhand dreier Zuordnungsschemata untersucht, wobei die Steifigkeit des Bolzens jeweils auf die Referenzpunkte reduziert wurde und anschließend diese reduzierte Steifigkeit über idealsteife Koppellemente an die Bohrungsinnenfläche des Augenstabs angebunden wurde. Die resultierenden Verschiebungsergebnisse wurden an den rot markierten Knoten aus Bild 5 ausgewertet und denen einer verklebten Kontaktrechnung ohne reduziertes FE-Modell gegenübergestellt (siehe Bild 7).

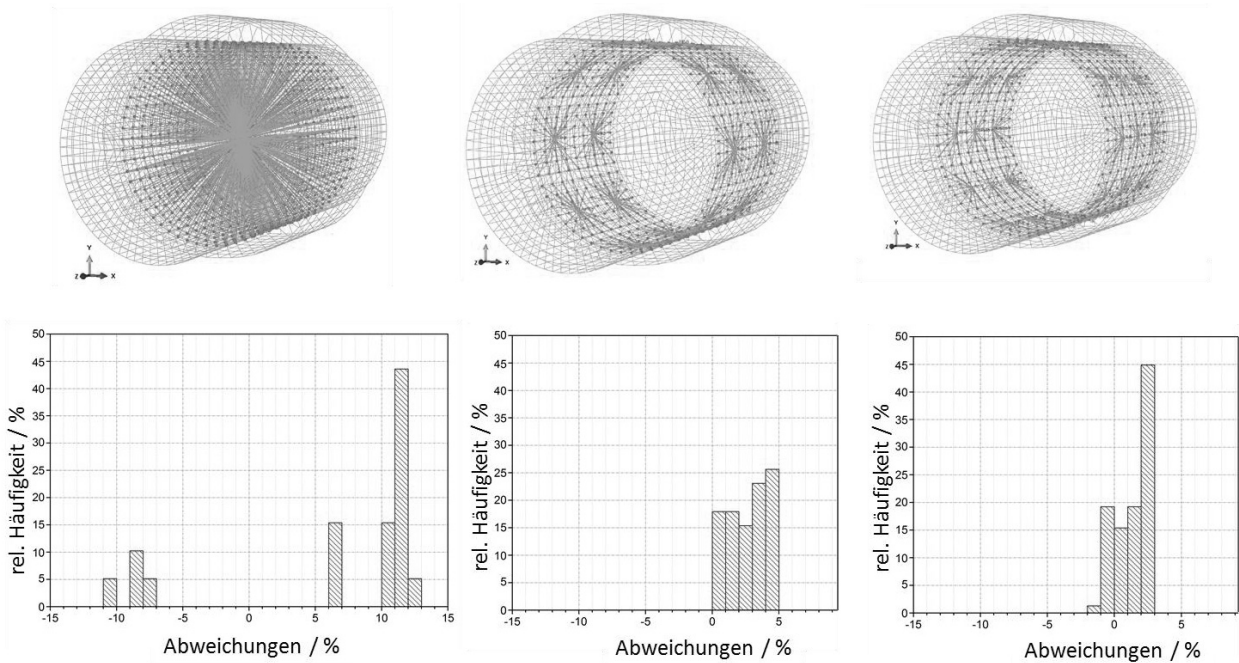


Bild 7: Zuordnungsschemata und relative Abweichung der Verschiebungsergebnisse an ausgewählten Netzknoten einer Bolzenverbindung mit einem mittigen Referenzknoten (links), 16 Referenzpunkten (mittig) und 30 Referenzpunkten über den Umfang (rechts)

Die Variante mit der reduzierten Steifigkeit des Bolzens im Mittelpunkt der Bohrungsfläche (siehe Bild 7 links) zeigt dabei die größten Abweichungen. Diese Variante wäre jedoch mit einer Kontaktrechnung zwischen dem reduzierten Bolzen und dem Augenstab nicht berechenbar, weshalb eine relative Abweichung zum Referenzergebnis von maximal 12,05 % akzeptabel erscheint. Die beiden Varianten, bei denen die Bolzensteifigkeit auf jeweils 16 bzw. 30 Punkte am Umfang reduziert und angekoppelt wurde, weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzergebnis auf, da sämtliche Verschiebungsergebnisse um maximal 4,65 % bzw. 2,99 % abweichen.

Die Verbindung zwischen dem Augenstab und der auf Referenzpunkte reduzierten Steifigkeit des Bolzens lässt sich somit durch unterschiedliche Zuordnungssystematiken gut abbilden.

4 Zusammenfassung

Die in der Topologieoptimierung gerne aufgrund unerwünschter Effekte (wie z. B. Kontaktsteifigkeits-Stege) vermiedene Kontaktsimulation kann teilweise durch die Verbindung der beiden Berührungsflächen mit Koppellementen substituiert werden. Diese Art der Modellierung empfiehlt sich insbesondere zur Anbindung von Steifigkeiten, welche auf einen oder

wenige Punkte reduziert wurden, wodurch eine klassische Kontaktsimulation nicht bzw. kaum mehr möglich ist. Die dabei eingesetzten idealsteifen Koppellemente erzielten gegenüber den idealweichen durchweg bessere Ergebnisse, weshalb diese Koppelbedingungen sich gut eignen, um reduzierte Steifigkeiten in der Topologieoptimierung anzubinden.

Literatur

- [1] 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
- [2] Wriggers, Peter: Computational Contact Mechanics. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2010. – ISBN 978-3540326083
- [3] Billenstein, Daniel; Glenk, Christian; Diwisch, Pascal; Rieg, Frank: Investigation of contact settings on the result of topology optimization to avoid contact stiffness supports. 12th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. 05.-09.06.2017, Braunschweig.
- [4] Nützel, Florian: Entwicklung und Anwendung eines Finite-Elemente-Systems auf Basis von Z88 zur Berechnung von Kontaktaufgaben aus der Antriebstechnik. Dissertation. Universität Bayreuth. 2015
- [5] Dassault Systemes Simulia Corp.: Abaqus 6.13 Documentation: Analysis User's Guide. URL: <http://129.97.46.200:2080/v6.13/books/usb/default.htm>. Zugriff: 15.06.2016.
- [6] Trat, Martin: Betrachtung von Koppellementen in der Finite Elemente Analyse zur Anbindung externer Steifigkeiten mithilfe der Software Abaqus/Standard. Bachelorarbeit. Universität Bayreuth. 2016
- [7] Perlemuter, Anatoly; Slivker, Vladimir: Numerical Structural Analysis. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2003. – ISBN 978-3540006282
- [8] Case, Bill: MYSTRAN – User Reference Manual. URL: <http://www.mystran.com/Executable/MYSTRAN-Users-Manual.pdf>. Zugriff: 02.09.2015
- [9] Dassault Systemes Simulia Corp.: Abaqus 6.13 Documentation: Theory Guide. URL: <http://129.97.46.200:2080/v6.13/books/stm/default.htm>. Zugriff: 15.06.2016
- [10] Bathe, Klaus-Jürgen; Zimmermann, Peter: Finite-Elemente-Methoden. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2002. – ISBN 978-3540668060

Auswirkung von Laufflächenbombierungen auf den Schmierfilmaufbau in Druckkammlagern

Marcel Heß

Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal

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

Email: hess@imw.tu-clausthal.de; Internet: <https://www.imw.tu-clausthal.de>

ORCID: 0000-0003-4821-131X

Inhalt: In ihrer Grundform werden die Laufbahnen von Druckkammlagern als Kegelflächen ausgeführt, für die sich im nicht deformierten Kontakt eine Linienberührung ergibt. Unter Last kann es infolge elastischer Deformationen zum Kantentragen kommen. Eine Vermeidungsoption ist das Bombieren einer Laufbahn quer zur Laufrichtung. Die Bombierung wirkt als Laufflächenrücknahme im Kantenbereich und erzeugt einen Punktkontakt. Anhand von experimentellen Untersuchungen und Simulationsrechnungen werden die Auswirkungen unterschiedlicher Bombierungen auf das Übergangsverhalten in die Vollschröpfung sowie die Kompensation etwaiger Neigungsfehler betrachtet.

Abstract: The running surfaces of thrust cone bearings are typically designed as conical rims. Due to elastic deformations the expected line contact may become thinner at the edges, if load is applied to the bearing. A possible option to avoid edge thinning is cambering a running surface transversally to its running direction, which will lead to a point contact. Based on experimental investigations and simulations, the influence of cambering on the transition to full lubrication regime and the compensation of possible inclination errors shall be illustrated.

Stichwörter: Druckkammlager, Bombierung, Neigungsfehler

Keywords: Thrust Cone Bearing, Crowning, Cambering, Misalignment

1 Einleitung

Druckkammlager dienen der direkten Übertragung von axialen Lasten zwischen parallelen, rotierenden Wellen. Sie eignen sich zum entstehungsnahen Ausgleich von Verzahnungsaxialkräften, wodurch einfach schrägverzahnte Übersetzungsstufen in Ihrer Wirkung nach außen axialkraftfrei ausgeführt werden können. Externe Axiallasten lassen sich ebenfalls über Druckkammlager führen und können so verlustarm von der am langsamsten rotierenden Welle des Getriebes in dessen Gehäuse geleitet werden. In beiden Fällen gestattet der Einsatz des Druckkamms den Aufbau einer effizienten Gehäuselagerung und kann hierdurch den Gesamtwirkungsgrad des Getriebesystems erheblich steigern [1,2,3].

Druckkammlager bestehen in der weitverbreitetsten Bauform aus zwei fest auf der Ritzelwelle montierten Ringen, den Druckkämmen, welche, wie in Bild 1 dargestellt, über den Kopfkreis des Ritzels hinaus ragen und die Stirnseiten des gegenüberliegenden Zahnrades umschließen. Sowohl die inneren Seitenflächen der Druckkämme als auch die Stirnseiten des Zahnrades weisen meist konisch ausgeformte Laufflächen auf, sodass sich aus der Überlagerung der sich jeweils berührenden Kegelflächen ein konvergenter Spaltverlauf ergibt. Während der Rotation der Getriebewellen wird an den Laufflächen anhaftender Schmierstoff in den sich verengenden Spalt gezogen, es kommt zum Aufbau eines hydrodynamischen Schmierfilmes, der eine nahezu verschleißfreie Übertragung der Axiallasten zwischen den Laufflächen des Lagers ermöglicht. Die kinematischen Verhältnisse im Druckkammkontakt sind für den Aufbau eines hydrodynamischen Schmierfilmes besonders günstig, da die Bewegung beider Kontaktflächen gleichgerichtet ist und sich daher eine hohe, für die Schmierstoffzufuhr relevante, Summengeschwindigkeit und eine geringe, für viskose Reibungsverluste verantwortliche, Differenzgeschwindigkeit ergeben.

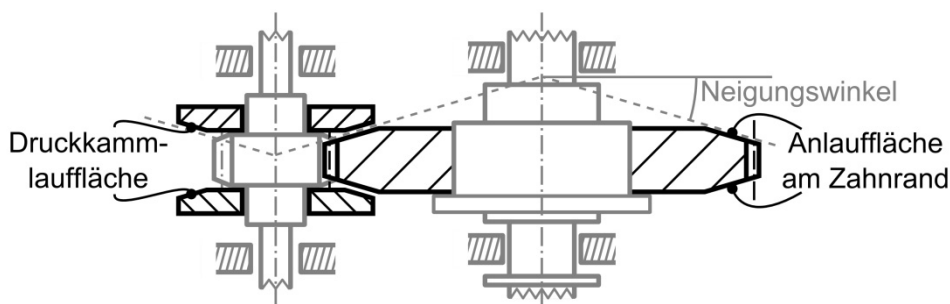


Bild 1: Schematische Darstellung einer Druckkammlagerung

2 Bombierung als Verbesserungsansatz für die Laufflächengestaltung von Druckkammlagern

Kritische Situationen für den Betrieb von Druckkammlagern können entstehen, wenn der hydrodynamische Schmierfilm nicht ausreichend stark ist, um die beiden Kontaktpartner in einer gegebenen Lastsituation vollständig voneinander zu trennen und es zu Festkörperberührungen kommt. Solche Mischreibungssituationen sollten im normalen Betrieb eines Druckkammlagers durch eine geeignete Auslegung vermieden werden, sind allerdings, beispielsweise während Anfahr- oder Abbremsmanövern, nicht vollständig vermeidbar. Ein Ziel der Optimierung des Druckkammlagerdesigns ist es daher, eine Lagergestaltung zu identifizieren, die eine vollständige Trennung der Kontaktflächen bei möglichst niedrigen Drehzahlen ermöglicht, um einen Großteil der Betriebsdauer unter Vollschmierungsbedin-

gungen absolvieren zu können. Bereits [1] zeigt anhand von Modellrechnungen einen Einfluss des Kegelwinkels auf die Lagertragfähigkeit auf, ein anderer Parameter ist die Laufbahnbreite. [4] erarbeitet eine elasto-hydrodynamische Schmierfilmsimulation, anhand der sie zeigen kann, dass sich die ursprünglich ebenen Kegellaufflächen infolge des hydrodynamischen Druckaufbaus nach innen wölben können, wodurch es zu signifikanten Spaltweitenreduktionen im äußeren Laufbahnbereich kommen kann. Zur Minderung der Gefahr des Kantentrags schlägt sie die Verwendung eines quer zur Laufrichtung bombierten Druckkamms vor (von ihr bezeichnet als: „crowned thrust cone“), der mit einer kegeligen, quer zur Laufrichtung ebenen, Lauffläche gepaart wird. Vergleichsrechnungen zeigen, dass sich für einen spezifischen Lagerentwurf durch die Bombierung zwar eine reduzierte Spaltweite im mittleren Laufbahnbereich ergibt, zugleich allerdings die minimale Spaltweite im Kontaktgebiet aufgrund der Kantenrücknahme ansteigt.

3 Experimentelle Untersuchungen zum Übergangsverhalten bombierter Druckkammlager

Obwohl das Maschinenelement Druckkamm seit über 90 Jahren existiert [5], ist es außerhalb seines Hauptanwendungsfeldes, dem Verdichtergetriebebau, weitestgehend unbekannt, zudem stehen nur wenige, frei verfügbare Auslegungsrichtlinien für die Gestaltung von Druckkammlagern zur Verfügung. Im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 1551 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wurde daher am Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal das Forschungsprojekt „Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von schrägverzahnten Getrieben“ durchgeführt, welches auch die experimentelle Untersuchung des Übergangsverhaltens zwischen Mischreibungs- und Vollschmierungsgebiet für unterschiedliche Druckkammlager enthielt.

Auf dem durch [6] beschriebenen Spezialprüfstand wurden unterschiedlich gestaltete Lagergeometrien auf 15 Laststufen zwischen 2 kN und 30 kN hinsichtlich ihrer Fähigkeit, eine vollständige Trennung der Kontaktpartner durch einen hydrodynamischen Schmierfilm zu erreichen, untersucht, indem die Schmierfilmqualität für 35 Geschwindigkeitsstufen anhand der elektrischen Isolationsfähigkeit des Schmierstoffs beurteilt wurde [7].

Tabelle 1 gibt als einen kleinen Ausschnitt der Untersuchung die für drei Gestaltungsvarianten ermittelten, lastabhängigen Umfangsgeschwindigkeiten an, bei denen der Übergang zwischen den Schmierzuständen erkannt wurde. Während der erste Datensatz für ein Laufflächenpaar mit ebenen Kegelflächen ermittelt wurde, gelten die anderen beiden Da-

tenreihen für Kontakte, bei denen eine einseitige Bombierung mit einem Radius von 2,3 m bzw. 5,3 m aufgebracht wurde. Die rechnerische Ausdehnung der nach HERTZ bestimmten Druckellipse für die sich ergebenden Punktkontakte entspricht für diese Radien der Laufbahnbreite, wenn die halbe bzw. die volle maximale Axiallast des Untersuchungsbereiches von 30 kN aufgebracht wird.

Tabelle 1: Experimentell bestimmte Geschwindigkeiten für den Übergang von Mischreibung und Vollschiebung in Abhängigkeit von der axialen Lagerbelastung für drei verschiedene Lagergestaltungsvarianten

Ebene Laufbahn		Bombierradius: 2,3 m		Bombierradius: 5,3 m	
Axiallast in kN	Geschwindigkeit in m/s	Axiallast in kN	Geschwindigkeit in m/s	Axiallast in kN	Geschwindigkeit in m/s
1,73	1,84	1,34	4,13	1,53	3,30
3,72	3,30	3,22	5,81	3,44	5,59
6,15	4,35	-	-	5,49	5,80
8,25	5,17	-	-	-	-
10,42	5,80	-	-	-	-

Trägt man die ermittelten Übergangsgeschwindigkeiten über der Axiallast auf (siehe Bild 2), zeigt sich zunächst für alle Proben, dass die erforderliche Geschwindigkeit zur Trennung der Laufflächen mit der Axiallast ansteigt. Diese Beobachtung entspricht den Erwartungen, wie sie auch für klassische Gleitlageranwendungen gelten.

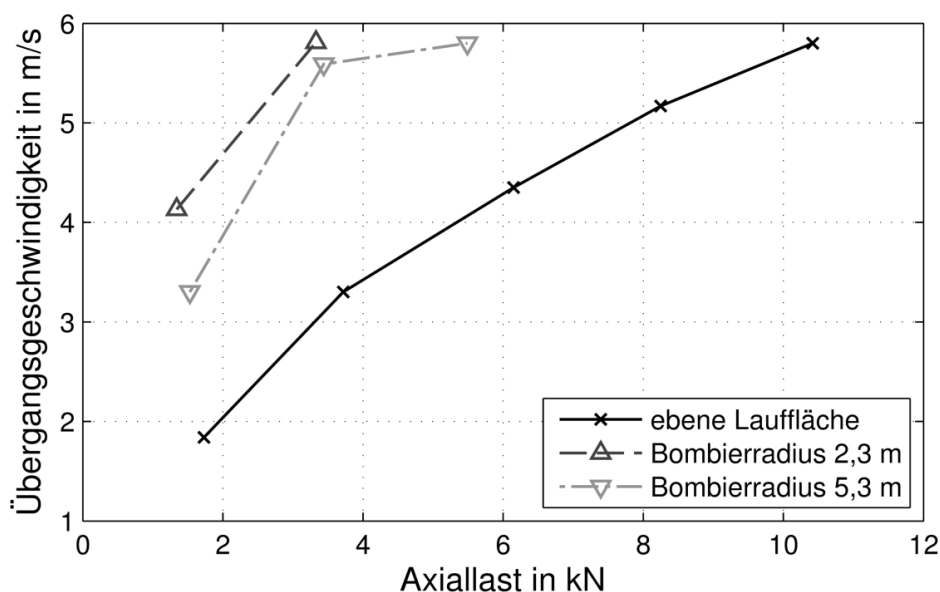


Bild 2: Einfluss der Bombierung auf die für den Übergang aus der Mischreibung in die Vollschiebung erforderliche Geschwindigkeit anhand der Messdaten aus Tabelle 1.

Es wird jedoch auch deutlich, dass die bombierten Laufflächen höhere Geschwindigkeiten erfordern, um die Vollschrerung zu erreichen, als die ebene Laufbahn. Entgegen den Erwartungen hat die aufgebrauchte Kantenrücknahme für die im Versuch betrachteten Betriebssituationen somit zunächst keinen positiven Beitrag zur Betriebssicherheit des Druckkammllagers erbringen können. Die stärker bombierte Probe (Radius 2,3 m) zeigt ein schlechteres Übergangsverhalten, für Proben mit noch stärkerer Bombierung (Radius 0,2 m und 0,1 m) konnte im Rahmen des untersuchten Kraft-Geschwindigkeitsfeldes kein Verlassen des Mischreibungsbereiches beobachtet werden.

4 Abstimmung der Bombierung auf die zu erwartende Lastsituation anhand von Simulationsrechnungen

Die im vorherigen Abschnitt beobachtete Diskrepanz zwischen Erwartung und Experiment hinsichtlich des verbesserten Übergangs zwischen Mischreibung und Vollschrerung zeigt, dass eine Auswahl der Bombierradien anhand der Abmessung der HERTZ'schen Druckellipse nicht zielführend ist. Anhand von Simulationsrechnungen soll eine verbesserte Auswahl einer geeigneten Bombierung getroffen werden. Hierfür wird zunächst der Schmierfilmaufbau in einem Druckkammllager mit ebenen Laufflächen für einen der experimentell bestimmten Übergangspunkte (Axiallast: 3720 N, Geschwindigkeit: 3,3 m/s) berechnet, es ergibt sich eine minimale Spaltweite von 3,78 μm . Bild 3 zeigt die Auswirkung der elastischen Laufflächendeformation für eine ebene Lauffläche als Vergleich der unverformten und der deformierten Geometrie in einem Längs- und einem Querschnitt.

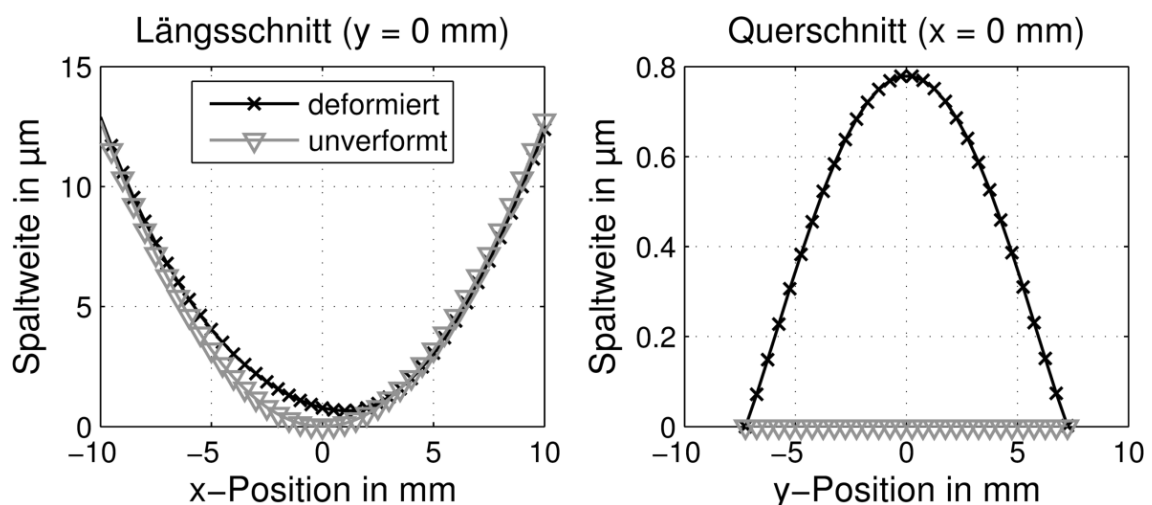


Bild 3: Auswirkung der elastischen Deformation auf eine ebene Lauffläche bei einer Axiallast von 3720 N und einer Geschwindigkeit von 3,3 m/s

Insbesondere im Querschnitt ist die Deformationsauswirkung gut erkennbar, die Einwölbung im Mittenbereich der Lauffläche sorgt dafür, dass die geringsten Spaltweiten im Laufflächenrandbereich auftreten und die Gefahr des Kantentrags steigt. Bild 4 zeigt schematisch, welche Laufflächenrücknahme im Kantenbereich z_B durch eine Bombierung der Lauffläche erreicht werden kann.

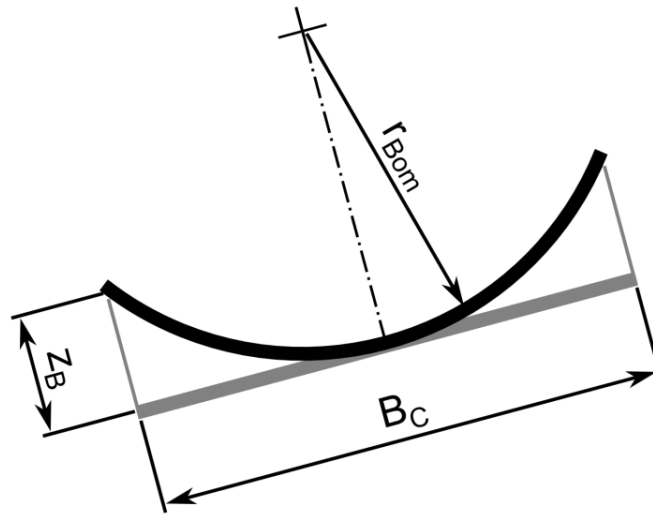


Bild 4: Aus der Bombierung resultierende Kantenrücknahme für eine Druckkammlauffläche

In Abhängigkeit von der Laufbahnbreite B_C und dem gewählten Bombierradius r_{Bom} gilt:

$$z_B = r_{Bom} - \sqrt{r_{Bom}^2 - (B_C / 2)^2} \quad (1)$$

Soll die Kantenrücknahme zur Kompensation des Kantentrags der im Querschnitt aus Bild 2 dargestellten Einwölbung ($0,78 \mu\text{m}$) entsprechen, ergibt sich durch Umstellung von Gleichung (1) bei einer Laufbahnbreite von 15 mm ein erforderlicher Bombierradius von etwa 36 m. Bild 5 zeigt die errechneten minimalen Spaltweiten für diesen Lastfall bei einer Variation des Bombierradius.

Der dargestellte Spaltweitenverlauf zeigt zunächst einen Anstieg mit zunehmendem Bombierradius, ab einem Wert von 15 m ergeben sich Spaltweiten, welche über der mit ebenen Laufflächen bestimmten Spaltweite liegen. Vor dem Ziel einer frühzeitigen Trennung technisch rauher Oberflächen stellen diese bombierten Geometrien für den betrachteten Lastbereich eine Verbesserung dar. Das Optimum (größte Spaltweite) ergibt sich für einen Bombierradius von 34 m. Es liegt relativ nah an dem mittels Gleichung (1) prognostizierten Wert. Nach dem Überschreiten des Optimums fällt die minimale Spaltweite in Richtung des Wertes für ebene Laufflächen ab.

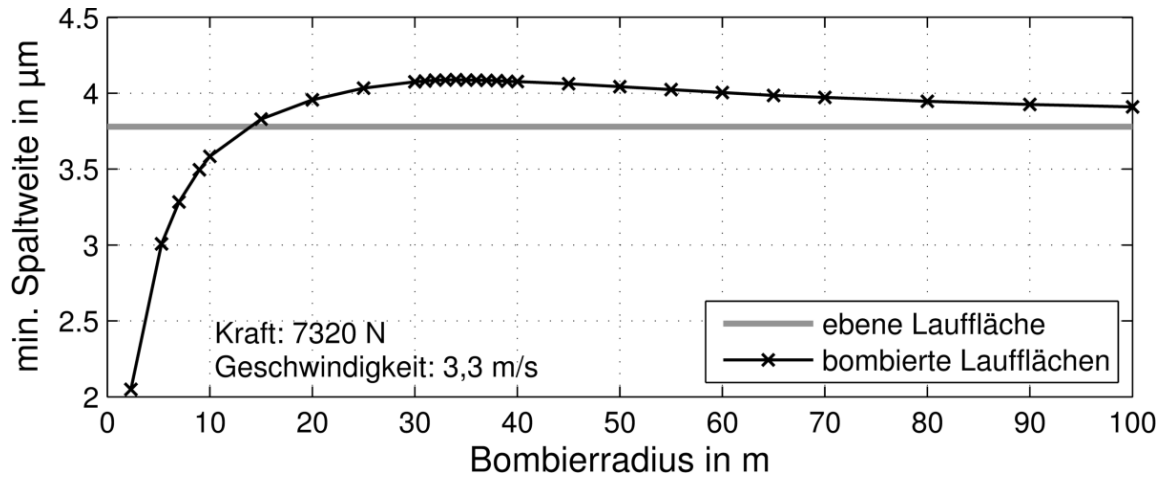


Bild 5: Einfluss des Bombierradius auf die minimale Spaltweite

Ein besseres Verständnis für diesen Effekt lässt sich gewinnen, wenn man die in Bild 6 dargestellten Spaltkonturen im Querschnitt des Kontaktbereiches vergleicht. Die Kontur der ebenen Lauffläche zeigt den bereits aus Bild 3 bekannten Verlauf der Spaltweite über der Kontaktbreite, welcher sich mittig nach innen wölbt und hierdurch zu niedrigeren Spaltweiten im Randbereich der Lauffläche führt. Für die relativ starke Bombierung von 5,3 m ist zwar eine deutliche Abplattung im Bereich des Punktkontaktes erkennbar, insgesamt sind die Kantenbereiche aufgrund der starken Krümmung aber weit aus dem Kontakt zurückgezogen und generieren nur wenig Tragdruck, weshalb die Spaltweite in der Kontaktmitte deutlich abnimmt.

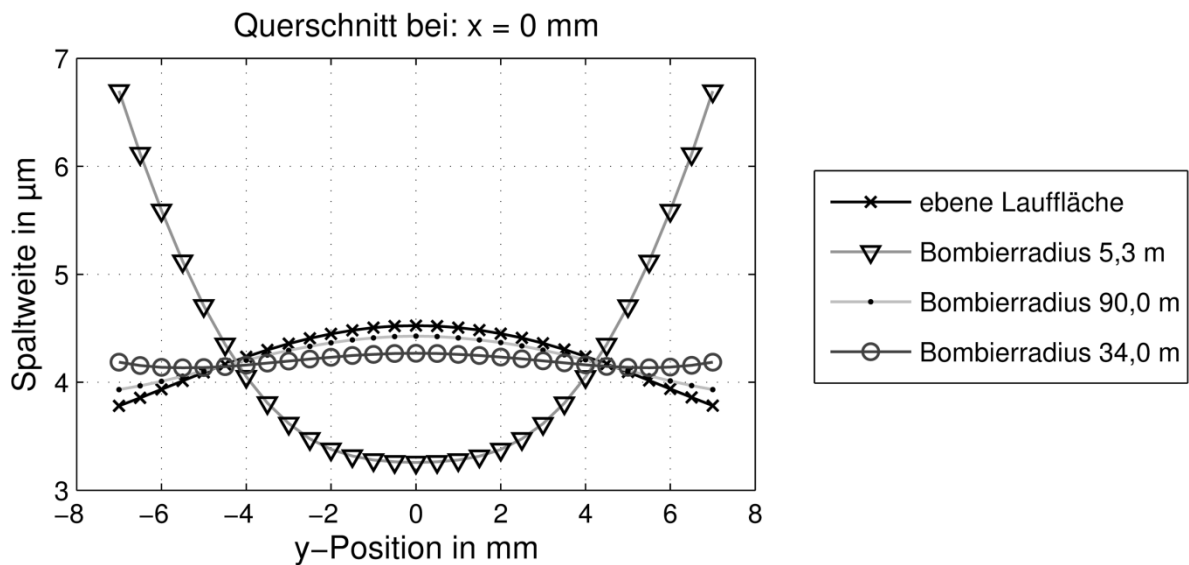


Bild 6: Errechnete Spaltweiten im Querschnitt

Für die Lauffläche mit 34 m Bombierradius ergibt sich infolge der elastischen Deformation eine fast horizontale Spaltkontur in Kontaktbreitenrichtung, die einen günstigen Druckauf-

bau ermöglicht und in der größten Spaltweite resultiert. Für die Fläche mit dem sehr großen Bombierradius von 90 m ist zwar eine Abmilderung der druckbedingten Einwölbung erkennbar, zur vollständigen Kompensation reicht die geringe Kantenrücknahme jedoch nicht aus.

Bei der Anwendung von Gleichung (1) zur Bestimmung einer geeigneten Bombierung ist zu beachten, dass die erforderliche Krümmung mit der erforderlichen Kantenrücknahme und somit mit der Last zunimmt. Eine Bombierung kann daher nur für eine Last optimiert werden, für alle Lasten unterhalb dieser Auslegungslast ergibt sich eine zu starke Krümmung mit einer Spaltweitenreduktion in der Laufbahnmitte, für Lasten oberhalb der Auslegungslasten ist mit einer abgeschwächten Spaltweitenreduktion im Kantenbereich zu rechnen. In der praktischen Anwendung ist zudem zu beachten, dass der Anspruch an die Fertigungsgenauigkeit mit steigendem Bombierradius zunimmt.

5 Einfluss der Laufflächenbombierung auf die Auswirkung von Neigungsfehlern

Abweichungen zwischen den Neigungswinkeln der beiden kegeligen Laufflächen eines Druckkammlagers, wie sie beispielsweise durch Fertigungstoleranzen oder lastbedingte Wellendurchbiegungen hervorgerufen werden können, haben erheblichen Einfluss auf den hydrodynamischen Druckaufbau, da die Spaltweite nicht mehr gleichmäßig über der Laufbahnbreite verteilt ist. Bild 7 zeigt für drei Lagergeometrien, wie sich die minimale Spaltweite in Abhängigkeit von einer angenommenen Neigungsabweichung ändert.

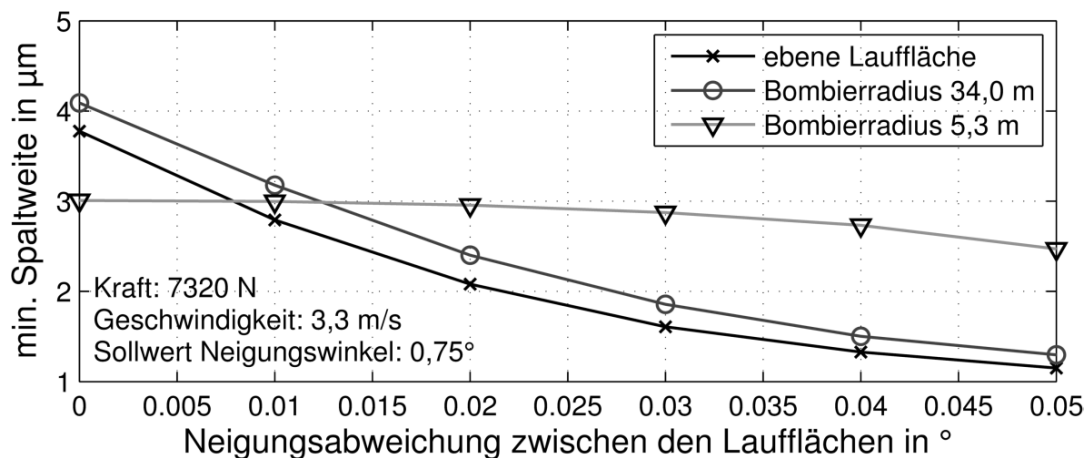


Bild 7: Einfluss einer Laufflächenneigungsabweichung auf die minimale Spaltweite

Für die Spaltweitenverläufe der ebenen Lauffläche und der „optimal bombierten“ Laufbahn ergeben sich starke Spaltweiteneinbußen bereits bei relativ geringen Neigungsabweichungen, während der negative Einfluss der Neigungsabweichung für die stärker bombierte Lauffläche deutlich schwächer ausfällt. Bereits bei einer angenommenen Abweichung von etwa $0,015^\circ$, die etwa 2 % des Sollwertes für die Laufbahnneigung ausmacht, ergeben sich die besten Werte für die am stärksten bombierte Lauffläche. Ursache hierfür ist, dass der für den Druckaufbau bedeutende Laufbahnbereich aufgrund der relativ hohen Krümmung schmaler ausfällt und dadurch auch bei den betrachteten Neigungsabweichungen weitestgehend in der Laufbahnmitte angeordnet ist. Dem Nachteil der mitunter höheren Flächenlast des Punktkontaktes steht somit als deutlicher Vorteil eine erheblich gesteigerte Toleranz hinsichtlich etwaiger Neigungsfehler gegenüber. Diese gilt es innerhalb eines ganzheitlichen Konstruktionsentwurfes gegeneinander abzuwägen.

6 Fazit

Für einen sicheren Betrieb von Druckkammlagern ist ein möglichst frühzeitiger Übergang in die Vollschröpfung erstrebenswert. Experimentelle Untersuchungen zeigen stichprobenartig den Einfluss einer Laufflächenbombierung auf das Übergangsverhalten von Druckkammlagern. In beispielhaften Simulationsrechnungen wird gezeigt, wie sich die Bombierung auf eine zu erwartende Betriebssituation abstimmen lässt. Anhand von Schnittdarstellungen kann gezeigt werden, dass eine geeignete Bombierung die Auswirkung der druckbedingten Laufflächendeformation kompensieren und so das Risiko des Kantentrags mindern kann. Als weiterer Vorzug bombierter Laufflächen wird eine erhöhte Toleranz gegenüber Neigungsabweichungen dokumentiert.

Literatur

- [1] Langer, Horst: Hydrodynamische Axialkraftübertragung bei Wellen schnelllaufender Getriebe. In: Konstruktion im Maschinen-, Apparate- und Gerätebau 34 (1982), Nr. 12, S. 473–478
- [2] Heß, Marcel: Beeinflussung der Reibungsverluste in schrägverzahnten Getrieben durch Druckkammlager. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 39 (2014), S. 33–44
- [3] Lohrengel, Armin ; SCHÄFER, Günter ; HEß, Marcel: Druckkammlagerungen : Gesteigerte Effizienz für schrägverzahnte Getriebe. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): Gleit- und Wälzlagerungen 2015 : Gestaltung, Berechnung, Einsatz ; 11. VDI-Fachtagung - mit Fachausstellung; Schweinfurt, 06. und 07. Mai 2015. Düsseldorf : VDI-Verl., 2015 (VDI-Berichte, 2257). – ISBN 978-3-18-092257-7, S. 211–233

- [4] Barragan de Ling, F. d M.: Lubrication of thrust cones. Cardiff, University of Wales, Division of Mechanical Engineering and Energy Studies. Phd thesis. 1993
- [5] Schutzrecht: Stirnraedergetriebe mit einseitiger Schraubenverzahnung. BBC BROWN BOVERI & CIE. Anmeldenr. DE1922A037582D 19220425, DE. 06.09.1924. DE. Veröffentlichungsnr. DE401652 (C). IPC F16H1/08
- [6] Thodden, Daniel: Neuer Prüfstand für Verschleißuntersuchungen an Druckkämmen. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 34 (2009), S. 115–118
- [7] Heß, Marcel: Der Vollschrömer auf der Spur. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 38 (2013), S. 121–138

Für die Unterstützung des Projektes „Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von schrägverzahnenden Getrieben“ im Rahmen des SPP 1551 dankt der Autor der Deutschen Forschungsgemeinschaft!

FEM-Analyse an Stäben mit Halbkreisnut und überlagerter Querbohrung zur Überprüfung des Thum'schen Verfahrens

Ali Daryusi

Professur für Maschinenelemente und CAD/CAE-Labor, Hochschule Offenburg

Badstraße 24, 77652 Offenburg

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

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

Inhalt: Viele hochbeanspruchte Bauteile müssen zur Erfüllung ihres konstruktiven Zwecks mit Durchdringungskerben versehen werden. Infolge der gegenseitigen Wechselwirkung gelten für die Kerbwirkung dieser Art von Mehrfachkerben andere Gesetzmäßigkeiten als bei Einzelkerben. Die Weiterentwicklung der Lehre von der Tragfähigkeitsberechnung höchstbeanspruchter Maschinenelemente macht es notwendig, sich mit der Durchdringungskerbwirkung eingehend zu befassen. Thum und Svenson [1] entwickelten im Jahr 1949 ein Näherungsverfahren zur Abschätzung der Formzahl an einem zugbelasteten Stab mit Durchdringungskerben. In vielen Lehrbüchern findet dieses Verfahren Anwendung. Aus heutiger Sicht erscheint die Eignung der aus diesem Ansatz erzielten Ergebnisse als dringend überprüfungswürdig. Das thum'sche Verfahren wird unter die Lupe genommen. Der hier vorliegende Beitrag präsentiert mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) neue Untersuchungsergebnisse an zugbeanspruchten Stäben mit Halbkreisnut und überlagerter Querbohrung. Diese ergaben, dass die Berechnung nach [1] Lücken aufweist. Ihr Ansatz stellt für den heutigen Entwicklungsstand eine mit zu großen Abweichungen behaftete Näherungshypothese dar.

Abstract: Many highly stressed machine elements have to be provided with penetration notches in order to fulfill their constructional purpose. The notch effect of this kind of the multiple notches is due to the mutual interaction different from that of single notches. The development of the Teaching of the Calculation of load capacity (ultimate limit) of highly stressed machine elements (shafts and axles) makes it necessary to deal in detail with the multiple notches. Thum and Svenson developed in 1949 an approximate method to estimate the Stress concentration factor at one tension-loaded rod with the superimposed (overlapping) notches. This method is used in many teaching books. From today's perspective, the suitability of the results obtained from this approach appears to be urgently to check. This paper presents new results with the finite element method (FEM) to the tensile rods with semicircular notch and layered cross hole. The results showed that the calculation according to [1] is vitiated by gaps. Their approach is afflicted by a large percentage deviation to the FEM results.

Stichwörter: Halbkreisnut, Querbohrung, FEM, Mehrfachkerbwirkung, Formzahlen.

Keywords: semicircular groove, cross hole, FEM, multiple notch-effective, stress concentration factors.

1 Einander sich durchdringende Kerbwirkungen

Durchdringungskerbten sind dadurch gekennzeichnet, dass eine Kerbe eine andere Kerbe in Richtung ihres größten Spannungsgefälles durchdringt. Die Einzelkerben liegen so ineinander, dass sich ihre Störungen bezüglich des Spannungsverlaufes merklich überschneiden und ihre Kerbwirkungen überlagern, [1, 2, 3]. Bei Durchdringungskerbten kommt es häufig vor, dass die resultierenden Formzahlen infolge der gegenseitigen Kerbbeinflussung höher liegen gegenüber den Formzahlen der Einzelkerben [4, 5]. Diese Berechnungsansätze sind auf [1, 6] zurückzuführen. Diese örtliche starke Steigerung der Spannungskonzentrationen setzt die Dauerfestigkeit von dynamisch beanspruchten Bauteilen wesentlich herab. Solche Kerben sind eine im Maschinenbau verhältnismäßig häufig vorkommende Form mehrfacher Kerbwirkung. Zahlreiche Untersuchungen widmeten sich dem Problem der einzelnen typischen Kerbformen bei Getriebewellen, dagegen liegen in der Fachliteratur sehr weniger Ergebnisse zu den Durchdringungskerbten und deren Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Wellen vor. Mit Hilfe von FEM-Berechnungen kann man bei ausreichender Vernetzungsqualität die Formzahlen an kritischen Stellen von Bauteilen mit Durchdringungskerbten mit definierbarem Nettoquerschnitt bestimmen [3].

2 Bestimmungsmöglichkeit der Formzahl nach Thum- Svenson

Wenn von den Einzelkerben der Spannungsverlauf und die Spannungsüberhöhung bekannt sind, lassen sich in einfachen Fällen die resultierende Formzahl und der Spannungsverlauf in der Umgebung der Durchdringungskerbe abschätzen. Die betrachteten dicken Stäbe mit rechteckigen Querschnitten nach [1] beinhalten eine beiderseitige halbkreisförmige Nut mit überlagerter durchgehender Querbohrung. Das entwickelte Näherungsverfahren lässt sich am in Bild 1 gezeigten Beispiel erläutern. Ähnliche oder leicht modifizierte Näherungen werden z.B. in [7, 8] aufgeführt. Zur praktischen Anwendung des Verfahrens werden hier zwei unterschiedliche Geometrien betrachtet, zum einen handelt es sich um den zugbelasteten Balken mit beidseitiger Halbkreisnut und zum anderen um die theoretisch quergebogenen Ersatzplatte mit zentrischer Bohrung. Die Breite der Ersatzplatte gemäß Bild 1 entspricht der Stabdicken h , ihre Dicke h_p wird nach [9, 10] durch Anlegen der Tangente an die Spitze der gemessenen Spannungsverteilungskurve bestimmt, sie ist angenähert gleich dem Kerbradius der Halbkreisnut. Dabei muss man drei wesentliche Bestimmungsgrößen kennen, nämlich die Formzahl der Halbkreisnut, ferner deren Spannungsgefälle und schließlich die Formzahl der Ersatzplatte.

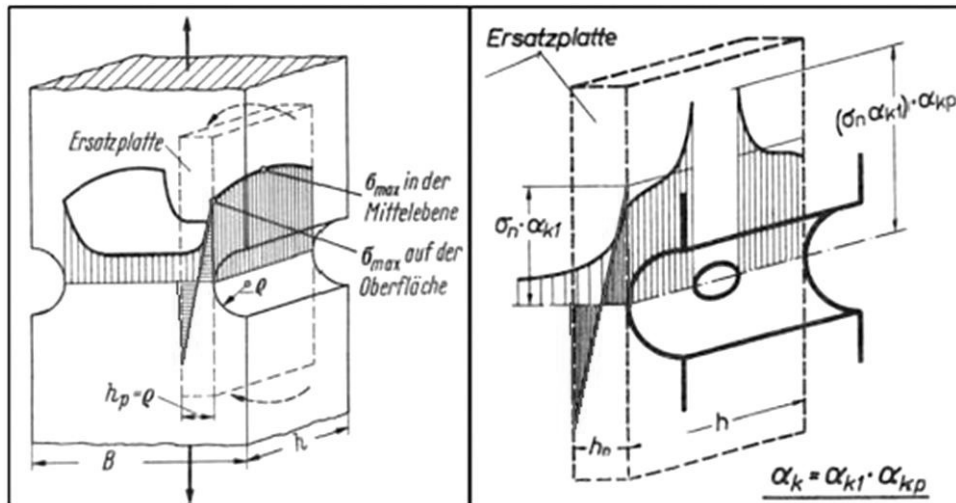


Bild 1: Spannungsverteilung in Kerbnähe am unter Zug beanspruchten und beiderseitig genuteten Stab sowie die gedachte biegebeanspruchte Ersatzplatte (links) und der Stab mit zusätzlicher Querbohrung in der Mitte der Nut und die vergrößerte durchbohrte Ersatzplatte (rechts), nach [1]

Die Formzahl α_k des doppelt gekerbten Zugstabes ergibt sich somit als Produkt aus der Formzahl α_{k1} der Rundnut bei Zugbelastung und der Formzahl α_{kp} der in der Mitte durchbohrten Ersatzplatte bei der Querbiegung zu $\alpha_k = \alpha_{k1} \cdot \alpha_{kp}$. Das thum'sche Verfahren beschränkt sich nur auf den zugbelasteten Stab. Für die Belastungsarten Torsion oder Biegung liegen bisher keine Näherungen vor. Die Überlegung hinter dieser Methode kann laut Thum [11] auch zur Berechnung der Spannungserhöhung durch radiale Bohrungen in dickwandigen Hohlzylindern unter der Wirkung von Drücken oder Fliehkräften, sowie in dicken gekrümmten Stäben, die auf Biegung beansprucht werden, verwendet werden kann. Das Verfahren lässt sich am besten durch ein Beispiel erklären. Wenn die geometrischen Verhältnisse $B/H = 1,45$; $d/H = 0,364$; $d/r = d/h_p = 1,2$; $d/B = 0,25$; $r/B = 0,208$ ($B = 24\text{mm}$; $H = 16,5\text{mm}$; $d = 6\text{mm}$ und $r = h_p = 5\text{mm}$) vorliegen, dann ergeben sich mit der sinngemäßen Verwendung der angewendeten Bezeichnungen folgende Zahlenwerte: $\alpha_{k1} = 1,71$ nach [8] für den zugbelasteten Stab mit beidseitiger Halbkreiskerben. $\alpha_{kp} = 1,70$ nach [8, 12] für die biegebeanspruchte durchbohrte Ersatzplatte. Durch Multiplikation beider Formzahlen ergibt sich die resultierende Formzahl der Durchdringung $\alpha_k = \alpha_{k1} \cdot \alpha_{kp} = 1,71 \cdot 1,70 = 2,907$. Die Messung von Thum ergab den Wert $\alpha_k = 3,23$ mit einer Abweichung von ca. -10%. Die numerische Berechnung liefert die Formzahl $\alpha_k = 3,10$, einen im Bereich der Genauigkeit als gleich anzusprechenden Wert (um knapp 4% kleineren Wert).

3 Numerische Ergebnisse

Die günstigen Verhältnisse bei der in [1] untersuchten Geometrie erwecken den Anschein, dass die thum'sche Annahme auch auf andere Verhältnisse übertragbar sei. Um dieser Hypothese auf den Grund zu gehen, wurden zahlreiche FEM-Untersuchungen durchgeführt.

Die Finite-Element-Methode (FEM) eignet sich bei einwandfreier Implementierung der Randbedingungen hervorragend zur Untersuchung der Kerbspannungen, auch bei komplizierten Bauteilen und Lastfällen, und bietet dafür geeignete Lösungen an, [5]. Die Untersuchungen zu den oben genannten Kerbkombinationen wurden mit der Software PTC Simulate 2.0 durchgeführt. Die zugrunde gelegte Nennspannung für die Bestimmung der Formzahl wurde stets auf den geringsten gefährdeten Querschnitt bezogen. Um eine Einschätzung der Genauigkeit der mit dieser Software gewonnenen Ergebnisse zu ermöglichen, wurden Konvergenzuntersuchungen durchgeführt. Zusätzlich wurde das Programm Ansys Workbench zum Vergleich der Ergebnisse verwendet. Die Auswertung der Formzahlen [5] geschah je nach vorhandenen Materialeigenschaften (spröde bzw. duktil) getrennt nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) und der Normalspannungshypothese (NSH).

Je Untersuchung wurden die Geometrieverhältnisse B/H , b/B betrachtet. Um die Querbohrung und die Halbkreisnut mit einfließen zu lassen, wurden weiterhin für jedes B/H und b/B das Verhältnis d/H sowie das Verhältnis r/B variiert, siehe Bild 2.

Stabdicke zur Stabbreite $B/H = 0,5; 1; 1,25; 1,5; 2$

Kerbgrundabstand zur Stabdicke $b/B = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$

Querbohrungsdurchmesser zur Stabbreite $d/H = 0,04; 0,18; 0,28; 0,40; 0,50; 0,60$

Halbkreisnutradius zu Stabdicke $r/B = 0,30; 0,25; 0,20; 0,15; 0,10$ und $0,05$.

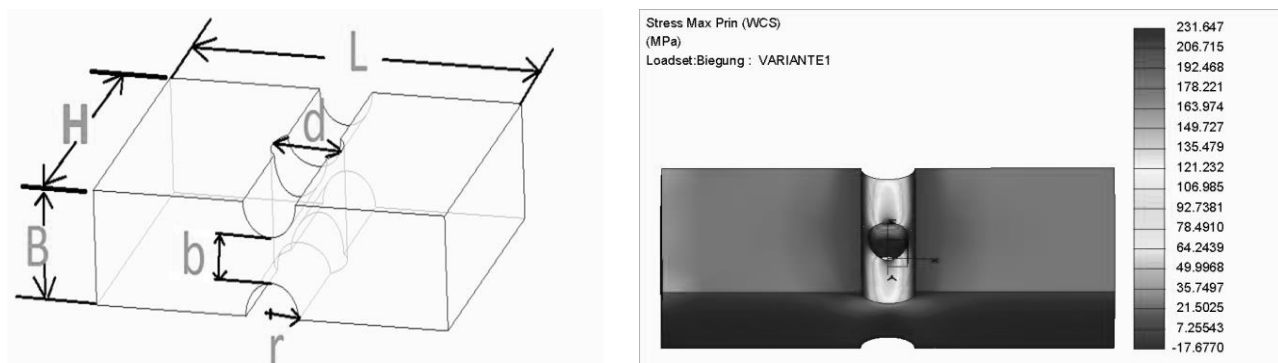


Bild 2: Berechnungsmodell eines zugbelasteten Stab mit beiderseitiger Halbkreisnut und zusätzlicher Querbohrung (links), und Spannungsverteilung nach der NSH (rechts)

Bild 3 zeigt einen Vergleich zwischen den mit der FEM errechneten Formzahlen und den nach Thum bestimmten Werten. Die Einzelformzahlen α_{k1} (Zugstab mit beidseitiger Halbkreisnut) und α_{kq} (Ersatzplatte mit Querbohrung unter Biegung) wurden aus den Diagrammen in [8, 12] ermittelt und mit den FE-Ergebnissen verglichen. Die nach Thum berechnete Gesamtformzahl wird dann mit dem FE-Ergebnis für die Kerbkombination unter Zugbelastung verglichen und die prozentuale Abweichung ermittelt.

In Bild 4 sind die sich aus FEM ergebenden Formzahlverläufe für die Verhältnisse $B/H = 0,5$ und 1 exemplarisch dargestellt. Die Formzahlwerte für die Kerbkombinationen sind bei der Auswertung nach der GE-Hypothese oder der NS-Hypothese gleich.

Für die Kerbkombination bei einem Seitenverhältnis $B/H = 0,5$ (siehe Bild 3) treten Abweichungen von bis zu 35% auf. Die Größe der prozentualen Abweichung hängt von den verwendeten Geometrieverhältnissen (B/H , b/B und d/H) ab. Sie nimmt mit zunehmendem Verhältnis d/H zu.

4 Zusammenfassung

Die genaue Kenntnis des Einflusses der Kerbwirkung an Durchdringungskerben und deren Minderung bildet eine gute Grundlage für eine treffsichere Festigkeitsberechnung und ermöglicht das gewichtsoptimierte Konstruieren. Das von [1] vorgeschlagene Verfahren zur Ermittlung der Kerbspannungen in Durchdringungskerben mit Hilfe einer einfachen Formel lässt sich nach Meinung des Verfassers generell nicht anwenden, wenn für die Einzelkerben unterschiedliche Geometrieverhältnisse vorliegen. In diesem Fall lässt sich beim Zusammentreffen der Einzelkerben ein neuer Spannungszustand ausbilden, der sich nicht in die Spannungsfelder der Einzelkerben zerlegen lässt. Aus diesem Grund führt auch die vereinfachte additive Überlagerung der Einzelkerben, wie sie in [8] vorgeschlagen wird, nicht zu brauchbaren Ergebnissen. An dieser Stelle kann nur empfohlen werden, die Formzahlen aus den in diesem Bericht mitgelieferten Diagrammen zu ermitteln. Es kann aber auch die folgende neu entwickelte Näherungsformel verwendet werden, wobei Abweichungen zu den FEM-Werten nach oben von bis zu 10 % entstehen können.

$$\alpha_{\sigma, zd, Ddk} = 5,8 \cdot \left(\frac{d}{H}\right)^2 - 6 \cdot \left(\frac{d}{H}\right) + 4,28 \cdot \left(\frac{b}{B}\right)^2 - 2,1 \cdot \left(\frac{b}{B}\right) + 4,28 \quad (1)$$

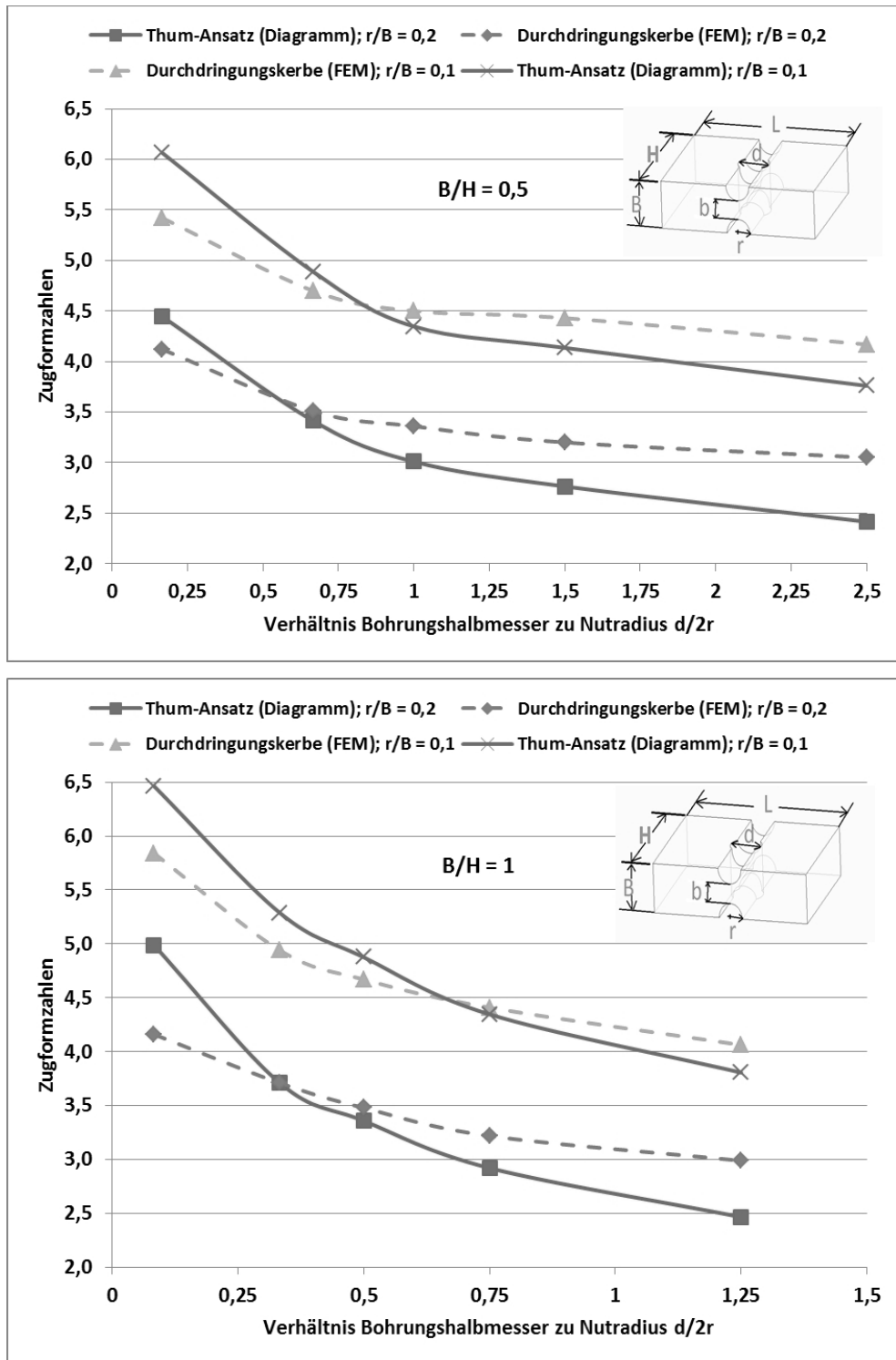


Bild 3: Darstellung eines exemplarischen Vergleichs zwischen den mit der FEM ermittelten Zug-Formzahlen und den nach [1] bestimmten Formzahlwerten in Abhängigkeit vom Verhältnis $d/2r$, für das Zusammentreffen einer Halbkreisnut mit einer Querbohrung, bei zwei verschiedenen r/B -Verhältnissen ($r/B = 0,1$ und $0,2$) und einem Seitenverhältnis $B/H = 0,5$ (oben) bzw. $B/H = 1$ (unten)

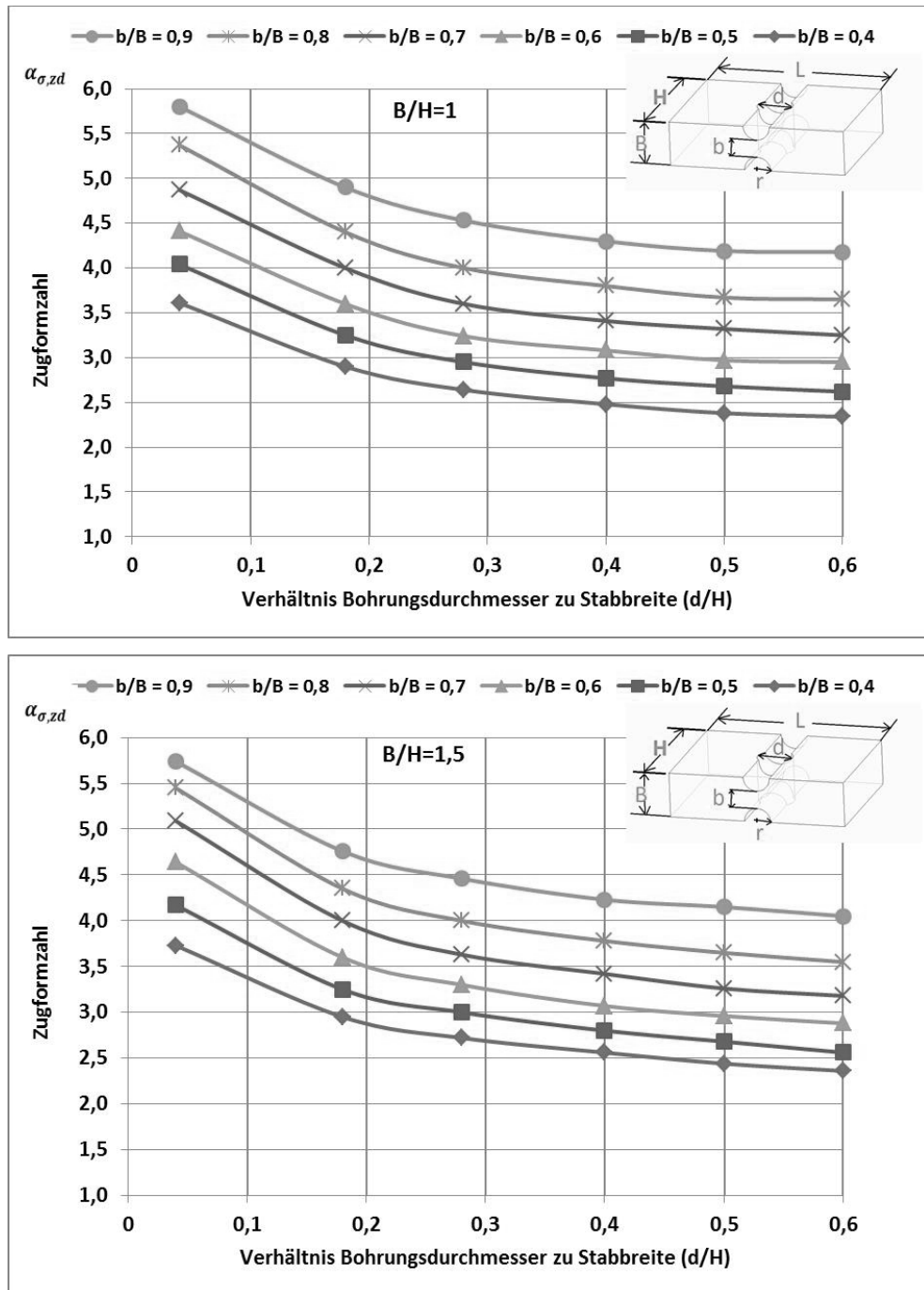


Bild 4: Darstellung der sich mit der FEM ergebenden Zug/Druck-Formzahlverläufe in Abhängigkeit vom Verhältnis d/H , für das Zusammentreffen einer Halbkreisnut mit einer Querbohrung an einem Zugstab, bei unterschiedlichen b/B -Verhältnissen, bei einem Seitenverhältnis $B/H = 1$ (oben) bzw. $B/H = 1.5$ (unten)

Literatur

- [1] Thum, August; Svenson, Otto: Beanspruchung bei mehrfacher Kerbwirkung. Entlastungs- und Überlastungskernen. Schweizer Archiv, Angew. Wiss. Technik 15. (1949), Nr. 6, S. 161–174
- [2] Puchner, O.; Kamensky, A.: Spannungskonzentration und Kerbwirkung von Kerben im Kerbrand. Konstruktion 24 (1972) Heft 4, S. 127-134

- [3] Daryusi, Ali: FEM-Untersuchungen zur Überlagerung von konstruktiven Mehrfachkerben beim Zusammentreffen von Zahnwellen mit Sicherungsringnuten. 5. VDI-Fachtagung für Welle-Nabe-Verbindungen in Nürtingen bei Stuttgart, 25. und 26.09.2012, VDI-Berichte 2176, VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf 2012
- [4] DIN 743-2. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen, Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Beuth Verlag, 2012
- [5] Daryusi, A.: Beitrag zur Ermittlung der Kerbwirkung an Zahnwellen mit freiem und gebundenem Auslauf. Dissertation, TU Dresden, 2008
- [6] Herold, Wilfried: Die Wechselfestigkeit metallischer Werkstoffe. Ihre Bestimmung und Anwendung. Wien: Verlag von Julius Springer 1934. – ISBN 978-3-7091-5920-0
- [7] Vagapov, P. D.; Sisorina, O. I.: Effekt nalozenija koncentraciji naprjazenij pri dejstviji peremennych nagruzok. (Titel ist übersetzt) Die Auswirkung von überlagerten Spannungskonzentrationen bei schwingender Beanspruchung. Moskau: Izd. Ak. Nauk SSSR (1959), S. 36/51
- [8] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt/Main: VDMA-Verlag, 4. Erweiterte Ausgabe, 2002. – ISBN 3-8163-0424-9
- [9] Siebel, E.; Stieler, M.: Ungleichförmige Spannungsverteilung bei schwindender Beanspruchung. VDI-Z 97 (1995) Nr. 5, S. 121-126
- [10] Daryusi, Ali: Zur Bestimmung des bezogenen Spannungsgefälles bei Zahnwellen mit freiem Auslauf. 5. VDI-Fachtagung für Welle-Nabe-Verbindungen in Nürtingen bei Stuttgart, 25. und 26.09.2012, VDI-Berichte 2176, VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf 2012
- [11] Thum, August; Petersen, C.; Svenson, Otto: Verformung, Spannung und Kerbwirkung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1960
- [12] Thum, August; Svenson, Otto: Die Verformungs- und Beanspruchungsverhältnisse von glatten und gekerbten Stäben, Scheiben und Platten in Abhängigkeit von deren Dicke und Belastungsart. Forschung, Band 13, Heft 1, Berlin, Januar/Februar 1942
- [13] Parametric Technology Corporation: Creo Parametric 2,0 Simulate. 2012
- [14] CADFEM GmbH: Ansys Workbench 17,0

FEM-Modell der grundlegenden Vorgänge einer Anlage zum Zerlegen metallisch umhüllter Bauteile

Max Prumbohm, David Chorzewski, Armin Lohrengel

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal

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

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

Inhalt: Um die Tiefe der wirtschaftlichen Aufbereitung von elektronischen Bauteilen zu verbessern, wird am Institut für Maschinenwesen an der Entwicklung eines automatischen und kontinuierlichen Zerlegungsverfahrens gearbeitet. Statt einer herkömmlichen Zerkleinerung, werden Bauteile mit Blechhülle in die Bestandteile zerlegt. Ziel ist eine Aufkonzentration der Bestandteile, die die Zielelemente enthalten. Das Verfahren ist stark von der Werkzeuggestaltung abhängig, eine breite Untersuchung verschiedener Parameter in der Praxis ist aufgrund der großen Anzahl aufwendig und teuer. Zur zielgerichteten Untersuchung soll ein Modell mittels Finite Elemente Methode mit expliziter Dynamik erstellt werden und erste Ergebnisse aus diesem abgeleitet werden.

Abstract: To improve the depth of the economic recycling of electronic components Institute of mechanical engineering of Clausthal University of Technology is working on an automatic and continuous separation procedure. Instead of a conventional crushing, the disassembling of components with sheet metal cover is the aimed. The procedure depends very much on the tool design, a wide investigation of various parameters in practice is complicated and expensive due to the large number of tools. To focus these studies a model using finite element method with explicit dynamics was the aim and first results are shown in the following.

Stichwörter: Recycling, Seltene Erden, Wertstoffrückgewinnung, Elektroschrott, Blechumhüllte Bauteile, Aufkonzentration, Anlagenentwicklung, FEM-Modell

Keywords: recycling, disassembling, WEEE, metalcoated products, accumulation, product development, FEM

1 Einleitung

Mit zunehmendem Rohstoffbedarf nimmt das Interesse an einer Steigerung der Rückgewinnungsquote von Wertstoffen aller Art zu. Dazu gehören insbesondere die große Anzahl der Elemente, deren Rückgewinnungsquoten noch unter 5 % liegen, wie Indium, Germanium und Tantal [1]. Diese Elemente sind häufig für die Funktion von Elektro- und Elektronikbauteilen notwendig, aber nur in geringem Maße in den einzelnen Bauteilen enthalten. Am Ende des Lebenszyklus werden diese Bauteile im englischen mit „Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)“ bezeichnet. Aktuell werden solche Bauteile nach einer Erstbehand-

lung, die eine Erkennung, Sortierung und Entnahme von Schadstoffen umfasst, mit herkömmlichen Verfahren zerkleinert [2]. Bei der Zerkleinerung entstehen Massenströme, in denen die in geringem Maße enthaltenen Wertstoffe in hohem Maße mit den übrigen Stoffen vermischt sind. Die großen Stofffraktionen, wie Kunststoff, Fe-Metalle und Nicht-Fe-Metalle, lassen sich lohnenswert aus den Stoffströmen separieren und wiederverwerten. Für die Zielelemente ist das aktuell nicht wirtschaftlich möglich, sie gehen der Kreislaufwirtschaft verloren. Die Alternative zur Zerkleinerung ist die manuelle Demontage. Diese erleichtert zwar die Rückgewinnung aller Stoffe, indem die Leiterplatten mit wenigen Störstoffen entnommen werden können und einer weiteren Verarbeitung zugeführt werden können. Allerdings ist dieses Vorgehen sehr zeitintensiv und lohnt sich in den meisten Fällen aus wirtschaftlicher Sicht nicht.

In die Lücke zwischen diesen beiden Vorgehensweisen zielt die Entwicklung eines neuartigen, kontinuierlichen und automatischen Zerlegungsprozesses für blechummantelte Bauteile auf Basis des Prinzips des Profilwalzenreißers am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal ab. Als konkretes Beispiel für blechumhüllte WEEE-Bauteile dienen KFZ-Steuergeräte, deren stark zunehmende Anzahl je Fahrzeug eine gezielte Zerlegung und Aufbereitung attraktiv werden lässt. Hierbei hat das Zusammenspiel von einer Vielzahl von Parametern einen großen Einfluss auf den Erfolg der Zerlegung. Mit dem Ziel einer zuverlässigen Anlagenauslegung und der Verbesserung der Prozessqualität werden neben praktischen Versuchen analytische Betrachtungen sowie eine Modellentwicklung angestellt.

2 Verfahrensprinzip

Im Folgenden wird das Verfahrensprinzip des Zerlegungsprozesses basierend auf der Funktionsweise eines Profilwalzenreißers erläutert und die beiden wesentlichen Prozessschritte in die Gliederung der Fertigungsverfahren eingeordnet.

2.1 Profilwalzenreißer

Das Zerlegen der Bauteile basiert auf dem Prinzip eines Profilwalzenreißers, im englischen „profiled roll crusher“. Dabei rotieren zwei parallel angeordnete und mit scharfen Werkzeugen bestückte Walzen gegenläufig in einem definierten Abstand. In Abhängigkeit von der Gestaltung der Walzenoberfläche und der Geschwindigkeit der Walzen kommen zusätzlich zum Druck der Walzen noch Scherung und Schlag als ausschlaggebende Beanspruchungsarten hinzu. Die verschiedenen Möglichkeiten der Gestaltung der Walzenoberfläche sowie

der Verwendung von einzelnen Walzen ist in Bild 1 dargestellt. Grob lassen sich diese in Glatt- und Profilwalzen ordnen.

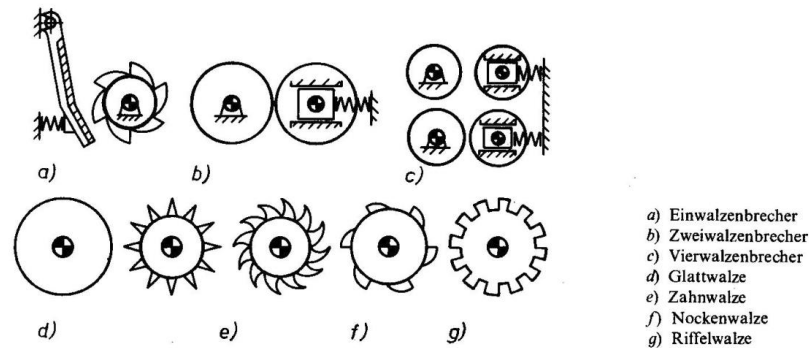


Bild 1: Einteilung der Walzenbrecher [3]

Profilwalzenbrecher umfassen Zahn-, Nocken-, Flügel-, Stachel- und Riffelwalzenbrecher. Eingesetzt werden diese neben der Zerkleinerung von mittelharten bis weichen Stoffen auch zur Bearbeitung von harten Einschlüssen in plastischen Werkstoffen. Üblich sind Umdrehungsgeschwindigkeiten von 2 – 10 m/s [3]. Bevor es zum Zerlegen eines Bauteiles kommen kann, muss ein gewisser Teil der Werkzeuge die Blechhülle durchdringen und mit den Werkzeugen in der Blechhülle in Eingriff geraten. Durch die Breite der Werkzeuge und die Duktilität des Blechwerkstoffes wird das Blech in diesem gehalten und im Zuge der fortschreitenden Rotation das Bauteil zerlegt, siehe im Ergebnis in Bild 2.



Bild 2: Werkzeuge haben die Bauteilhülle vollständig durchdrungen und befinden sich im Eingriff

2.2 Einordnung des Schneidvorganges

Für die Bestimmung von Werkzeuggestalt und –größe werden die theoretischen Grundlagen für das Durchdringen und Reißen von Blechen aus der Fertigungstechnik als Grundlage

für die Berechnungen betrachtet. Zur Einordnung des Vorgangs beim Durchdringen der Bauteilhülle wird das Ordnungssystem der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [4] herangezogen. In dieser Ordnung lässt sich das Einschneiden der Werkzeuge in die Hauptgruppe 3 „Trennen“ einordnen, genauer in der Gruppe 3.1 „Zerteilen“. Diese wird in DIN 8588 [5] beschrieben und gliedert sich in die Untergruppen „Scher-“, „Messer-“ und „Beißschneiden“ sowie „Spalten“, „Reißen“ und „Brechen“. Von diesen weist das drückend, einhubige Schneiden entsprechend der Darstellung in Bild 3 deutliche Ähnlichkeit mit dem ersten Prozessschritt auf.

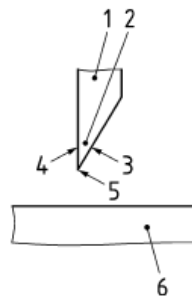


Bild 3: Messerschneidwerkzeug (1 Messer; 2 Schneidkeil; 3 Schneidfläche - Druckfläche; 4 Schneidfläche - Freifläche; 5 Schneide; 6 Auflage) [5]

Unter „Reißen“ wird als Zerteilen unter Zugbeanspruchung definiert, welche in erster Linie dem zweiten Prozessschritt entspricht. Neben dieser Einordnung bietet die Untergruppe 3.1.5 „Reißen“ mit „Stechen“ eine weitere Beschreibung: „Einreißen eines Loches von rundem oder sonstigem Querschnitt, verbunden mit Umformen von Rändern zu Kragen, Zacken usw.“. Diese Beschreibung kommt dem Charakter des ersten Prozessschrittes der Anlage ebenfalls nahe.

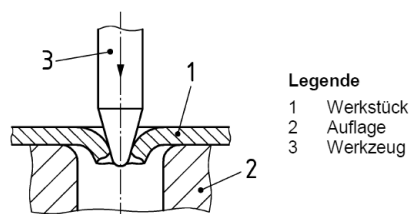


Bild 4: Stechen [5]

Wie in Bild 4 erkennbar ist, wird die Auflage beim „Stechen“ nicht unmittelbar an der Formung der Öffnung beteiligt, sondern dient erst in zweiter Linie zur Verminderung von Verformungen des Werkstückes. Die Zielbauteile weisen solche Gegenform selten auf, eine

starke Verformung der Blechhülle muss durch einen engen Spalt zwischen den Werkzeugwalzen gewährleistet werden.

3 Analytische Berechnung

Nach der Erläuterung und Einordnung des Verfahrens werden im Folgenden die Grundlagen zur rechnerischen Auslegung der Werkzeuge dargelegt.

3.1 System Werkzeug – Bauteil beim Eindringen in das Blech

Das Prozessergebnis, also die erfolgreiche Zerlegung eines blechummantelten Bauteiles, hängt im Wesentlichen vom Eingriff der Werkzeuge in der Blechhülle ab. Dieser erfolgt im Zuge der Rotation der Werkzeugwalzen. Die angestellten Werkzeuge berühren und durchdringen die Blechhülle in einem ersten Schritt. In der selbst geschaffenen Öffnung geraten die Werkzeuge in den erforderlichen Eingriff oder reißen aus. Die Werkzeugstellung beeinflusst den Kraftaufwand und die Beanspruchung beim Eindringen zum Einen, als auch das Entstehen eines belastbaren Eingriffs und damit das Zerlegungsergebnis. Durch eine angewinkelte Position zur Senkrechten der Kreistangenten wird ein nahezu senkrechtres Eindringen in die Blechhülle gewährleistet, siehe Bild 5, und vor allem ein belastbarer Eingriff. Je näher die Werkzeuge an der Tangentensenkrechten positioniert sind, desto eher rutschen sie im Verlauf der Umdrehung aus der selbst geschnittenen Öffnung im Blech wieder heraus. Je näher die Werkzeugspitzen an der Kreistangente positioniert sind, desto eher entsteht ein belastbarer Eingriff.

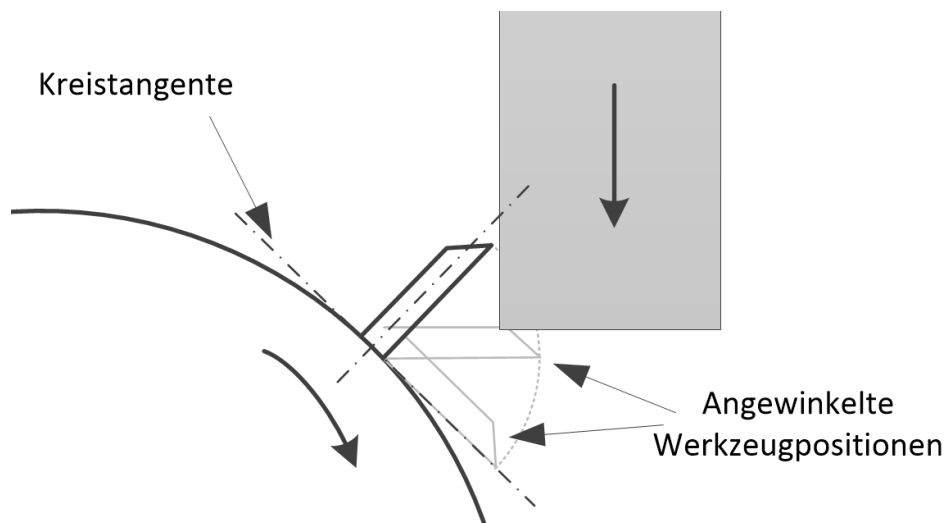


Bild 5: Werkzeugposition

Der Auftreffwinkel des Werkzeuges in Bezug auf das Bauteil hängt neben der Position auf dem Werkzeugträger vom Abstand der Walzen, sowie von der Umdrehungsgeschwindigkeit ab. Ein nicht-senkrechtes Auftreffen des Werkzeuges auf die Bauteiloberfläche führt zu einem Aufspalten der Schneidkraft in eine Schub- (F_T) und eine Normalkomponenten (F_{ZN}) zur Folge haben, siehe Bild 6.

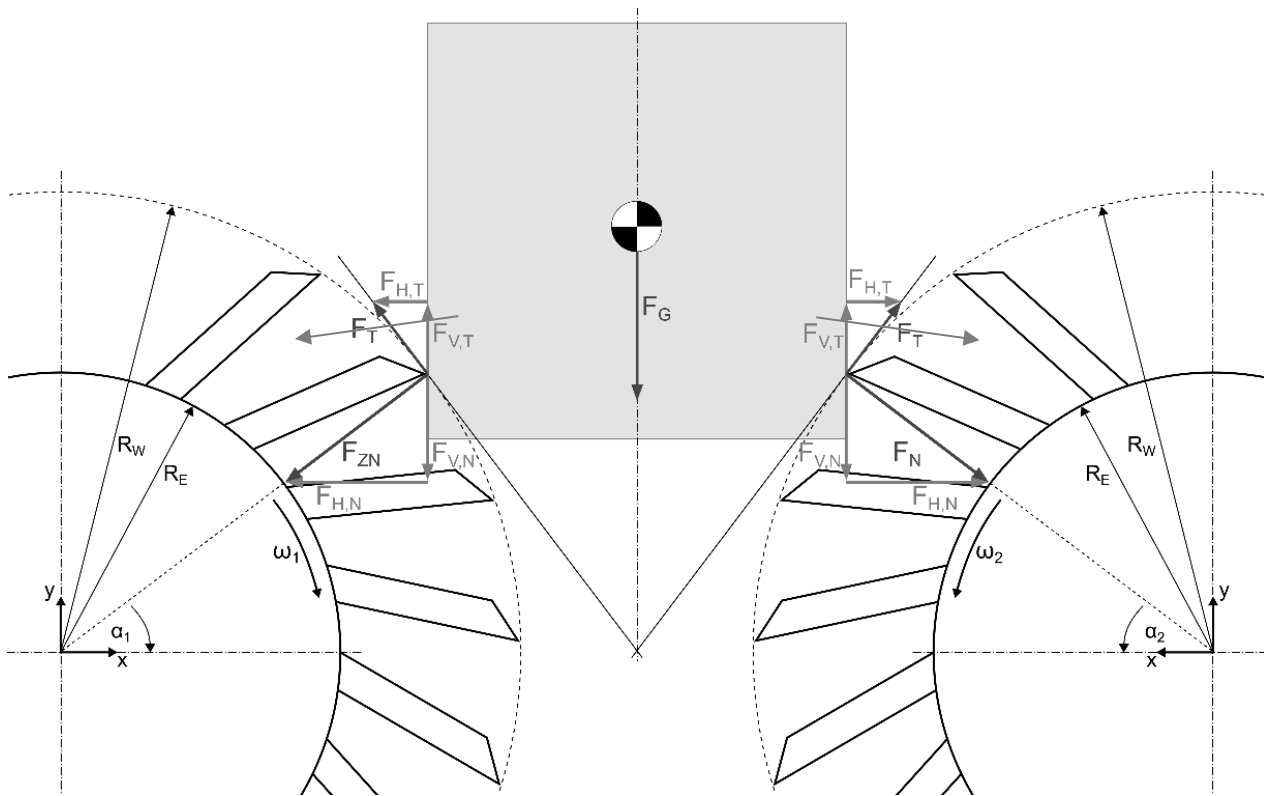


Bild 6: Kräfte an den Werkzeugspitzen im Moment des Einschneidens (die Verformung der Blechhülle wird in dieser Darstellung vernachlässigt)

Eine senkrechte Position des Werkzeuges auf die Oberfläche des Bauteils ist in der Praxis nicht immer gewährleistet, wird aber häufig in Näherung erreicht. Für die Berechnung wird daher ein senkrecht Eindringen als Annahme getroffen.

$$F_N = F_S \text{ und } F_T = 0 \quad (1)$$

Somit lassen sich die Formeln aus der Fertigungstechnik zur Ermittlung der resultierenden Schneidkräfte anwenden.

3.2 Schneidkraftbestimmung

Nach Einteilung des Prozesses wird als Grundlage der Berechnung die Ermittlung der Schneidkraft nach den Formeln für das „Messerschneiden“ verwendet. Das Werkzeug wirkt entsprechend der Schneidlänge und durchtrennt das Blech:

$$F_s = l \cdot s \cdot k_s \quad (2)$$

Mit F_s = erforderliche Schneidkraft; l = Schneidenlänge; s = Blechstärke / Schnitttiefe; k_s = Werkstoffkennwert (Zugfestigkeit) [6, 7].

Die Abschätzung der Parameter erfolgt mit Rücksicht auf die zu erwartende Vielzahl an Blechwerkstoffen mit der Berücksichtigung von S235 ($R_m = 360$ MPa) und S355 ($R_m = 510$ MPa). Im Modell wird vorerst mit einer Blechstärke von $s = 0,8$ mm sowie vier verschiedenen Schneidbreiten gearbeitet, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Parameterbereiche zur Untersuchung

Schneidlänge	F_s (S235)	F_s (S355)
6 mm	1400 N	1960 N
8 mm	1850 N	2610 N
10 mm	2300 N	3260 N

Eine Schwierigkeit bei der Bestimmung der zu erwartenden Schneidkraft liegt in den unbekannten und zahlreich zu erwartenden Blechwerkstoffen, die die Zielbauteile umgeben. Daher wird ein Material mit relativ hoher und ein geringer Zugfestigkeit angenommen. Bei Nutzung von Werkzeugen mit maximaler angenommener Schneidlänge ($l = 10$ mm) ergeben sich Schneidkräfte bis zu 3,3 kN je Werkzeug. Dieser Wert wird für die Überprüfung der Festigkeit angenommen. Die Werkzeuge sind so ausgelegt, dass sie die maximale Schneidkraft sowohl als reine Druckkraft, als auch im Falle eines angewinkelten Auftreffens mit einer Schubkomponente und einem daraus resultierenden Biegemoment aushalten.

4 FE-Modellierung des Systems Werkzeug - Bauteil

Im vorgestellten, ersten Modellansatz wird das Durchdringen der Blechhülle durch ein Werkzeug mittels expliziter Dynamik dargestellt. Ziel ist es die Vorgänge beim Verformen und Durchdringen der Blechhülle dynamisch darzustellen und die dabei wirkenden Belastungen auf das Blech zu ermitteln.

4.1 Aufbau und Randbedingungen des FEM-Modells

Betrachtet werden der Kontakt des Werkzeuges mit der Blechhülle und die Durchdringung dieser. Hierfür wird das Werkzeug translatorisch im rechten Winkel auf ein Blech mit einer Geschwindigkeit von 8 m/s hin bewegt. Dabei wird das Blech als verformbarer Körper mit einem bilinear elastisch-plastischen Materialmodell. Zusätzlich wird dem Blech ein Versagensmodell durch plastische Verzerrung zugrunde gelegt. Das Werkzeug wird als Starrkörper mit einer abgerundeten Spitze von 0,1 mm definiert. Letztere Annahme beruht darauf, dass eine ideale scharfe Kante in der Realität nicht existiert und durchgeführte Simulationen inkonsistente Werte der aufgewendeten Schneidkraft hervorbrachte. Weitere Randbedingungen sind im Bild 7 dargestellt.

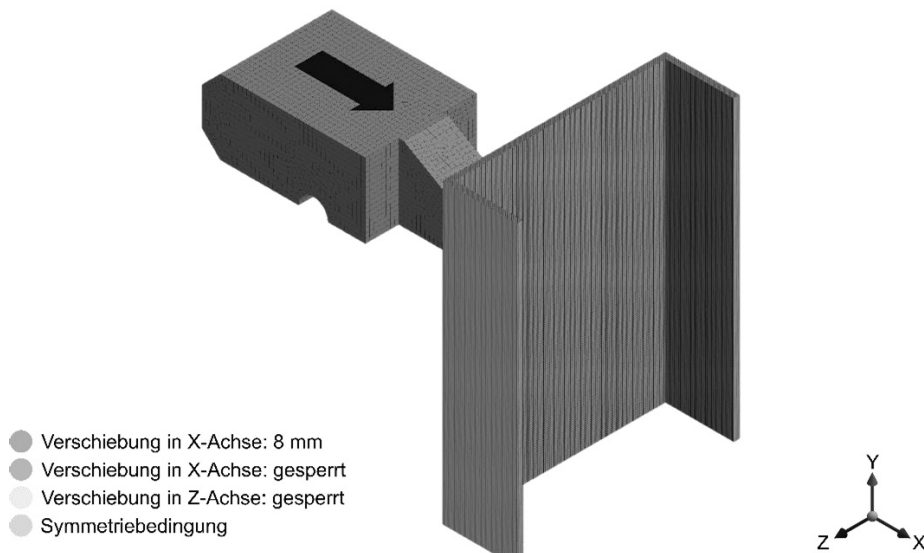


Bild 7: Werkzeugposition und Modellaufbau

4.2 Ergebnisse

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuchsanlage lässt sich das Durchdringen der Blechhülle mit dem FEM-Modell gut darstellen. Das Durchtrennen und Aufbiegen der Werkstoffe wird aufgrund der noch recht groben Vernetzung in den Trennbereichen schroffer dargestellt, als es in der Realität vorkommt. Der Werkstoff verformt sich während des freien Aufwickelns stärker als im Versuch, siehe im Vergleich Bild 8 und Bild 9.

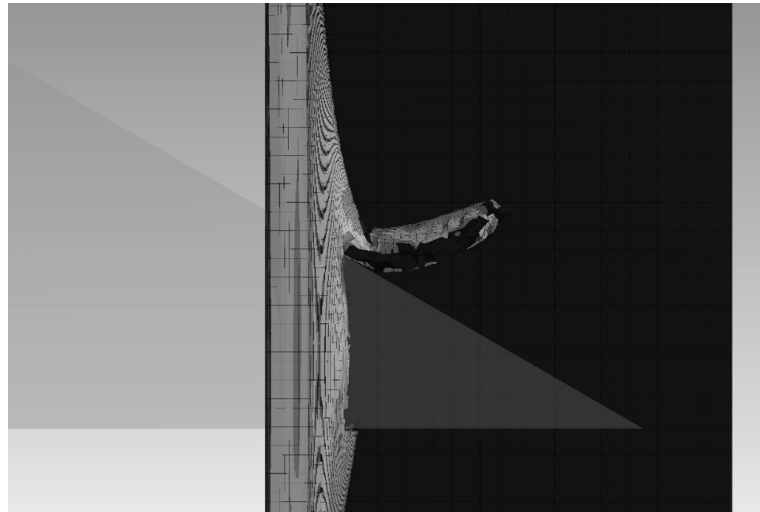


Bild 8: Modellierung des durchdrungenen Werkzeugs und der Blechverformung am Ausschnitt

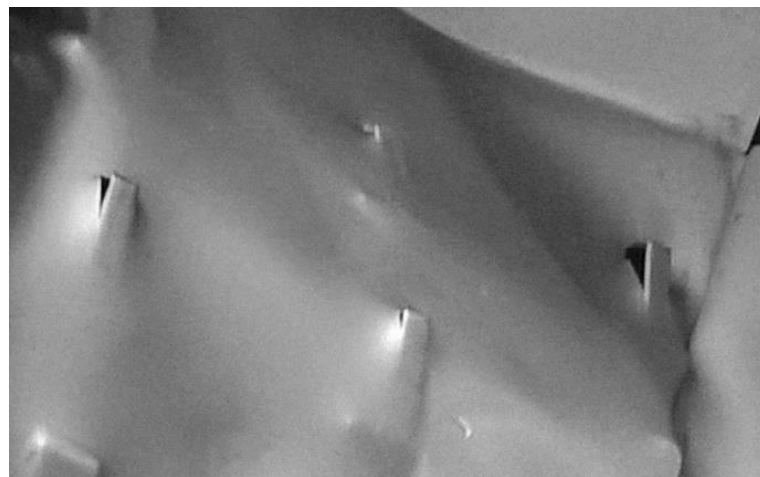


Bild 9: Blechhülle nach Werkzeugdurchdringung und erfolgreichem Eingriff

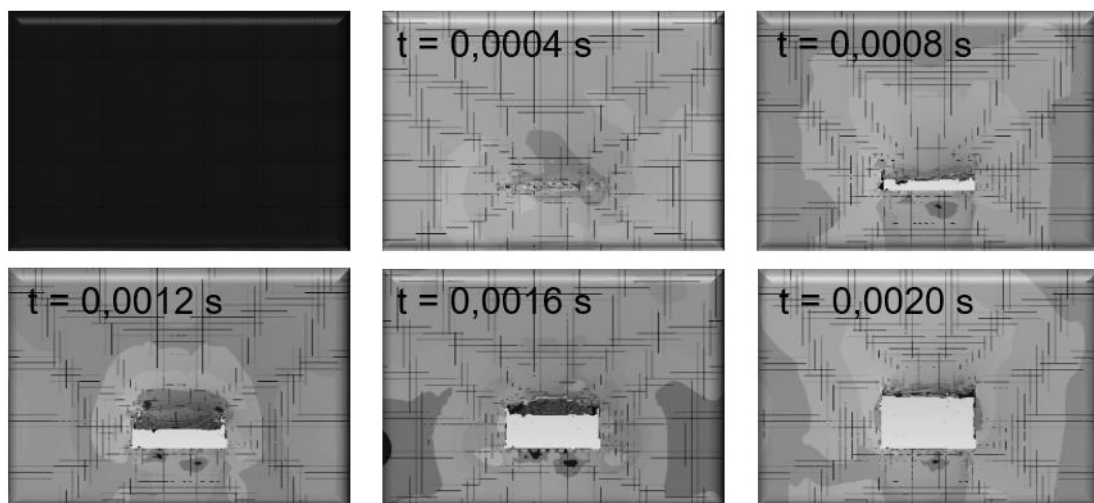


Bild 10: zeitlicher Verlauf des Durchdringungsvorgangs (Vorderseite der Blechhülle)

Die Abweichung der im Modell ermittelten Werte der Schneidkraft streut recht stark, eine Ursachenuntersuchung sowie eine möglichst konstante Abweichung sind für eine nachfolgende Modellanpassung anzustreben.

Tabelle 2: Mittels Modell berechnete Schneidkräfte

Schneidl. l	F _s (S235) (ohne Rundung)	Abw. in %	F _s (S355)	Abw. in %
6 mm	1647 N (1400 N)	19	1235 N (1960 N)	37
8 mm	976 N (1850 N)	47	1582 N (2610 N)	39
10 mm	802 N (2300 N)	65	1501 N (3260 N)	54

Der Hauptgrund für die Abweichung liegt in der Form der Werkzeugschneide sowie in der Gestaltung der Schneidspitze im Modell. Die analytische Berechnung wird in der Literatur als Abschätzung für Werkzeuge ohne Schrägen verwendet, eine Berücksichtigung von bis zu 5° erzielt eine deutliche Reduzierung von bis zu 2/3 der aufzuwendenden Schnittkraft (Romanowski, 1965).

5 Fazit und Ausblick

Bei einem Verfahren zum Zerlegen metallisch umhüllter Bauteile bildet die Werkzeugform und –position auf dem Werkzeugträger eine wesentliche Rolle für einen erfolgreichen Zerlegungsprozess. Ein erstelltes, dynamisches FEM-Modell ermöglicht das Untersuchen unterschiedlicher Prozessparameter mit dem Ziel der Reduzierung von zeit- und kostenintensiven praktischen Versuche auf ein Mindestmaß. Eine zentrale Fragestellung, die im Verlauf von weiterführenden Forschungen geklärt werden soll, beschäftigt sich mit der Frage der Werkzeugbreite. Schmale Werkzeuge haben den Vorteil einer geringen Schnittkraft je Werkzeug und damit einer geringeren Beanspruchung, aber auch die erhöhte Gefahr des Ausreißens aus dem Eingriff der Blechhülle. Breite Werkzeuge hingegen müssen eine höhere Beanspruchung aushalten und können nicht so zahlreich angewendet über dem Umfang eingesetzt werden, um das benötigte Antriebsdrehmoment nicht unnötig zu erhöhen. Die Ergebnisse des ersten Modellansatzes bieten eine optisch gute Simulation der realen Ergebnisse, liefern aber abweichende und vor allem stark schwankende Werte der auftretenden Schneidkräfte. Die Reduzierung der Schwankung sowie der anschließende Beginn von Parameterstudien, ist Inhalt weiterer Forschungsarbeit.

Literatur

- [1] UNEP, Graedel, T., Allwood, J., Birat, J.-P., Reck, B., Sibley, S., & Sonnemann, G. (2011). Recycling Rates of Metals - A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. UNEP, Paris.
- [2] Martens, H. (2011). Recyclingtechnik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- [3] Höffl, K. (1986). Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer-Verlag
- [4] Norm DIN 8580. Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung
- [5] Norm DIN 8588. Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [6] Hellwig, W., & Kolbe, M. (2012). Spanlose Fertigung Stanzen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien.
- [7] Romanowski, W. P. (1965). Handbuch der Stanzereitechnik (5. Auflage Ausg.). Berlin: VEB Verlag Technik,.

Methodische Analyse der Entwicklungsaktivitäten

Pascal Lünnemann, Wei Min Wang*, Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark*

Virtuelle Produktentstehung, Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Email: pascal.luenemann@ipk.fraunhofer.de; Internet: <https://ipk.fraunhofer.de>

*Fachgebiet Industrielle Informationstechnik, Technische Universität Berlin

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Email: w.wang@tu-berlin.de; Internet: <http://iit.tu-berlin.de>

Inhalt: Die Produktentwicklung ist gekennzeichnet durch eine traditionelle Intransparenz und zunehmende Komplexität an Abläufen und Informationsaustauschen. Zahlreiche Ansätze und Methoden sollen dabei helfen dem Komplexitätszuwachs entgegen zu wirken und die zahlreichen, für die Produktentwicklung benötigten Informationen für die Ingenieure greifbar zu machen. Gleichzeitig treiben die zunehmende Vernetzung in kollaborativen Entwicklungen, zunehmende Funktionsumfänge der entwickelten Produkte und die Digitalisierung der Entwicklungsumgebungen die zu berücksichtigenden Informationen weiter in die Höhe. Die nachhaltige Gestaltung des Entwicklungsumfeldes gestaltet sich somit zunehmend schwierig. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden wurde auf Basis des „Betriebssystems der Entwicklung“ eine an Taylor und Gilbreth angelehnte Untersuchung der Entwicklungsaktivitäten in der Produktentwicklung durchgeführt. Das Modell, die durchgeführte Untersuchung und die identifizierten Aktivitäten werden im Rahmen dieser Veröffentlichung vorgestellt.

Abstract: Product development is characterized by a traditional intransparency and increasing complexity of processes and information exchanges. Numerous approaches and methods are intended to help counteract the increase of complexity and to make the numerous information needed for product development tangible for the engineers. At the same time, the increasing networking in collaborative developments, the increasing functional scope of the developed products and the digitization of the engineering environments continue to drive the information to be taken into account. The sustainable shaping of the development environment is therefore increasingly difficult. In order to meet this challenge, an analysis of engineering activities in product development based on the "operating system of development", based on Taylor and Gilbreth, was carried out. The model, the investigation carried out and the activities identified are presented in this publication.

Stichwörter: Entwicklungsaktivitäten, Entwicklungsumgebung, Beschreibungsmodell der Entwicklung.

Keywords: Engineering Activities, Engineering environment, Engineering Operation System.

1 Einleitung

Die Produktentwicklung ist geprägt von zahlreichen Treibern zunehmender Komplexität [1]. Verfügbare Technologien steigern den Funktionsumfang der zu entwickelnden Produkte

und verlangen somit eine zunehmende Einbindung von Experten der jeweiligen Fachgebiete [2]. Gleichzeitig hält der Trend verkürzter Produktlebenszyklen und schneller Innovationen an, sodass die Entwicklung in einer möglichst kurzen Zeit erfolgen sollte. Resultierend werden zunehmend mehr Personen in die Produktentwicklung eingebunden. Zum einen um die zunehmende Zahl notwendiger Experten einzubinden, zum anderen um die notwendigen Personalkapazitäten für eine verkürzte Entwicklung bereitzustellen. Mit der zunehmenden Zahl von Teilnehmern an der Entwicklung steigt auch der Anspruch zur Abstimmung der Entwicklungsumfelder der Beteiligten.

Gleichzeitig unterliegen auch die Entwicklungsumfelder selbst einer Neugestaltung [2, 3]. Im Rahmen der Digitalisierung werden zunehmend Funktionen in die IT-Systeme der Produktentwicklung gebracht mit dem Ziel den Entwicklern eine möglichst effektive Arbeitsumgebung bereit zu stellen.

Um die Vorgänge der Entwicklung tatsächlich verstehen zu können ist eine detaillierte Analyse des Systems Entwicklungsumfeld notwendig. Der Idee Frederick Winslow Taylor [4] folgend, wird nachfolgend ein Ansatz vorgestellt, welcher eine wissenschaftliche Analyse der Entwicklungsarbeit in ihren Details und Varianten propagiert. Dabei wird ergänzend auf die Analysetechniken von Frank und Lillian Gilbreth [5] eingegangen, um darauf aufbauend, eine gezielte Optimierung des Entwicklungsumfelds zu ermöglichen.

Die Analyse erfolgt dabei auf Basis des „Betriebssystem der Entwicklung“ (Engl.: Engineering Operating System (EOS)), einem Modell zur Beschreibung der Produktentwicklung, mit dem Ziel die Systematik von Taylor und Gilbreths auf eine moderne digitalisierte Entwicklungsumgebung zu übertragen.

2 Wissenschaftliche Betriebsführung

Frederick Winslow Taylor gilt als einer der zentralen Pioniere einer systematischen Optimierung der Betrieblichen Abläufe [6]. In seinem Werk „Wissenschaftliche Betriebsführung“ (Scientific Management) erläutert Taylor die von ihm und seinen Mitstreitern erfolgreich durchgeführten Projekte zur Optimierung der Fertigungs- und Montagevorgänge und propagiert in dessen Rahmen Grundsätze der Betrieblichen Organisation [4]: „Die Leiter entwickeln ein System, eine Wissenschaft für jedes einzelne Arbeitselement, die an die Stelle der alten Faustregel-Methode tritt. Auf Grund eines wissenschaftlichen Studiums wählen sie die

passendsten Leute aus [...]. [Die Leiter] arbeiten in herzlichem Einvernehmen mit den Arbeitern [...] Arbeit und Verantwortung verteilen sich fast gleichmäßig auf Leitung und Arbeiter.“ [4]

Nach diesen Grundsätzen stellt Taylor eine Vorgehensweise vor um die seinerzeit verbreiteten „Faustregeln der Fertigung“ [4], geprägt durch die Wissensvermittlung zwischen Generationen der Fertigungsangestellten, durch wissenschaftliche Regeln zu ersetzen: „Erstens: Man suche 10 oder 15 Leute [...], die in der speziellen Arbeit, die analysiert werden soll, besonders gewandt sind.

Zweitens: Man studiere die genaue Reihenfolge der grundlegenden Operationen, welche jeder einzelne dieser Leute immer wieder ausführt, wenn er die fragliche Arbeit verrichtet, ebenso die Werkzeuge, die jeder einzelne benutzt.

Drittens: Man messe mit der Stoppuhr die Zeit, welche zu jeder dieser Einzeloperationen nötig ist, und suche dann die schnellste Art und Weise herauszufinden [...].

Viertens: Man schalte alle falschen, zeitraubenden und nutzlosen Bewegungen aus

Fünftens: Nach Beseitigung aller unnötigen Bewegungen stelle man die schnellsten und besten Bewegungen, ebenso die besten Arbeitsgeräte tabellarisch in Serien geordnet zusammen“ [4]

Das Ehepaar Gilbreth folgen dem grundsätzlichen Ansatz Taylors, verändern jedoch die Art und Weise der Erhebung bestehender Vorgänge und ihrer Analyse [5]. Durch fototechnische Analysen kombiniert mit Leuchtelementen an den Extremitäten der Fertigungsmitarbeiter schafften Gilbreths eine Messung im Bereich von tausendstel Sekunden und eine geometrischer Nachverfolgbarkeit der durchgeführten Bewegungen [5]. Zur Analyse definierten Gilbreths eine bestimmte Art der Dokumentation, die „Simultaneous Charts“ [5]. Diese Dokumentationen erlaubte die Beschreibung der ablaufenden Vorgänge bezogen auf die Extremitäten im Verlauf der Zeit. Darauf aufbauend definierten Gilbreths Grundformen der Handlungen, die „Therbligs“: „Assemble, Use, Disassemble, Search, Find, Select, Grasp, Position, Transport loaded, Inspect, Preposition (for next operation), Release load, Transport empty, Wait (unavoidable delay), Wait (avoidable delay), Rest (for overcoming fatigue)“[5]. Wobei die erstgenannten drei sich durch die nachfolgenden Handlungen weiter detaillieren lassen.

2.1 Limitationen der Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit der Ansätze von Taylor und den Gilbreths auf die Entwicklungsarbeit ist nicht ohne weiteres möglich und von Taylor und Gilbreths auch nicht vorgesehen. Getrieben

durch die Orientierung am Geschäftsprozess und die zunehmende Automatisierung der Produktion wurde, spätestens in den 1990ern [7], auch die bislang weit weniger berücksichtigte Phase der Entwicklung einer kritischen Überprüfung in ihrer Effektivität unterzogen.

Verglichen zur Arbeitsumgebung, die durch Taylor und die Gilbreths analysiert wurden, zeigt sich die Umgebung des Entwicklers im 21sten Jahrhundert grundlegend anders. Vornehmlich eingesetztes Werkzeug ist der Computer – mit zahlreichen IT-Systemen, Ein- und Ausgabegeräten, ergänzt um die persönliche oder telefontechnische Kommunikation. Zur Beschreibung dieser Arbeitsumgebung bedarf es eines Modells, welches die beeinflussenden Parameter (Prozesse, IT-Systeme und Informationen), sowie darauf aufbauend die erfolgenden Handlungen abbilden kann. Übertragbar bleiben jedoch das Anliegen eines wissenschaftlichen Anspruchs [4] in einer detaillierten Betrachtung, sowie die grundlegende Methodik Taylors und der Gilbreths, speziell in ihrem systematischen Vorgehen und der Analyse grundlegender Bestandteile der Entwicklungsarbeit.

Ein weiterer Punkt, der in der Übertragung in das 21ste Jahrhundert berücksichtigt werden muss ist der gestiegene Anspruch einer sozialen und ergonomischen Gestaltung des Arbeitsumfelds. Während die Gilbreths bereits den Einfluss eines „Menschlichen Elements“ („Human Element“ [5]) erklären, verzichtet Taylor darauf die Individualität der Mitarbeiter zu berücksichtigen. Lediglich in seinem Postulat, den „jeweils am besten für die Arbeit geeigneten“ [4] auszuwählen berücksichtigt er eine menschliche Individualität. Dieser Grundgedanke ist mit einer modernen europäischen sozialen Arbeitnehmerkultur in keiner Weise vereinbar [8]. Vielmehr erkannte man den Vorteil individueller Denk- und Arbeitsweisen, speziell im Rahmen von Lösungsfindungen [8]. Moderne Ansätze sollten somit zwar eine gemeinsame effektive Arbeitsweise erlauben, gleichzeitig aber die Individualität der Beteiligten respektieren und ggf. fördern [1].

3 Das Betriebssystem der Entwicklung

Mit dem Engineering Operating System (EOS), dem Betriebssystem der Entwicklung, wurde ein Modell geschaffen, welches es erlaubt die Produktentwicklung ganzheitlich abzubilden. Dabei kann sowohl die Entwicklungsumgebung in ihren Prozessen, IT-Systemen und Informationen und Daten beschrieben werden, wie auch die in einer Entwicklungsumgebung erfolgende Produktentwicklung. Das Modell ist als Venn-Diagramm in sich überschneidenden Mengen konstruiert um die Wechselwirkungen der Bestandteile der Entwicklungsumgebung abzubilden (vgl. Bild 1).

Die Menge der Prozesse und Organisation basiert auf wertschöpfungs-orientierten Prozessdefinitionen. Entsprechend wird zwischen den wertschöpfenden Kernprozessen sowie den Unterstützungs- und Managementprozessen, die nur sekundär wertschöpfend sind, unterschieden. Die Organisation der Entwicklungsumgebung bzw. des betrachteten Unternehmens wird in Form von Rollen in der Prozessbeschreibung und Organigrammen berücksichtigt. Die Menge der virtuellen und physischen Artefakte beschreibt das Medium der Produktentwicklung. Jegliche verwendeten, manipulierten und erschaffenen Informationen und Objekte werden in dieser Menge abgebildet (Produktmodelle, Normen, Anforderungslisten etc.). Die Menge der Werkzeuge und IT-Systeme enthält alle verfügbaren Werkzeuge des Entwicklungsumfelds von der eingesetzten Software und dabei verwendeter Hardware (Rechner, Interaktionsgeräte und Visualisierungen), über die eingesetzten Werkzeugmaschinen bis zu verwendeten Prüfwerkzeugen.

Auf diesen drei, die Entwicklungsumgebung beschreibenden Mengen, gründen die Aktivitäten, als die eigentlichen wertschöpfenden Handlungen der Entwicklungsbeteiligten. Die Menge enthält alle durch Menschen und IT-Systeme tatsächlich ausgeführten Handlungen (Aktivitäten) im Produktleben. Durch Menschen ausgeführte Aktivitäten sind dabei die personenspezifisch dynamischen Instanzierungen der Prozesse. Dabei ist der Prozess als Medium zu verstehen, welcher die Arbeitsanweisung einer planenden Instanz für die ausführende Instanz trägt. Entsprechend des Kommunikationsmodells von Godulla [9], unterliegt die Interpretation des Prozesses sowohl dem Weltverständnis des Sendenden (Gewohnheiten, Erfahrungen, Lehre) wie auch der des Empfangenden. In Folge unterliegt, selbst bei hoch detaillierten Prozessen – gleich der Frage ob dieses erstrebenswert sei – die erfolgreiche Handlung einer Varianz der Interpretation des Ausführenden.

Anders stellt sich dies bei der Automatisierung von Aktivitäten (IT-Aktivitäten) dar. Diese unterliegen, sofern keine adaptiven Algorithmen Verwendung finden, lediglich der Interpretation des konzipierenden Informatikers und seinen Beratern, sodass die Varianz deutlich reduziert wird, sich jedoch auch die Adaption auf unvorhergesehene Umstände erschwert. Das EOS ermöglicht in seiner Gesamtheit die Beschreibung der Entwicklungsumgebung und darauf gründende Aktivitäten. Auf Basis dieses Modells ist eine Analyse der Entwicklungsvorgänge im Sinne Taylors und Gilberths möglich.

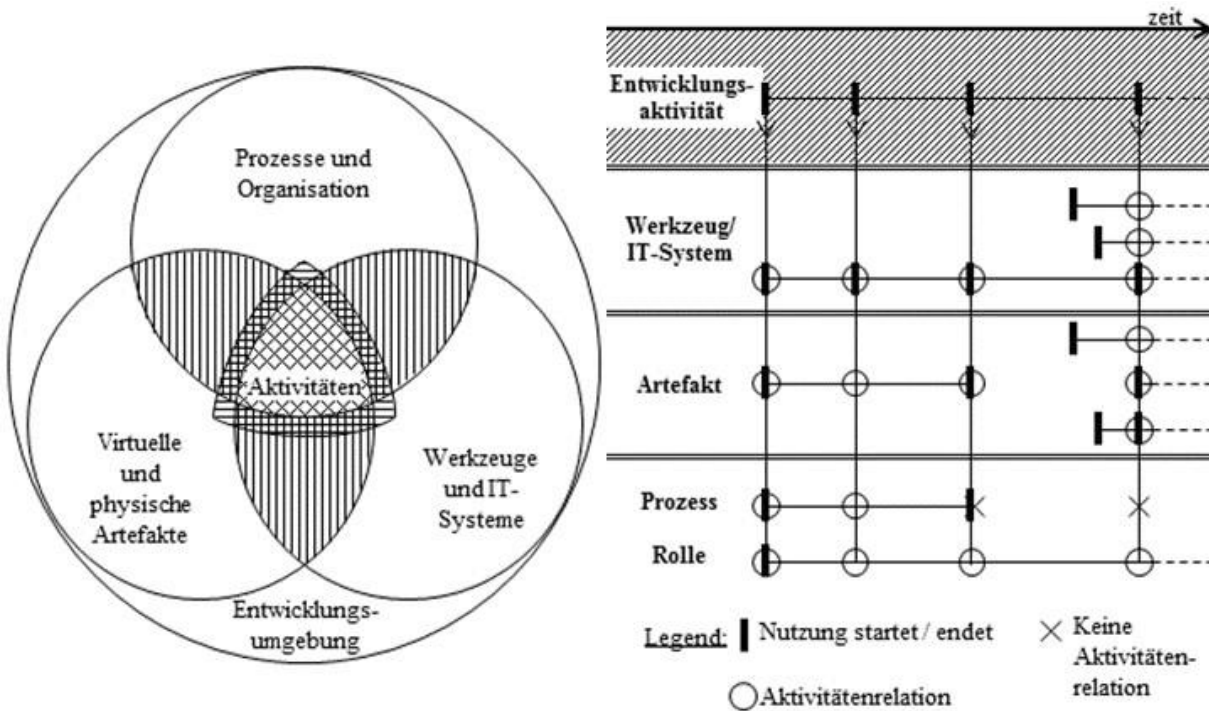


Bild 1: Modell des EOS (links) und Sequenzdiagramm (rechts)

Einzelne Aktivitäten in verwendeten Werkzeugen (vornehmlich IT-Systemen) können mittels Stoppuhr in ihren Abläufen protokolliert werden. Im Sinne Gillberths ist eine Video-Analyse der Arbeitsplätze und Bildschirme mit nachfolgender Auswertung ein vergleichbarer Ansatz. Erste Experimente werden im Nachfolgenden kurz vorgestellt und die identifizierten Aktivitäten beschrieben.

4 Aktivitäten der Produktentwicklung

Zur Erhebung der Entwicklungsaktivitäten wurden im Labor des Zentrums für Innovative Produktentstehung (ZIP – eine Einrichtung der TU Berlin und des Fraunhofer IPK zur Untersuchung digitalisierter Entwicklungsumgebungen) und im Rahmen einer Lehrveranstaltung zwei verschiedene Formen von Experimenten durchgeführt. Im Labor wurde durch eine Gruppe von zwei Maschinenbauern und einem Informatiker ein mechatronisches Produkt entwickelt und anschließend über die Produktion bis zur Montage und Test geführt. Dabei wurden fortlaufend die ablaufenden Aktivitäten, die durch die Teilnehmenden ausgeführt wurden und die dafür benötigten Zeiten protokolliert. Parallel erfolgte eine Videodokumentation der Abläufe im Labor.

Im zweiten Experiment erfolgte die Untersuchung im Rahmen einer Lehrveranstaltung. Hierbei sollten zwei Studentengruppen, überwiegend Maschinenbauer, ein Produkt-Service

System (PSS) rund um einen Einachstraktor entwickeln. Das Einsatzszenario des PSS konnte frei gewählt werden. Zur Ermittlung der Aktivitäten während des Entwicklungsprozesses wurden die Studierenden mittels eines strukturierten Fragebogens jeweils eine Woche vor einem Design Review in Gruppeninterviews befragt. Zudem wurden die projektbezogenen Datenablagen der Gruppen ausgewertet.

Zur Analyse der Bestandteile im EOS und Identifikation bestehender Wechselwirkungen, speziell bezogen auf die Aktivitäten, wurde ein Sequenzdiagramm eingesetzt (vgl. Bild 1). Dieses zeigt Ähnlichkeiten zum Ansatz Gilberths, der in seinen Simultaneous Charts den Einsatz der Extremitäten der Montagemitarbeiter sowie die aufgewendeten Zeiten portokolierte. Die Sequenzdiagramme bilden, dem EOS entsprechend, statt dessen die eingesetzten (IT-) Werkzeuge, die Prozessvorgabe und die verwendeten, bzw. entstehenden Informationen sowie die ausgeführten Aktivitäten über einen zeitlichen Verlauf ab. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen der Mengen durch Verbindungslinien vermerkt. Im Labor Experiment konnten die nachfolgend dargestellten Aktivitäten identifiziert werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Im Laborversuch identifizierte Aktivitäten

Kommunikation		Informationslogistik	
Informieren	<i>jemanden eine Information bereitstellen</i>	Öffnen	<i>Etwas in einem System laden</i>
Diskutieren	<i>mit jemanden einen Sachverhalt kontrovers besprechen</i>	Suchen	<i>Etwas in einer Infrastruktur suchen</i>
Schreiben / Ausdrücken	<i>Etwas schriftlich, bildlich oder verbal darstellen</i>	Speichern	<i>Etwas in einer Infrastruktur ablegen</i>
Fragen	<i>Etwas schriftlich, bildlich oder verbal als Frage formulieren</i>	Konvertieren	<i>Etwas in ein anderes Format überführen</i>
		Einbinden	<i>Etwas in ein IT-System einbinden um den Funktions- oder Artefakt-raum zu vergrößern</i>
Koordination		Überprüfung	
Planen	<i>ein Vorhaben strukturieren /vordenken</i>	Testen	<i>Etwas gegenüber Anforderungen überprüfen</i>
Anfordern	<i>Etwas konkretes zu einem Zeitpunkt verlangen</i>	Messen	<i>Eine Größe von etwas bestimmen</i>
Berichten	<i>Etwas sachbezogen darstellen</i>	Analysieren	<i>Etwas systematisch auf Merkmale hin untersuchen</i>
Gestaltung			
Zeichnen	<i>Etwas zeichnerisch darstellen</i>	Definieren	<i>Einen Parameter bestimmen</i>
Modellieren	<i>Einen Körper aus einer Zeichnung erstellen</i>	Berechnen	<i>Etwas entsprechend einer Vorgabe errechnen.</i>
Fixieren	<i>Etwas im (virtuellen) Raum fixieren.</i>	Auswählen	<i>Etwas aus einer Menge selektieren</i>
Zusammenführen	<i>Komponenten in relative Beziehung setzen</i>		

Im Experiment im Rahmen der Lehrveranstaltung wurden Aktivitäten auf einer alternativen Detaillierungsebene erfasst, die sich stärker an den Rollen und damit verbundenen prozessbedingten Aufgaben orientiert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Aktivitäten aus dem Experiment im Rahmen einer Lehrveranstaltung

Projektmanager	Produktmanager	Nachhaltigkeitsexperte	Designer
Projektplanung	Komponentenfunktion beschreiben	Teilnahme in Treffen	Teilnahme in Treffen
Treffen organisieren	Produkt-Service-System dokumentieren	Auswahllisten vorbereiten	Protokollieren
Kosten abschätzen	CAD Modelle erstellen	Vertraut machen mit den "10 goldenen Regeln"	Marktanalysen durchführen
Planen des Geschäftsmodells	Ergebnisdokumentation	Vertraut machen mit: Schneeräumen und Streuen	Auswahllisten erstellen

Ergänzt wurden diese Aufgaben durch eines von vier Verben zur Beschreibung der Manipulation: „Erstellen, Verwenden, Bearbeiten, Beeinflussen“, sodass eine Aktivität immer im Zusammenhang mit einem Tripel bestehend aus Rolle, Manipulationsverb, Artefakt beschrieben wird, zum Beispiel: „Der Projektmanager (Rolle) erstellt (Manipulationsverb) den Projektplan (Artefakt) während der Projektplanung (Aktivität)“. In einer vergleichenden Analyse konnte festgestellt werden, dass diese Beschreibungsform durch die im Labor identifizierten Aktivitäten abgebildet werden kann. Kombinerend wurde ein neues Modell zur Beschreibung von Aktivitäten bestimmt, welches der Venn-Logik des EOS entsprechend aus den vier Mengen Artefakt(e), IT-System(e), Prozess & Rolle und Aktivität besteht: Der *Konstrukteur* (Rolle) wählt in der *Detaillkonstruktion* (Prozess) des *Tragarms* (Artefakt) das zu verwendende *Material* (Artefakt) anhand einer *Materialdatenbank* (Artefakt / IT-System) im *CAD-System* (IT-System) aus.

Zur weiteren Validierung der Aktivitäten wurde ein Abgleich mit den Grundtätigkeiten der Konstruktion, beschreiben durch Ehrlenspiel [10] nach Zanker [11] vorgenommen. Zanker beschreibt dabei 16 Aktivitäten, die in der Konstruktion vorkommen, denen die zuvor beschriebenen Aktivitäten teils zugeordnet werden können (Tabelle 3).

Im Beschreibungsmodell von Zanker wird wesentlich stärker auf die methodischen kognitiven Vorgänge der Entwickler eingegangen, als dies bei dem EOS-basierten Modell der Fall ist (bspw. Anforderungen klären, gestalterische Lösung finden, Korrigieren). Weitestgehend lassen sich diese Tätigkeiten jedoch durch Kombinationen von im EOS-Modell definierten Aktivitäten beschreiben. Eine fehlende Tätigkeit ist das „beurteilen und entscheiden“, welches in die Aktivitäten des EOS-basierten Modells aufgenommen wird. Bezogen auf die

Abbildbarkeit der EOS-Aktivitäten im Modell von Zanker fällt auf, dass die für die Informationslogistik notwendigen Aktionen nicht berücksichtigt worden sind. Da diese jedoch einen erheblichen Umfang der notwendigen Aktionen der digitalisierten Entwicklungsarbeit ausmachen, sollten sie Berücksichtigung finden.

Tabelle 3: Vergleich von Grundtätigkeiten nach Zanker [11] und den Identifizierten Aktivitäten

Zanker	Labor	Zanker	Labor	Zanker	Labor
Anforderung klären	o.d.Ü.	Beurteilen, Entscheiden	o.d.Ü.	Korrigieren	o.d.Ü.
Prinzipielle Lösung suchen	Definieren, Auswählen	Zeichnerisch darstellen	Zeichnen, Extrudieren, Fixieren, Zusammenführen	Organisieren, Planen	Planen, Anfordern
Gestalterische Lösung suchen	o.d.Ü.	Schriftlich darstellen	Schreiben / Ausdrücken, Berichten	Korrespondieren	o.d.Ü.
Herstellgerechte gestaltete Lösung suchen	o.d.Ü.	Sich informieren	Fragen, jmd. Informieren	Diskutieren, Beraten	Diskutieren
Berechnen, Simulieren, Optimieren	Berechnen	Strukturieren, Ordnen	o.d.Ü.	o.d.Ü.	Suchen, Öffnen, Speichern, Konvertieren, Einbinden
Experimentieren	o.d.Ü.	Kontrollieren, Prüfen	Analysieren, Messen, Testen	o.d.Ü.: ohne direkte Übereinstimmung	

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den durchgeführten Experimenten und der darauf aufbauenden Analyse konnte gezeigt werden, dass die Methodik Taylors zum Studium der Aktivitäten auf eine moderne Produktentwicklung übertragbar ist. Die Notwendigkeit einer intensiven Betrachtung der Vorgänge in der Produktentwicklung ist, wie beschrieben, mehr denn je gegeben um die Intransparenz der Produktentwicklung aufzulösen. Das an Gilbreths Simultaneous Charts angelehnte Sequenzdiagramm erlaubt eine Betrachtung der Wechselwirkungen von Werkzeugen, Prozessen, Artefakten und den erfolgenden Aktivitäten. Verglichen zu bestehenden Aktivitäten-Darstellungen finden nun auch notwendige koordinierende und informationslogistische Tätigkeiten Berücksichtigung. Auf Basis dieser tiefgehenden Analyse wird eine ganzheitlichere und nachhaltigere Gestaltung des Entwicklungsumfelds ermöglicht. Zu überprüfen bleibt, ob der gewählte Detaillierungsgrad geeignet ist und ob die Aufteilung in Kommunikation, Koordination, Informationslogistik, Gestaltung und Überprüfung zielführend ist.

Derzeit laufen Vorbereitungen um zukünftig die ausgeführten Aktivitäten automatisiert erkennen zu können. Dazu wird ein lernender Algorithmus konzipiert, welcher personenspezifisch anhand von Betriebssystemdaten und einem vorangegangenen Training die ausgeführte Aktivität, verwendete Artefakte, IT-Systeme, Prozessvorgaben und die handelnde

Person beschreibt. Langfristig wird über dieses Vorgehen ein selbstoptimierendes System entwickelt, welches personenspezifisch die zielführendste Arbeitsweise identifiziert. Im ersten Schritt, der Bestimmung von Aktivitäten und dem darauf aufbauenden Modell selbstoptimierender intelligenter Prozesse, wird der Grundgedanke Taylors und der Gilbreths aufgenommen und in das 21ste Jahrhundert überführt. Die Notwendigkeit wissenschaftlicher Analytik wird somit um die informationstechnologischen Fortschritte ergänzt und in den Betriebsalltag integriert. Dabei wird, anders als bei Taylor, die persönliche Varianz der Entwickelnden Berücksichtigung finden können, um die Ergonomie des Entwicklungsumfelds deutlich zu steigern.

Literatur

- [1] Eigner, Martin ; Roubanov, Daniil ; Zafirov, Radoslav: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin : Springer Vieweg, 2014
- [2] Lünemann, Pascal ; Müller, Patrick ; Neumeyer, Sebastian ; Wang, Wei Min ; Hayka, Haygazun ; Kirsch, Lucas: Zukunft der unternehmensübergreifenden Kollaboration : Fraunhofer IPK, 2016
- [3] Stark, Rainer ; Hayka, Haygazun ; Israel, Johann Habakuk ; Kim, Marcus ; Müller, Patrick ; Völlinger, Ulrike: Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie. In: Informatik Spektrum 34 (2011), Nr. 1, S. 20–28. URL <https://doi.org/10.1007/s00287-010-0501-z>
- [4] Taylor, Frederick Winslow ; Roesler, Rudolf: Die Grundsätze wissenschaftlicher Betriebsführung. Paderborn : Salzwasser-Verl., 2013
- [5] Gilbreth, Frank B. ; Gilbreth, Lillian M. ; Witte, Irene M.: Bewegungsstudien : Vorschläge zur Steigerung der Leistungsfähigkeit des Arbeiters. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1921
- [6] Sanders, Karin ; Kianty, Andrea: Organisationstheorien : Eine Einführung. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006
- [7] Martinez, Veronica ; Radnor, Zoe J. ; Barnes, David: Historical analysis of performance measurement and management in operations management, Bd. 56, S. 384–396
- [8] Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie: Zukunftschance Digitalisierung : Gute Geschäfte, zufriedene Kunden erfolgreicher Mittelstand. Berlin, 11/2016
- [9] Godulla, Alexander: Öffentliche Kommunikation im digitalen Zeitalter: Grundlagen und Perspektiven einer integrativen Modellbildung. [Place of publication not identified] : Springer Science and Business Media; Springer VS, 2016
- [10] Ehrlenspiel, Klaus: Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4., aktualisierte Aufl., [elektronische Ressource]. München : Hanser, 2009
- [11] Zanker, Winfried: Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1999. Als Ms. gedr. Aachen : Shaker, 1999 (Reihe Konstruktionstechnik München 36)

Methode zur Analyse schlafender Fehler innerhalb einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

Daniel Moselewski, Georg Jacobs, Manuel Löwer, Fatmir Sulejmani, Christian Konrad, Tim Katzwinkel

Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt),

RWTH Aachen University

Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen

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

Inhalt: Der vorliegende Beitrag demonstriert die Anwendung einer am ikt entwickelten Methode zur Analyse schlafender Fehler innerhalb einer Produkt-FMEA anhand eines abstrahierten Beispielprodukts.

Abstract: Within this Paper, the usage of a method developed at ikt for the analyzation of dormant failures in a Product-FMEA is demonstrated with an abstracted example product.

Stichwörter: Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse, FMEA, Redundanz, simultan vorliegende Fehler, Ausfälle mit gemeinsamer Ursache, schlafende Fehler, Konjunktion

Keywords: Failure Mode and Effects Analysis, FMEA, Redundancy, simultaneous existing failures, common cause failures, CCF, dormant failures, conjunction

1 Einleitung

Innerhalb des Dilemmas aus steigender Produktkomplexität [1] und verkürzter Markteinführungszeit [2] gewinnt die Qualitätssicherung immer mehr an Bedeutung [1, 2]. Die Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse (FMEA) stellt eine vorbeugende Methode des Qualitätsmanagements (QM) dar, deren korrekte und konsequente Anwendung bereits in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses potentielle Fehler identifiziert [3, 4, 5]. Dadurch können Fehlerkosten minimiert [1, 2, 3, 6], die Entwicklungszeit verkürzt [1] und die angestrebte Produktqualität sichergestellt werden [3, 4, 5, 7, 8].

2 Stand der Technik

In der Regel wird im Rahmen einer FMEA-Erstellung das Risiko jeder identifizierten Fehlerkette, bestehend aus Fehlerursache, dem Fehler selbst und der Fehlerfolge auf oberster Systemebene, singular betrachtet [3, 5]. Es kann aber auch durchaus vorkommen, dass mehrere Fehler simultan vorliegen.

2.1 Kategorien simultan vorliegender Fehler

Bei simultan vorliegenden Fehlern lassen sich Ausfälle mit gemeinsamer Ursache von schlafenden Fehlern unterscheiden. In Bild 1 ist ein Fehlernetz von Ausfällen gemeinsamer Ursache einem Fehlernetz von schlafenden Fehlern gegenüber gestellt.

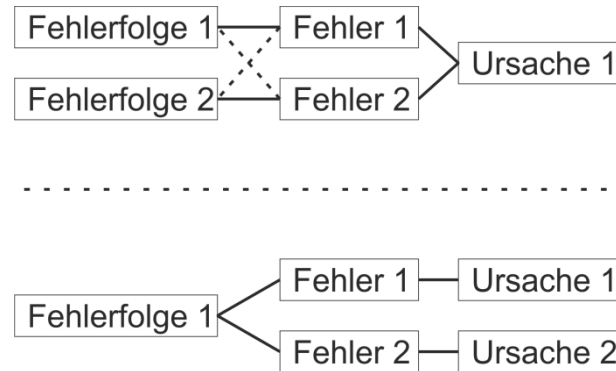


Bild 1: Fehlernetz zu Ausfällen gemeinsamer Ursache (oben) und schlafenden Fehler (unten)

Ausfälle mit gemeinsamer Ursache

Ausfälle mit gemeinsamer Ursache (englisch: common cause failure (CCF)) sind kausal abhängige Fehler, die zeitgleich oder innerhalb einer hinreichend kurzen Zeitspanne auftreten, sodass die Auswirkungen als zeitgleich angesehen werden können. Sie können sowohl funktional abhängig, wie z. B. die gemeinsame Energieversorgung redundanter Komponenten (siehe Strichlinien im oberen Teil von Bild 1), als auch funktional unabhängig, wie z. B. die gemeinsame Energieversorgung von unikalen Komponenten (siehe Volllinien im oberen Teil von Bild 1), sein. [2, 3, 9]

Schlafende Fehler

Schlafende Fehler (englisch: dormant failures) [10] sind dem gegenüber kausal unabhängige, funktional abhängige Fehler. Sie treten insbesondere bei Redundanzen oder in Überwachungsfunktionen und Warnanzeigen auf. Bei alleinigem Auftreten haben sie keinen Einfluss auf die korrekte Funktionserfüllung, wirken sich aber negativ aus, sobald die redundante bzw. überwachte Einheit nicht ordnungsgemäß funktioniert. [5, 10] Als Beispiel schlafender Fehler dient der Ausfall eines Bremskreises bei hydraulischen Zweikreis-Bremsanlagen in HH-Anordnung [11] (siehe Bild 2). Bei Ausfall eines Bremskreises übernimmt der noch funktionierende Bremskreis die Erfüllung der Funktion „Alle Räder abbremsen“ vollständig. Sollte dieser allerdings ebenfalls ausfallen, so kann die Funktion nicht mehr erfüllt werden.

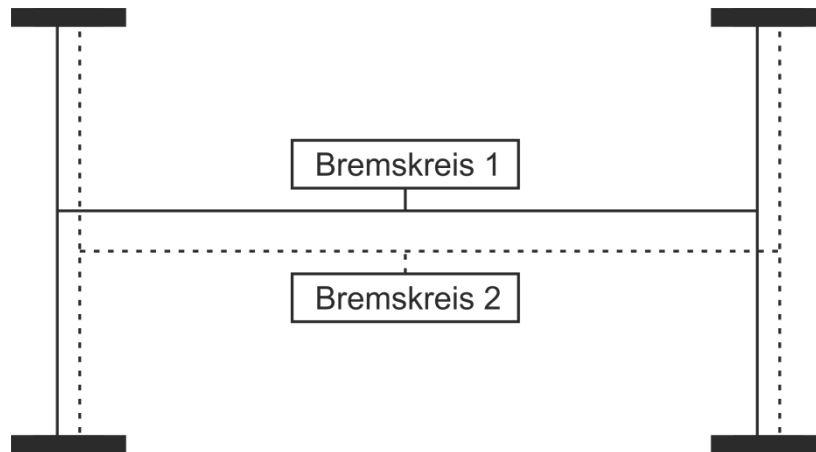


Bild 2: Zweikreis-Bremsanlage in HH-Anordnung

Mit Methoden des QM, wie z. B. der Fehlerbaumanalyse, lassen sich simultan vorliegende Fehler betrachten [4, 5, 12]. Die Analyse simultan vorliegender Fehler innerhalb der FMEA kann zum einen die Vollständigkeit der Risikobetrachtung sicherstellen [3, 10]. Zum anderen können die qualitätsbezogenen Kosten [6] durch die Vermeidung von möglichen Redundanzen bei der Anwendung von im Unternehmen parallel eingesetzter Methoden des QM minimiert werden [10]. Während für CCF Möglichkeiten der Betrachtung innerhalb einer FMEA entwickelt wurden [13, 14] ist dies für schlafende Fehler nicht der Fall.

Aus diesen Gründen wird im vorliegenden Beitrag die Anwendung der am ikt entwickelten Methode zur Analyse von schlafenden Fehlern innerhalb einer FMEA anhand eines abstrahierten Beispielprodukts demonstriert.

3 Beschreibung eines Beispielprodukts

Das in diesem Artikel betrachtete Beispielprodukt wird im Folgenden anhand der Ergebnisse der ersten drei der fünf Analyseschritte, die im Rahmen einer FMEA-Erstellung durchzuführen sind [4, 5], vorgestellt.

Das Beispielprodukt, „P“, besteht, wie der Produktstruktur in Bild 3 zu entnehmen ist, aus dem Bauteil, „Systemelement 1“, einer Baugruppe, „Systemelement 2“, die sich aus den beiden Bauteilen „Systemelement 2.1“ und „Systemelement 2.2“ zusammensetzt, und einem weiteren Bauteil, „Systemelement 3“, das diversitäre Redundanz [2] zum Bauteil „Systemelement 1“ aufweist.

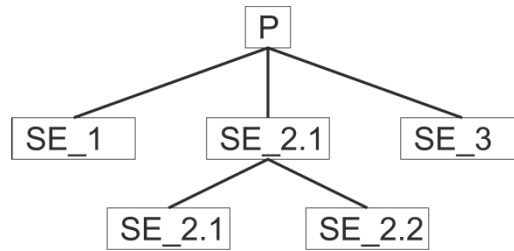


Bild 3: Produktstruktur

Die drei internen Funktionen des Produkts, „Fkt_1“, „Fkt_2“ und „Fkt_3“, dienen der Erfüllung der Gesamtfunktion „Fkt_ges“ (siehe Bild 4).

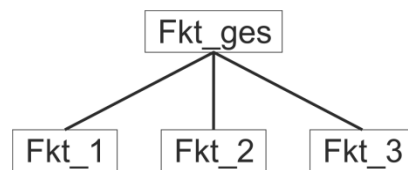


Bild 4: Funktionsstruktur

Bild 5 zeigt die METUS-Raute des Beispielprodukts, eine Visualisierung der Produktarchitektur. Sie ist eine Zusammenführung der Funktions- und der Produktstruktur und dient der Identifikation der Zusammenhänge zwischen einzelnen Funktionen und den Komponenten, die die Erfüllung dieser Funktionen zum Zweck haben [15]. Somit kann die Produktarchitektur als Hilfsmittel bei der Vervollständigung der Funktionsstruktur um die internen Funktionen der Bauteile genutzt werden.

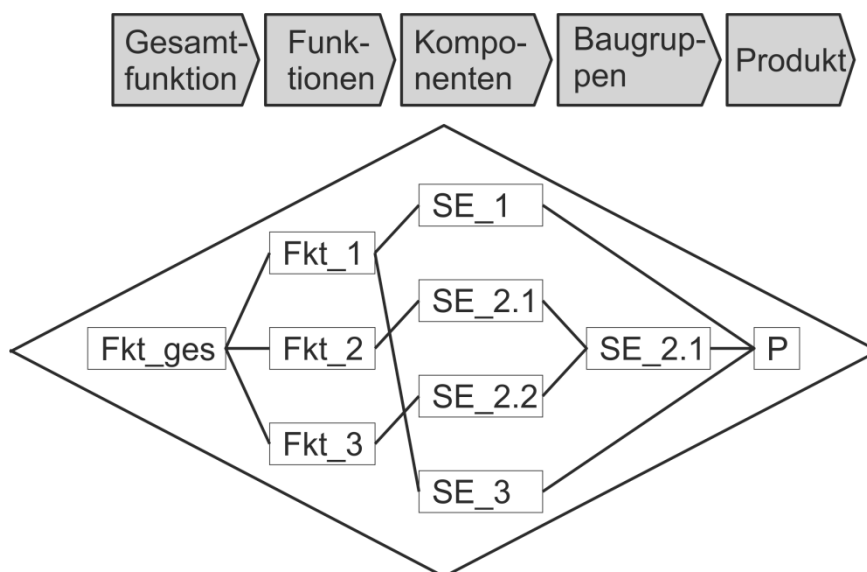


Bild 5: METUS-Raute

Simplifizierend wird festgelegt, dass jedes Bauteil genau eine interne Funktion besitzt. Somit ergibt sich die in Bild 6 dargestellte, um eine Systemebene erweiterte Funktionsstruktur.

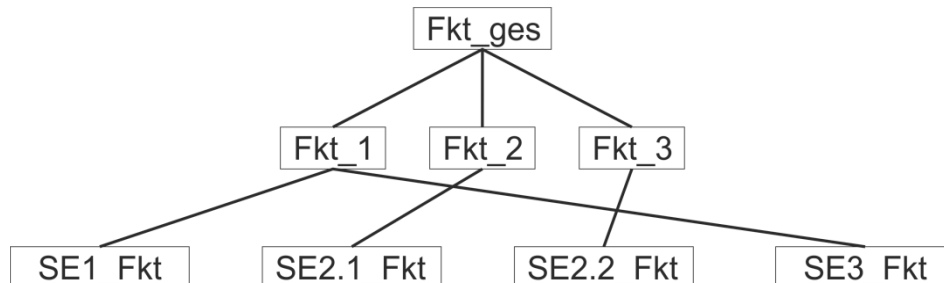


Bild 6: erweiterte Funktionsstruktur

Zur weiteren Vereinfachung des Beispiels wird definiert, dass jede der betrachteten Funktionen lediglich die Fehlermöglichkeit des kompletten Funktionsausfalls besitzt [16]. Dem Fehlernetz (siehe Bild 7) ist zu entnehmen, dass jeder Fehler aufgrund zweier Ursachen auftreten kann.

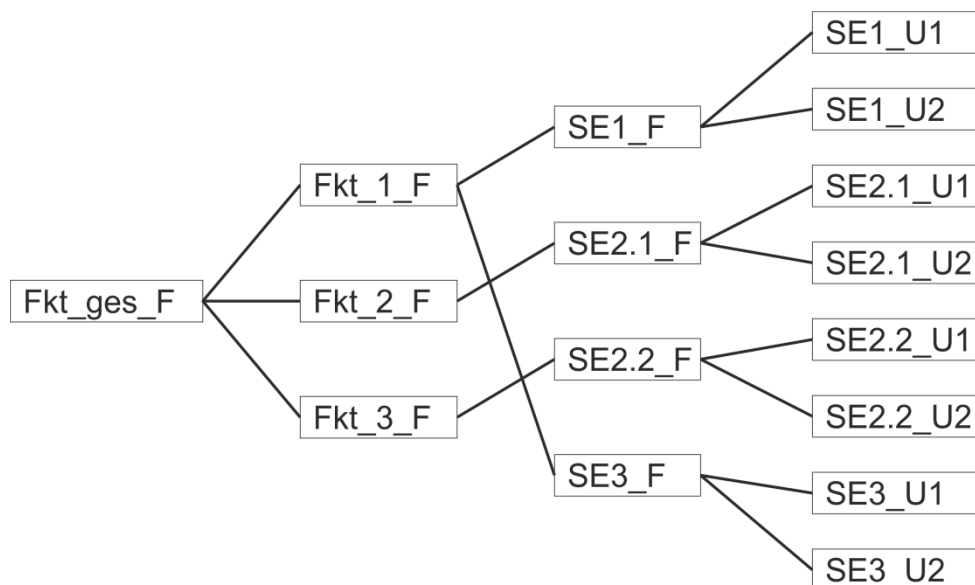


Bild 7: Fehlernetz

4 Anwendung der Methode am Beispielprodukt

Die am ikt entwickelte Methode zur Analyse schlafender Fehler innerhalb einer FMEA (siehe Bild 8) wird im Folgenden auf das beschriebene Beispielprodukt angewendet. Sie ist innerhalb der Fehleranalyse nach der Erstellung des Fehlernetzes und vor der Übertragung der im Fehlernetz enthaltenen Informationen ins FMEA-Formblatt durchzuführen [5].

Die Identifikation potentieller schlafender Fehler wird im ersten Schritt dieser Methode vorgenommen. Aus dem Fehlernetz des Beispielprodukts (siehe Bild 7) geht hervor, dass lediglich der Fehler „Fkt_1_F“ aufgrund mehrerer Fehler („SE1_F“ und „SE3_F“) auftreten kann. Somit besitzen lediglich diese ursächlichen Fehler das Potential schlafender Fehler. Aufgrund der diversitären Bauteilredundanz handelt es sich zum einen bei den Fehlerursachen um voneinander unabhängige Ursachen und zum anderen bei den zugehörigen Funktionen um redundante Funktionen. Da demnach kausale Unabhängigkeit sowie funktionale Abhängigkeit der Fehler vorliegt, handelt es sich bei den untersuchten Fehlern um potentiell schlafende Fehler.

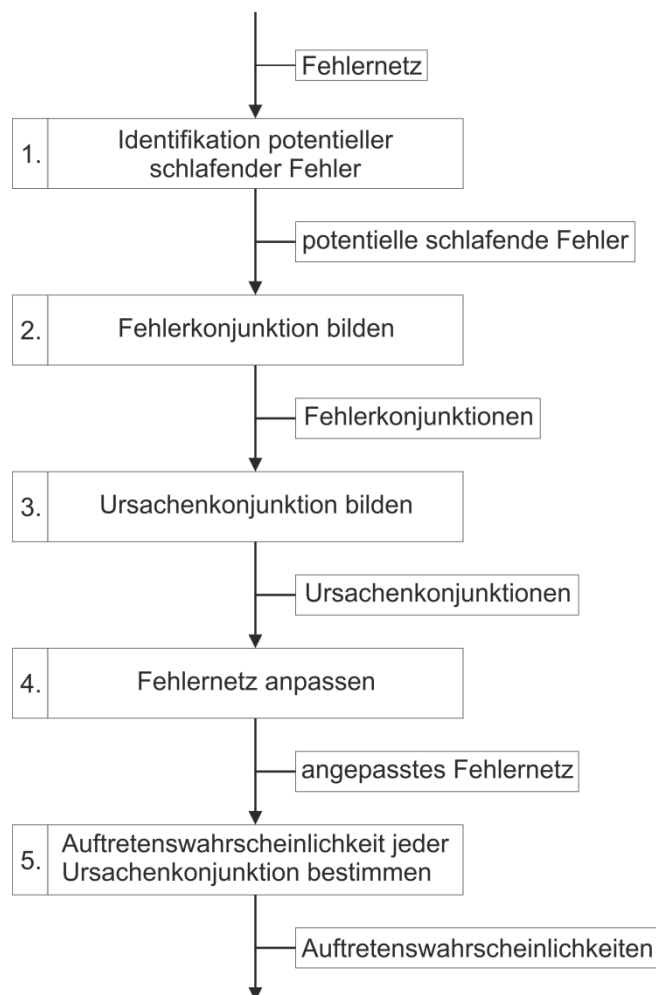


Bild 8: Methode zur Analyse schlafender Fehler innerhalb einer FMEA

Aus dem Vorliegen einer der Ursachen „SE1_U1“ und „SE1_U2“ resultiert der Fehler „SE1_F“. Dieser Fehler hat jedoch keine Auswirkung auf die Funktion „Fkt_1“ des Produkts, da die Funktion „SE3_Fkt“ die Erfüllung dieser Funktion sicherstellt (vgl. Bild 6).

Analog zu den Betrachtungen des Fehlers „SE1_F“ ist bezüglich des Fehlers „SE3_F“ festzustellen, dass auch das singuläre Vorliegen dieses Fehlers keine Ursache für das Auftreten des Fehlers „Fkt_1_F“ darstellt. Liegt allerdings einer der beiden Fehler bereits vor und der jeweils andere Fehler tritt auf, so ist die Erfüllung der Funktion „Fkt_1“ nicht mehr gewährleistet und der Fehler „Fkt_1_F“ tritt auf. Aus diesem Grund können die beiden schlafenden Fehler, „SE1_F“ und „SE3_F“, in Schritt zwei der Methode als Konjunktion [17] zu einem einzigen Fehler, „SE1_F \wedge SE3_F“, (siehe Bild 9) zusammengefasst werden.

$$\text{SE_1_F} \wedge \text{SE_3_F}$$

Bild 9: Fehlerkonjunktion

Diese Fehlerkonjunktion kann nur dann auftreten, wenn sowohl eine Ursache des einen, als auch eine Ursache des anderen Fehlers simultan vorliegen. In Schritt drei sind deswegen die Ursachen paarweise zu Ursachenkonjunktionen zusammenzufassen. Hierbei ist darauf zu achten, dass jeweils eine Ursache des einen Fehlers mit einer Ursache des anderen Fehlers zusammengefasst wird. Da in dem betrachteten Beispiel jeder der Fehler auf zwei potentielle Ursachen zurückzuführen ist, ergeben sich für das simultane Vorliegen beider Fehler vier Möglichkeiten von simultan vorliegenden Ursachen (siehe Bild 10).

$$\text{SE_1_U1} \wedge \text{SE_3_U1}$$

$$\text{SE_1_U1} \wedge \text{SE_3_U2}$$

$$\text{SE_1_U2} \wedge \text{SE_3_U1}$$

$$\text{SE_1_U2} \wedge \text{SE_3_U2}$$

Bild 10: Ursachenkonjunktion

In Bild 11 ist das angepasste Fehlernetz als Ergebnis des vierten Schritts dargestellt. Farblich hervorgehoben sind sowohl die Fehlerkonjunktion als auch die Ursachenkonjunktionen.

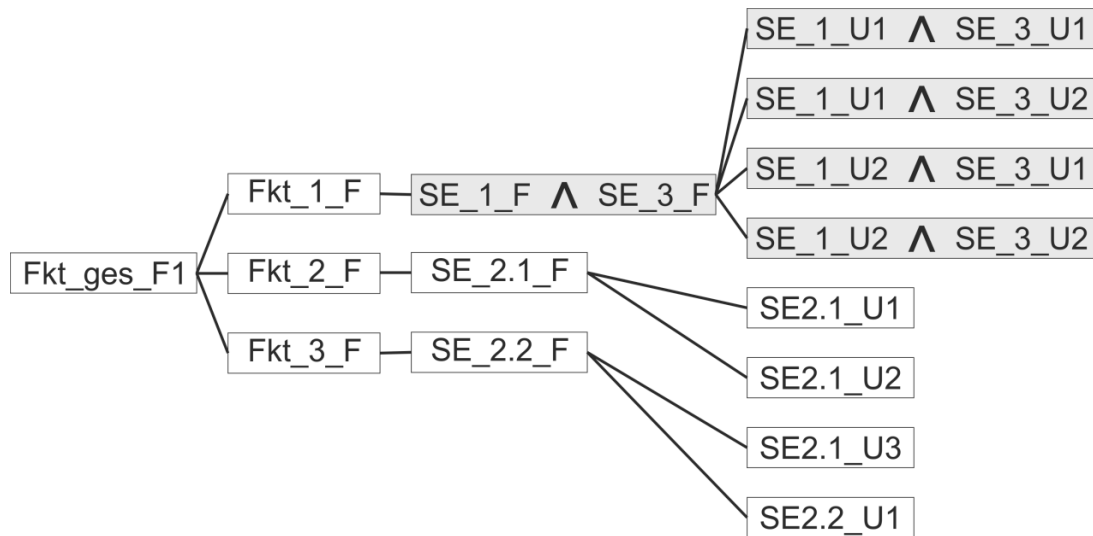


Bild 11: Fehlernetz

Der fünfte und letzte Schritt der Methode besteht aus der Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Ursachenkonjunktionen. Da die Konjunktionen aus voneinander unabhängigen Ursachen bestehen, ist die Auftretenswahrscheinlichkeit nach Formel (1) als Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten zu bilden [18].

$$P(SE_1_U1 \wedge SE_3_U1) = P(SE_1_U1) \times P(SE_3_U1) \quad (1)$$

Nach der Anwendung der Methode zur Analyse schlafender Fehler können die Informationen des angepassten Fehlernetzes sowie die ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten der Ursachen in das FMEA-Formblatt übertragen werden.

5 Fazit

Die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellte Methode kann nahtlos in die Methode zur FMEA-Erstellung integriert werden. Sie bietet die Möglichkeit der Analyse schlafender Fehler, als eine Kategorie simultan vorliegender Fehler, innerhalb einer Produkt-FMEA. Zum einen kann dadurch die Vollständigkeit der Risikobetrachtung innerhalb einer FMEA sichergestellt werden. Zum anderen bietet die Anwendung dieser Methode Potential zur Minimierung von qualitätsbezogenen Kosten durch die Reduktion von möglichen Redundanzen bei der Anwendung von im Unternehmen parallel eingesetzter Qualitätsmanagementmethoden.

Die Allgemeingültigkeit der vorgestellten Methode ist durch die Betrachtung komplexer Produkte zu bestätigen.

Literatur

- [1] Brüggemann, Holger; Bremer, Peik: Grundlagen Qualitätsmanagement : Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978-3-658-09220-7
- [2] Pfeifer, Tilo; Schmitt, Robert: Masing Handbuch Qualitätsmanagement. 6. Aufl. München: Carl Hanser, 2014. – ISBN 978 3 446 43431 8
- [3] Norm DIN EN 60812 11.06. Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)
- [4] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ) (Hrsg.): DGQ-Band 13-11 : FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. 5. Aufl. Frankfurt, M.: Deutsche Gesellschaft für Qualität 2012. – ISBN 3-410-32333-3
- [5] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie : 4 – Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. 2. Aufl. Frankfurt, M.: Verband der Automobilindustrie 2006. – ISSN 0943-9412
- [6] Norm DIN 55350 Teil 11 05.08. Begriffe zum Qualitätsmanagement – Ergänzungen zu DIN EN ISO 9000:2005
- [7] Theden, Philipp; Colman, Hubertus: Qualitätstechniken : Werkzeuge zur Problemlösung und ständigen Verbesserung. München: Carl Hanser, 2013. - ISBN 978-3-446-43463-9
- [8] Pfeufer, Hans Joachim: FMEA – Fehler Möglichkeits und Einfluss Analyse. München: Carl Hanser, 2015. – ISBN 978 3 446 44253 5
- [9] Watson, I. A.: Analysis of dependent events and multiple unavailabilities with particular reference to common-cause failures. In: Fistedis, Stanley H.: Nuclear Engineering and Design. Amsterdam : North-Holland, 93 (1986), S. 227-244
- [10] Werdich, Martin (Hrsg.): FMEA – Einführung und Moderation : Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld). 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. – ISBN 978-3-8348-1787-7
- [11] Norm DIN 74000 08.92. Hydraulische Bremsanlagen – Zweikreis-Bremsanlagen – Kurzzeichen für die Bremskreisaufteilung
- [12] DIN 25 424 Teil 1 09.81. Fehlerbaumanalyse – Methode und Bildzeichen
- [13] Childs, Joseph A.; Mosleh, Ali: A Modified FMEA Tool for Use in Identifying and Addressing Common Cause Failure Risks in Industry. In: IEEE: Proc. Ann. Reliability & Maintainability Symp. Washington, DC : IEEE, 1999, S. 19-24. – ISBN 0-7803-5143-6
- [14] Jang, Hyeon Ae; Yun, Won Young; Kwon, Hyuck Moo: Risk evaluation considering common cause failures in FMEA. In: KIIE: Journal of Industrial Engineering Conference. Berlin : Springer, 2014, S. 3160-3165
- [15] Feldhusen, Jörg; Grote Karl-Heinrich (Hrsg.): Konstruktionslehre : Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Berlin: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-29568-3
- [16] Brückner, C.: Qualitätsmanagement – Das Praxishandbuch für die Automobilindustrie. München: Carl Hanser, 2011. – ISBN 978-3-446-42337-4

- [17] Witt, Kurt-Ulrich: Mathematische Grundlagen für die Informatik : Mengen, Logik, Rekursion. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-658-03078-0
- [18] Oloff, Rainer: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Maßtheorie. Berlin: Springer, 2017. – ISBN 978-3-662-53023-8

Entwicklung einer Prüffeldoptimierungsmethodik zur Prozessoptimierung 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: Prüffeldbetreiber stehen vor der Herausforderung, eine steigende Anzahl an Aufgaben in einer verringerten Zeitspanne zu absolvieren. Dies führt zur Notwendigkeit einer optimalen Nutzung des kostenintensiven Prüffeldes. Bestehende Optimierungsmethoden für den Prüffeldbetrieb machen nur wenig strukturierte Vorgaben zur Durchführung von Prozessverbesserungen. Im Produktionsbereich existieren hingegen weit entwickelte Optimierungsmethoden. Daher wird bewertet, welche Optimierungsmethoden der Produktion sich für eine Übertragung auf den Prüffeldbetrieb eignen. Die ermittelten Methoden Kaizen, Six Sigma und die Wertstrommethode dienen als Basis zur Entwicklung der Prüffeldoptimierungsmethodik: Diese ermöglicht sowohl einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess als auch die strukturierte Durchführung von Verbesserungsprojekten. Die Anwendung der Methodik im Prüffeldbetrieb eines Automobilherstellers bestätigt die Leistungsfähigkeit.

Abstract: Test field operators face the challenge of conducting an increasing number of tasks in a reduced time span. This leads to the need for an optimal use of the cost-intensive test field. Existing optimization methods for test field operations only provide little structured guidelines for the execution of process improvements. In the production area, on the other hand, there are far-reaching optimization methods. Therefore it is assessed which optimization methods of production are suitable for a transfer to test field operations. The methods Kaizen, Six Sigma and the value stream method are used as the basis for the development of the test field optimization methodology. This enables both a continuous improvement process and the structured execution of improvement projects. The usage of the methodology in test field operations of an automobile manufacturer confirms the performance.

Stichwörter: Optimierungsmethodik, Prüffeld, Prüfstand, Produktion, Prozessoptimierung, Übertragbarkeit

Keywords: optimization methodology, test field, test bed, production, process optimization; transferability

1 Problemstellung

Eine gesteigerte Produktkomplexität und verkürzte Produktlebenszyklen führen zur Notwendigkeit effizienterer Entwicklungsprozesse bei gleichbleibend hoher Qualität. Prüfstände unterstützen hierbei durch die Möglichkeit Entwicklungsaufgaben schnell, reproduzierbar und umgebungsunabhängig durchzuführen. Aus diesem Grund stehen Prüffeldbetreiber vor der Herausforderung, eine steigende Anzahl an Aufgaben in einer verringerten Zeitspanne zu absolvieren. Dies führt zur Notwendigkeit einer optimalen Nutzung des kostenintensiven Prüffeldes und damit zu einer permanenten Prozessoptimierung und -anpassung. Daher ist eine Methodik erforderlich, um Potentiale zu erkennen und Prozesse zu verbessern. Bestehende Herangehensweisen für den Prüffeldbetrieb machen nur wenig strukturierte Vorgaben zur Durchführung von Prozessverbesserungen. Im Produktionsbereich existieren hingegen weit entwickelte Optimierungsmethoden und Kennzahlensysteme, um die investitionsintensiven Anlagen optimal zu nutzen. Aus diesem Grund wird dargestellt, wie Optimierungsmethoden aus dem Bereich der Produktion übertragen und angepasst werden, um hieraus die Prüffeldoptimierungsmethodik (POM) zu entwickeln. [1, 2]

2 Vorgehen

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Entwicklung der Prüffeldoptimierungsmethodik erläutert. Im ersten Schritt wird ein Ordnungsrahmen für die betrachteten Bereiche – die Produktentwicklung inkl. des Prüffeldbetriebs und der Produktion – erstellt. Anschließend werden die Anforderungen an eine Optimierungsmethodik erläutert. Die Optimierungsmethoden werden strukturiert anhand eines Werteprofiles bewertet. Auf Basis dieser Bewertung werden geeignete Methoden ausgewählt und durch Adaption die POM entwickelt. [3, 4]

2.1 Ordnungsrahmen Prüffeldbetrieb und Produktion

Eine strukturierte Literaturrecherche hat 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.

Gleichzeitig lässt sich feststellen, dass viele Methoden der Produktion strukturiert vorgehen und zahlreiche verschiedene Werkzeuge nutzen, um Prozesse zu optimieren. [5 bis 9]

Eine Untersuchung aktueller Literatur führte zur Auswahl der am häufigsten verwendeten Optimierungsmethoden. Dies sind Business Reengineering, Kaizen, Lean Production, Six Sigma und die Wertstrommethode. Diese werden für eine potentielle Übertragung ausgewählt und hinsichtlich ihrer Eignung überprüft. [10 bis 16]

2.2 Anforderungen an eine Optimierungsmethodik

Um die Eignung der Optimierungsmethoden der Produktion zu überprüfen, werden die Anforderungen abgeleitet, die eine Optimierungsmethodik für den Prüffeldbetrieb erfüllen muss. Hierfür werden wissenschaftliche Beiträge und praktische Aspekte aus dem operativen Betrieb berücksichtigt. Quellen sind sowohl Erkenntnisse aus dem Prüffeldbetrieb (bspw. der Einsatz der zu entwickelnden Methodik in bestehenden Strukturen) als auch Vorgehensweisen, die sich in der Produktion bewährt haben (bspw. die Nutzung etablierter Werkzeuge bei der Prozessoptimierung). [8]

Anforderungen aus Erkenntnissen der Produktion	Strukturiertes Vorgehen
	Etablierte Werkzeuge
	Kontinuierliches Vorgehen
	Diskontinuierliches Vorgehen
	Betrachtung Einzelprozesse
	Abdeckung Gestaltungsebene
	Abdeckung Planungsebene
	Abdeckung Steuerungsebene
	Abdeckung Ausführungsebene
Anforderungen aus Erkenntnissen des Prüffeldbetriebs	Abdeckung Gesamtprozess
	Optimierung Kapazität
	Optimierung Qualität
	Eignung für Supportprozesse
	Umsetzbar in bestehender Struktur
	Möglichst geringes Risiko
	Integration Beteiligter
	Visualisierung
Anforderungen aus Erkenntnissen der Übertragbarkeitsprüfung	Für kleinere Stückzahlen geeignet
	Einsetzbar in dynamischem, weniger planbarem Umfeld
	Flexible Ansätze zur Anpassung an den Prüffeldbetrieb nötig

Bild 1: Anforderungen an eine Optimierungsmethodik

Zudem sind solche Methoden für eine Übertragung zu wählen, die Eigenschaften besitzen, welche einen Einsatz im Prüffeldbetrieb erleichtern. Zu bevorzugen sind diejenigen, die sich in Produktionsumgebungen mit kleineren Stückzahlen bewährt haben, da dies vergleichbarer mit dem Prüffeldbetrieb ist. Zudem muss der Einsatz in einem dynamischen, weniger

planbaren Umfeld möglich sein. Hierfür sind flexible Ansätze notwendig, die an die Bedingungen des Prüffeldbetriebs angepasst werden können. Bild 1 zeigt die ermittelten Anforderungen. [3, 4]

2.3 Werteprofil für den Variantenvergleich

Zur Bewertung der Optimierungsmethoden dient das Werteprofil für den Variantenvergleich. Dieser Ansatz stammt aus der Produktentwicklung und dient zur Auswahl der optimalen Lösungsvariante. Durch die Möglichkeit, mehrere Bewertungskriterien zu integrieren und diese mit Gewichtungsfaktoren zu belegen, wird eine transparente Entscheidungsfindung ermöglicht. Hierfür werden die ermittelten Anforderungen mit Gewichtungsfaktoren (1 = normale Relevanz; 2 = hohe Relevanz; 3 = sehr hohe Relevanz) belegt. Anschließend werden die Optimierungsmethoden der Produktion hinsichtlich ihrer Eigenschaften mit einer Werthöhe zwischen 1 und 10 (1 = keine Erfüllung der Anforderung; 10 = optimale Erfüllung der Anforderung) bewertet. Der Nutzwert errechnet sich als Produkt der Werthöhe mit dem Gewichtungsfaktor. Aus der Summe jedes einzelnen Nutzwerts lässt sich der Gesamtnutzwert für die jeweilige Optimierungsmethode der Produktion errechnen. Bild 2 zeigt das resultierende Werteprofil zur Beurteilung der Optimierungsmethoden der Produktion. [3, 4, 17]

Die grafische Visualisierung ermöglicht einen schnellen Überblick über die Eignung der Optimierungsmethoden zur Generierung einer Prüffeldoptimierungsmethodik. Es zeigt sich, dass die Methoden Kaizen, Six Sigma und die Wertstrommethode einen Erfüllungsgrad von jeweils über 75 % erreichen.

Die Methoden Business Reengineering (Erfüllungsgrad 47,4 %) und Lean Production (Erfüllungsgrad 52,9 %) fallen im Vergleich deutlich zurück. Dies ist für Business Engineering auf das hohe Risiko der Methode und das nur wenig strukturierte Vorgehen zurückzuführen. Für Lean Production lässt sich feststellen, dass die genutzten Werkzeuge stark auf den Einsatz in einem Produktionsumfeld ausgerichtet sind. Eine standardisierte Massenproduktion kann jedoch nicht mit Entwicklungsaktivitäten verglichen werden und macht eine Übertragung von Lean Production daher schwierig. [15, 18]

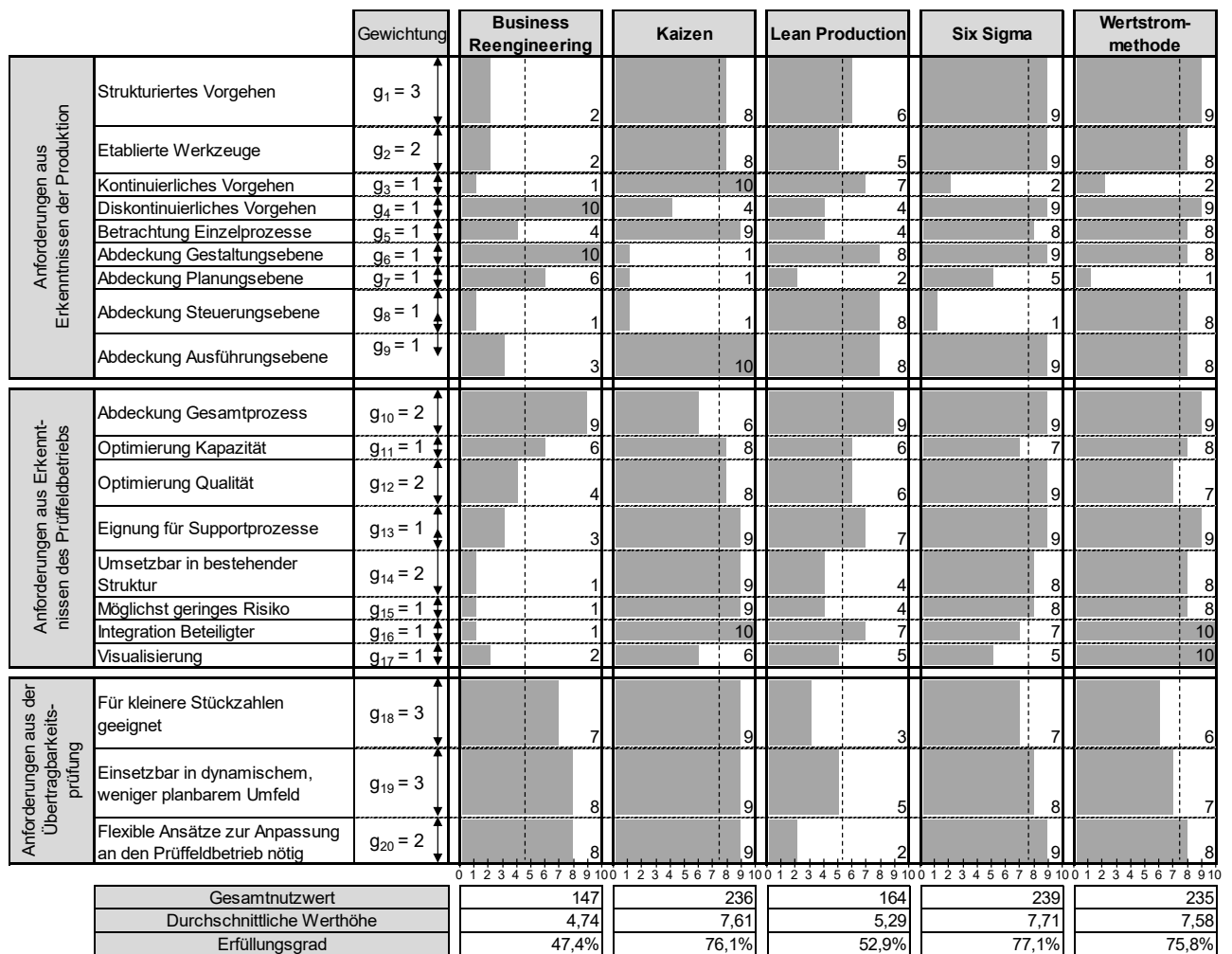


Bild 2: Werteprofil zur Beurteilung der Optimierungsmethoden der Produktion

Die Methoden Kaizen, Six Sigma und die Wertstrommethode dienen somit als Basis zur Entwicklung der POM. Im Produktionsbereich ist es ebenfalls üblich, Methoden zu kombinieren. [12]

Als Basis für zeitlich begrenzte Verbesserungsprojekte dient Six Sigma. Die Wertstrommethode wird zur Prozessbeschreibung in das Vorgehen für Verbesserungsprojekte integriert und ermöglicht eine sehr gute Visualisierung und Integration aller Beteiligten.

Um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess im Prüffeld zu etablieren, wird das Vorgehen der Methode Kaizen integriert und permanent angewendet. Bild 3 zeigt die Bewertung der einzelnen Methoden und das weitere Vorgehen.

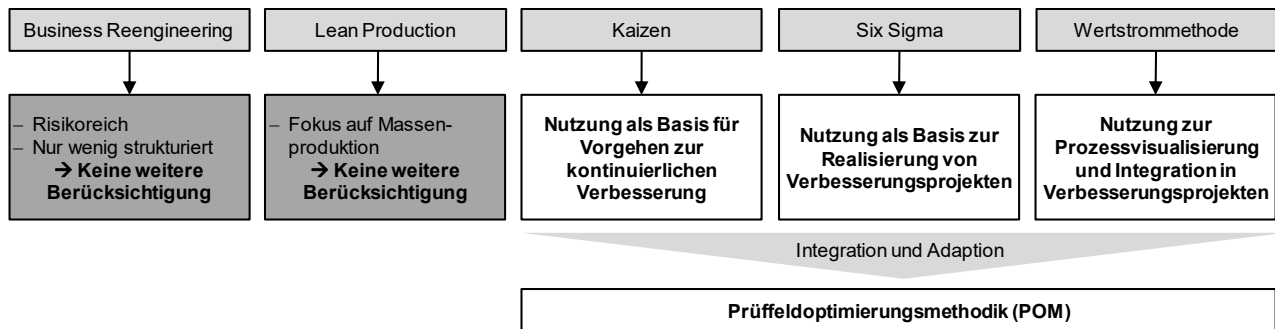


Bild 3: Integration der Optimierungsmethoden der Produktion zur Prüffeldoptimierungsmethodik

Nach der Bewertung und Auswahl der geeignetsten Methoden wird aus diesen im nächsten Schritt die Prüffeldoptimierungsmethodik entwickelt.

3 Entwickelte Prüffeldoptimierungsmethodik

Auf Basis der Methode Kaizen wird ein Vorgehen zur kontinuierlichen Verbesserung im Prüffeldbetrieb erarbeitet. Dieses unterteilt sich (angelehnt an einen Plan-, Do-, Check-, Act-Zyklus) in die Phasen Planen, Ausführen, Prüfen und Handeln (vgl. Bild 5). Zu Beginn wird in der Planungsphase das Verbesserungsprojekt identifiziert. Anschließend wird eine Ist-Analyse durchgeführt, um den aktuellen Zustand zu erfassen. Auf dieser Basis wird eine Problembeschreibung erstellt und mögliche Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. [19, 20] In der nachfolgenden Ausführungsphase werden die Verbesserungsmaßnahmen umgesetzt und die erzielten Ergebnisse dokumentiert und visualisiert.

Danach wird in die Prüfungsphase eingetreten, um die erzielten Ergebnisse zu kontrollieren. Je nachdem, wie die Ergebnisse ausgefallen sind, können in der Handlungsphase bewährte Lösungen implementiert und die nächsten Schritte geplant werden. Dieser Zyklus wird anschließend erneut durchlaufen, da die kontinuierliche Verbesserung ein nie endender Prozess ist. [21]

Die Planungsphase wird von Neuem durchlaufen, um weitere Potentiale zu erkennen und zu beheben und neue Ziele zu erreichen. Damit wird ein kontinuierlicher Prozess der Verbesserung etabliert. Dies ermöglicht das Einbringen von Erkenntnissen der operativen Arbeitsebene und damit eine lokale Verbesserung. Der Ansatz kann jedoch an seine Grenzen stoßen, falls eine Verbesserung über einzelne Bereiche hinaus notwendig ist. Damit ist keine Lösung direkt vor Ort in den gegebenen Grenzen möglich. In diesem Fall können die gewonnenen Erkenntnisse in ein separat durchzuführendes Verbesserungsprojekt münden. [21, 22]

Angelehnt an den Six Sigma DMAIC-Zyklus wird die Durchführung von Verbesserungsprojekten im Prüffeldbetrieb in die Phasen Initialisieren, Definieren, Messen, Analysieren, Ausarbeiten, Realisieren und Kontrollieren strukturiert. In der Initialisierungsphase findet die Prüfung statt, ob die Problemstellung zur Durchführung eines Verbesserungsprojekts geeignet ist. Falls es mehrere potentielle Projekte gibt, wird im nächsten Schritt das Projekt ausgewählt, welches ein möglichst gutes Aufwand- / Nutzen-Verhältnis aufweist. Anschließend wird in die Definitionsphase eingetreten. Der Empfänger des Prozessergebnisses (Kunde) wird identifiziert. Anschließend werden dessen Anforderungen messbar gemacht. Dann werden die zentralen (qualitätskritischen) Merkmale identifiziert, die den größten Einfluss auf die Zufriedenheit des Kunden besitzen. Ist dies erfolgt, wird ein Projektsteckbrief ausgearbeitet und das Projekt beauftragt. Zum Abschluss der Definitionsphase wird eine erste Prozessbeschreibung erstellt. [23]

In der folgenden Messphase findet die Erhebung der benötigten Daten statt. Die Output-messkriterien werden festgelegt. Dies sind Kennzahlen, die Rückschlüsse auf die Erfüllung der qualitätskritischen Merkmale ermöglichen. Hierfür wird die Datenerfassung geplant und realisiert. Anschließend wird die Leistungsfähigkeit des Prozesses mit Hilfe der Formel für die Prozessfähigkeit ermittelt. Anhand des Mittelwerts und festgelegter Ober- und Untergrenzen, die das Prozessergebnis einhalten soll, kann der Prozessfähigkeitsindex berechnet werden, dargestellt in Bild 4. [23, 24]

Mittelwert \bar{x}	=	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	➔	Prozessfähigkeitsindex C_{pK}	=	$\frac{\min(\bar{x} - USG; OSG - \bar{x})}{3\sigma}$
Standardabweichung σ	=	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$		OSG = Obere Spezifikationsgrenze: Maximalwert, den der Prozess einhalten soll	USG = Untere Spezifikationsgrenze: Minimalwert, den der Prozess einhalten soll	

Bild 4: Formel Prozessfähigkeitsindex

In der folgenden Analysephase werden die Daten und der ablaufende Prozess betrachtet. Hierfür wird eine Wertstromanalyse des Prozesses durchgeführt. Dies ermöglicht die Ermittlung der Grundursachen, die zu schlechten Prozessergebnissen führen. Aus diesen Ursachen werden ein bis drei Haupteinflussfaktoren identifiziert, die beseitigt werden sollen. Eine Ertragsschätzung überprüft, ob die angestrebte Verbesserung zu wirtschaftlichen Vorteilen führt. Ist dies der Fall, wird in die Ausarbeitungsphase eingetreten. Andernfalls wird das Projekt beendet. [25]

In der folgenden Phase werden im Team mögliche Lösungen erarbeitet und mittels des Werteprofil-Ansatzes die optimale Lösung ausgewählt. Anschließend wird zur Umsetzung der Lösung ein Soll-Prozess erarbeitet. Nach dieser Ausarbeitung wird in der Realisierungsphase ein Pilotprojekt durchgeführt, um die Wirksamkeit der Lösung zu bewerten. Die Prozessfähigkeit des neuen Prozesses wird erneut berechnet. Damit kann die Leistungsfähigkeit der erarbeiteten Lösung bewertet werden. Bei einem positiven Ergebnis wird der neue Prozess auf einen größeren Bereich ausgerollt. Andernfalls wird die Ausarbeitungsphase erneut durchlaufen. [17]

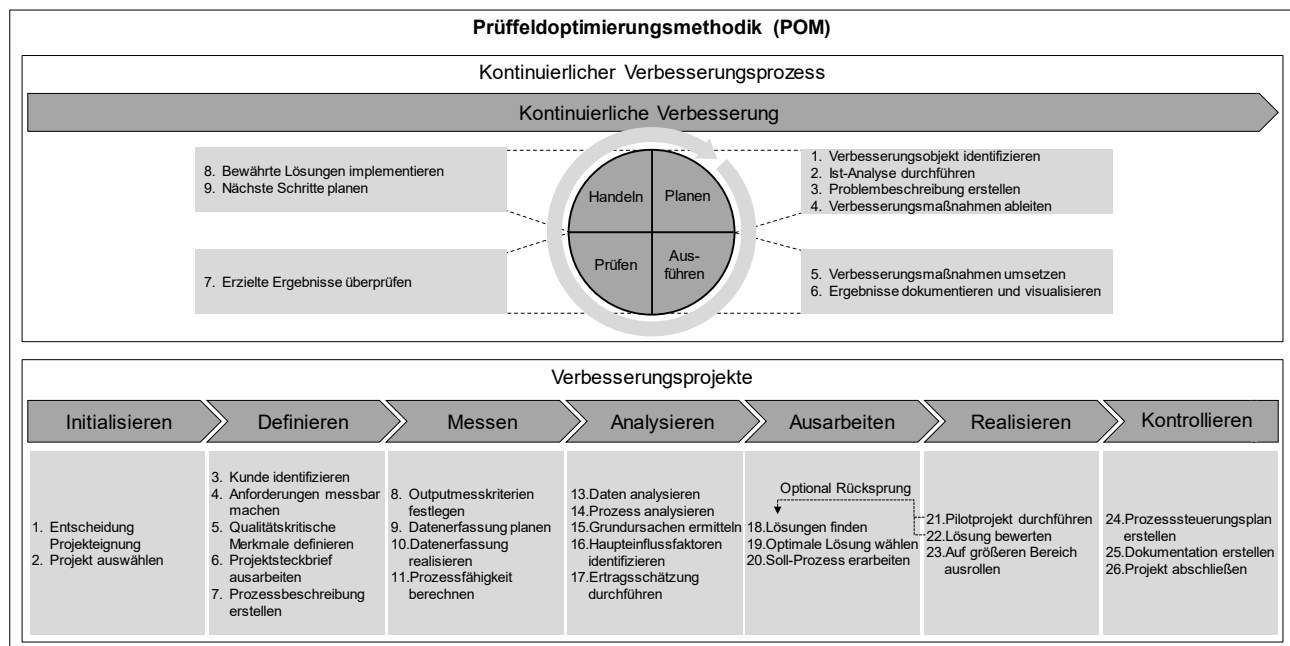


Bild 5: Entwickelte Prüffeldoptimierungsmethodik (POM)

Nach Abschluss der Realisierungsphase wird in die Kontrollphase eingetreten. Es wird ein Prozesssteuerungsplan erstellt, um die Leistung des Prozesses weiterhin zu messen und falls nötig Maßnahmen zu ergreifen. Zudem wird das durchgeführte Verbesserungsprojekt dokumentiert. Als letzter Schritt findet der finale Prozessabschluss statt. [25]

Zur praktischen Umsetzung der Prüffeldoptimierungsmethodik wurden die erläuterten Schritte in einem Softwaretool abgebildet, welches den Nutzer Schritt für Schritt durch Prozessverbesserungen führt. Dies beinhaltet weitere Informationen zu den jeweiligen Aktivitäten und zahlreiche Werkzeuge (z. B. Analysemethoden und Kreativitätstechniken), welche die Durchführung der einzelnen Schritte unterstützen. Bild 5 fasst die entwickelte Prüffeldoptimierungsmethodik zusammen.

Damit wurde ein strukturiertes Vorgehen zur Prozessoptimierung im Prüffeldbetrieb erarbeitet: Kernelement ist die quantitative Bewertung der Prozessleistung vor und nach der Prozessverbesserung. Dies ermöglicht es, Prozessergebnisse zu messen und eine Erfolgskontrolle durchzuführen. Zudem stellt das entwickelte Softwaretool eine Anleitung des Verwenders und eine einheitliche Dokumentation sicher. Des Weiteren entsteht eine Wissensdatenbank abgeschlossener Verbesserungsprojekte.

4 Validierung

Die entwickelte POM wurde im verbrennungsmotorischen Prüffeld der BMW Group in München eingesetzt. Dabei wurde das strukturierte Vorgehen sowohl zur kontinuierlichen Verbesserung als auch in einem Verbesserungsprojekt genutzt. Hierbei konnte die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methodik bestätigt werden. Im Rahmen eines Verbesserungsprojekts während des Motoraufbaus wurde die Zufriedenheit der Motormechaniker befragt. Der Mittelwert der Zufriedenheit der Mechaniker hinsichtlich der für Sie notwendigen Vorleistung (Bewertungsbereich 1 = schlecht; 10 = hervorragend) konnte von 7,31 auf 8,40 gesteigert werden. Der berechnete Prozessfähigkeitsindex stieg von 0,33 vor der Prozessverbesserung auf 1,46 und damit um 443 % gegenüber dem Ausgangswert.

5 Fazit

Die gesteigerten Anforderungen an Prüffelder machen eine permanente Prozessanpassung und -optimierung notwendig. Bestehende Methoden machen nur wenige Vorgaben zur strukturierten Durchführung von Prozessverbesserungen. Aus diesem Grund wurde überprüft, ob weit entwickelte Optimierungsmethoden der Produktion auf den Prüffeldbetrieb übertragen werden können. Hierfür wurden weit verbreitete Methoden der Produktion identifiziert und strukturiert bewertet. Es zeigte sich, dass die Methoden Kaizen, Six Sigma und die Wertstrommethode gut für eine Übertragung geeignet sind. Diese Methoden bildeten die Basis für die Entwicklung der Prüffeldoptimierungsmethodik. Neben der Etablierung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses wird damit die strukturierte Durchführung von Verbesserungsprojekten ermöglicht. Die praktische Anwendung wird mittels eines Softwaretools unterstützt, welches den Anwender Schritt für Schritt anleitet und weiterführende Informationen und unterstützende Werkzeuge beinhaltet. Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methodik konnte im praktischen Ansatz zur Prozessoptimierung im Prüffeldbetrieb bestätigt werden.

Literatur

- [1] Guggenmos, Johannes; Rückert, Joachim; Stopper, Daniel u. Thalmair, Sebastian: Das Prüffeld der Antriebsentwicklung im Wandel. *Motortechnische Zeitschrift extra* 21 (2016) 2, S. 12–17
- [2] Feldhusen, Jörg u. Grote, Karl-Heinrich: Teil IV: Ansätze zur Rationalisierung in Entwicklung und Konstruktion: Einleitung. In: Feldhusen, Jörg u. Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin: Springer Vieweg 2013, S. 769–816
- [3] Schmitt, Marc Claus u. Grote, Karl-Heinrich: Process optimization in test field operations. In: Watanuki, Keiichi; Grote, Karl-Heinrich u. Tsutsumi, Ichiro (Hrsg.): *Proceedings of the 8th International Conference on Business and Technology Transfer (ICBTT 2016)*. Tokyo: Japan Society of Mechanical Engineers 2016, S. 27–34
- [4] Schmitt, Marc Claus u. Grote, Karl-Heinrich: Vorgehen zur Optimierung der Entwicklungstätigkeiten im Prüffeldbetrieb. In: Brökel, Klaus; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Rieg, Frank; Stelzer, Ralph; Köhler, Peter; Müller, Norbert u. Scharr, Gerhard (Hrsg.): *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016*. Herzogenrath: Shaker 2016, S. 185–193
- [5] Paulweber, Michael u. Lebert, Klaus: *Mess- und Prüfstandstechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [6] Trampert, Stefan; Kunz, Steffen; Zimmer, Kurt u. Gillesen, Marianne: Prozessorientierte Projektentwicklung im DLP. *Motortechnische Zeitschrift* 13 (2008) 12, S. 27–29
- [7] Osborne, Richard; Ciriello, Antonio u. Graupner, Wilhelm: Sieben Wege zur Prüffeld-Effektivität. *Automobiltechnische Zeitschrift extra* 19 (2014) 1, S. 46–51
- [8] Grote, Karl-Heinrich; Engelmann, Frank; Beitz, Wolfgang; Syrbe, Max; Beyerer, Jürgen u. Spur, Günter: *Das Ingenieurwissen: Entwicklung, Konstruktion und Produktion*. Berlin: Springer Vieweg 2014
- [9] Houldcroft, John; Beattie, Tim; Neil, Andrew; Ducker, Simon; Bristow, Julian; Osborne, Richard; Ciriello, Antonio; Wilkins, Matthew; Balcombe, Andrea; Ney, Andreas u. Graupner, Wilhelm: Holistic Powertrain Development and Test Productivity Optimisation at Jaguar Land Rover. In: AVL (Hrsg.): *5th International Symposium on Development Methodology*. Wiesbaden 2013, S. 131–146
- [10] Becker, Torsten: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008
- [11] Chiarini, Andrea: *Lean organization*, Bd. 3. Mailand: Springer 2013
- [12] Schmelzer, Hermann u. Sesselmann, Wolfgang: *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis*. München: Hanser 2013
- [13] Harmon, Paul: *Business Process Change*. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann 2014
- [14] Arndt, Holger: *Logistikmanagement*. Wiesbaden: Springer 2015
- [15] Koch, Susanne: *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen*. Berlin: Springer Vieweg 2015
- [16] Binner, Hartmut F.: *Methoden-Baukasten für ganzheitliches Prozessmanagement*. Wiesbaden: Springer Gabler 2016
- [17] Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Nagarajah, Arun; Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang u. Wartzack, Sandro: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: Feldhusen, Jörg u. Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin: Springer Vieweg 2013, S. 291–410

- [18] Peter, Kathrin u. Lanza, Gisela: Company-specific quantitative evaluation of lean production methods. *Production Engineering* 5 (2011) 1, S. 81–87
- [19] Deming, Edwards W.: *Out of the crisis*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology 1982
- [20] Imai, Masaaki: *Kaizen (Ky'zen), the key to Japan's competitive success*. New York: Random House Business Division 1986
- [21] Liker, Jeffrey K.: *Der Toyota Weg*. München: FBV FinanzBuch Verlag 2014
- [22] Bornhöft, Frank u. Coners, André: Prozessoptimierung mit Lean Six Sigma. In: Becker, J.; Kugeler, M. u. Rosemann, M. (Hrsg.): *Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 485–514
- [23] Toutenburg, Helge u. Knöfel, Philipp: *Six Sigma*. Berlin: Springer 2009
- [24] Töpfer, Armin: Six Sigma als Projektmanagement für höhere Kundenzufriedenheit und bessere Unternehmensergebnisse. In: Töpfer, Armin (Hrsg.): *Six Sigma: Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität*. Berlin, Heidelberg: Springer 2013, S. 38–85
- [25] Pyzdek, Thomas u. Keller, Paul A.: *The Six Sigma Handbook*. New York: McGraw-Hill 2010

Wissensbasierte Absicherung virtueller Lebensdauerprognosen von Elastomerbauteilen

Maurice Mistler, René Andrae,
Peter Köhler, Johannes Wortberg

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Email: maurice.mistler@uni-due.de; Internet: <https://www.uni-due.de/kkm/>

Inhalt: Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz stellt eine Methode für die Lebensdauerprognose von dynamisch belasteten Elastomerbauteilen auf der Basis von lokalen Materialbeanspruchungsgrößen vor. Durch die Berechnung der Materialbeanspruchungen mit der Finite Elemente Methode (FEM) ist es nach einer Kalibrierung des nichtlinearen Schadensakkumulationsmodells möglich, Lebensdauern für beliebige Geometrien gleicher Beanspruchungsart zu prognostizieren.

Abstract: The approach presented in this paper provides a method for a life time prediction of dynamically loaded elastomer components based on material stress. Due to the calculation of the material stresses using the finite element analysis (FEA), it is possible to predict the part lifetime after the calibration of the non-linear damage accumulation model for any desired geometry and similar type of material stress.

Stichwörter: Lebensdauerprognose, Elastomer, Yeoh-Materialmodell, Materialbeanspruchung, zeit- und last-abhängiges Materialverhalten

Keywords: Life time prediction, Elastomer, Yeoh-material model, material stress, time and load dependend Material behavior

1 Einleitung

Elastomerbauteile werden in vielen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus eingesetzt und sind aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften hervorragend geeignet, um schwingungstechnische Problemstellungen zu lösen. Trotz der heute weit verbreiteten Anwendung im technischen Bereich liegt der aktuelle Kenntnisstand über die materialspezifischen Phänomene noch deutlich hinter dem von anderen technischen Werkstoffen wie Metallen und auch thermoplastischen Kunststoffen zurück. Die zunehmende Anwendung elastomerer Bauteile in mobilen und hochdynamischen Systemen hat zur Folge, dass die Lebensdauerprognose für Elastomere zentraler Gegenstand vieler aktueller Forschungsarbeiten ist. Am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen der Universität Duisburg-Essen wurde ein nichtlineares Schadensakkumulationsmodell (nISAM) entwickelt. Dieses ermöglicht die

Berechnung von Lebensdauern von dynamisch beanspruchten Elastomerbauteilen in Abhängigkeit verschiedenster mechanischer Beanspruchungssituationen und –abfolgen.

Der in [5] vorgestellte Ansatz erweitert diese Methode um die Lebensdauerprognose von dynamisch belasteten Elastomerbauteilen auf der Basis von lokalen Materialbeanspruchungsgrößen. Nach der Kalibrierung des nichtlinearen Schadensakkumulationsmodells ist es möglich, Lebensdauern für beliebige Geometrien zu prognostizieren. Hierbei wird vorausgesetzt, dass identisches Material verwendet wird und die Beanspruchungsart ähnlich ist. In diesem Beitrag ein spezieller Augenmerk auf die Datenverarbeitung gelegt.

2 Stand der Technik

Die Simulation von Elastomeren ist gegenüber der von Metallen ein (noch) relativ junges Forschungsgebiet. In den folgenden Abschnitten werden gängige wissenschaftliche und technische Standards mit Bezug zum Beitrag zusammengefasst und bewertet. Im Einzelnen werden zunächst verschiedene Anwendungsgebiete und damit verbundene Lösungsansätze im interdisziplinären Umfeld vorgestellt.

Die Vielzahl und die Umsetzung bisheriger interdisziplinärer Forschungsarbeiten zeigen, dass die Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und somit des Werkstoffverhaltens unter Belastung bisher nur durch die Kombination experimenteller Untersuchungen und rechnergestützter Simulationen erfolgt. Durch das komplexe Materialverhalten der Kunststoffe werden stetig neue Möglichkeiten zur Parametrisierung und Abbildung des Materialverhaltens entwickelt. [1] [2]

Für die Beschreibung des Materialverhaltens bei rechnergestützten Simulationen sind spezielle Materialmodelle notwendig. Besonders bei großen Verformungen, bei denen der beanspruchte Bauteilquerschnitt und die Lastangriffspunkte mathematisch berücksichtigt werden müssen, sind spezielle theoretische Ansätze erforderlich [3].

Neben den bekannten Materialmodellen, die Gültigkeiten für Kurzzeit-, Langzeit- und dynamische Belastung besitzen, sind für speziellere Problemstellungen entweder angepasste oder neue Modelle für eine realistische Berechnung notwendig. Bei Kurzzeituntersuchungen gehören u. a. das Neo-Hooke-Modell, das Yeoh-Modell, das Mooney-Rivlin-Modell und das Ogden-Modell 2. Ordnung zum Stand der Technik. Bei allen handelt es sich um hyperelastische Materialmodelle, bei denen die Spannungsantwort durch den aktuellen Deformationszustand beschrieben wird.

Im Preprocessing der eigentlichen Simulation müssen die Materialdaten des zu simulierenden Elastomers in Form von materialspezifischen Parametern aus dem jeweiligen Materialmodell in das Simulationsmodell integriert werden. Die Kalibrierung der Parameter kann auf Basis experimenteller oder tabellierter Daten erfolgen [3]. Wichtig für die verwendeten Experimente zur Parameteridentifikation ist, dass diese so durchgeführt werden, dass die im Materialmodell enthaltenden Effekte angesprochen werden [1].

Aktuelle Lebensdauerprognosemodelle basieren häufig auf Kenntnissen über die Beanspruchbarkeit von Prüfkörpern. Eine Übertragung dieser Kenntnisse von den im Laborrahmen eingesetzten Prüfkörpern auf Elastomerbauteile aus technischen Anwendungen führt zu großen Streuungen in der Lebensdauervorhersage und somit zu unzuverlässigen Vorhersagen von Ausfallzeitpunkten, da keine allgemeingültige Festigkeitshypothese für Elastomere existiert.

In den Untersuchungen von Spitz [4] wurde ein mathematischer Ansatz für dynamisch belastete Elastomerbauteile entwickelt, der durch ein nichtlineares Schadensakkumulationsmodell (nLSAM) die Vorhersage von Schädigungsverläufen und Ausfallzeitpunkten, unter der Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten bei der Bauteilbelastung, ermöglicht.

Damit Elastomerbauteile hinsichtlich ihrer Zeitfestigkeit bzw. Lebensdauer beanspruchungsgerecht und ohne hohen experimentellen Aufwand optimiert werden können, benötigen Konstrukteure und Berechnungsingenieure Werkzeuge zur virtuellen Produktoptimierung. Bisherige Arbeiten zeigen, dass die Lebensdauerprognosemodelle auf Basis experimenteller Untersuchungen häufig für das untersuchte Bauteil und im Rahmen der Prüfbelastungen ihre Gültigkeit haben. Auch die Unterstützung moderner Simulationsmethoden zeigt, dass diese durch experimentelle Untersuchungen abgesichert werden müssen. Dies ist auch der Fall, wenn die Geometrie der Bauteile nach den Untersuchungen geringfügig geändert wird, um die Lebensdauer zu erhöhen.

3 Virtuelle Lebensdauerprognose

In diesem Beitrag wird die Entwicklung einer Methodik zur virtuellen Lebensdauerprognose von Elastomerbauteilen auf der Basis von Materialbeanspruchungen vorgestellt.

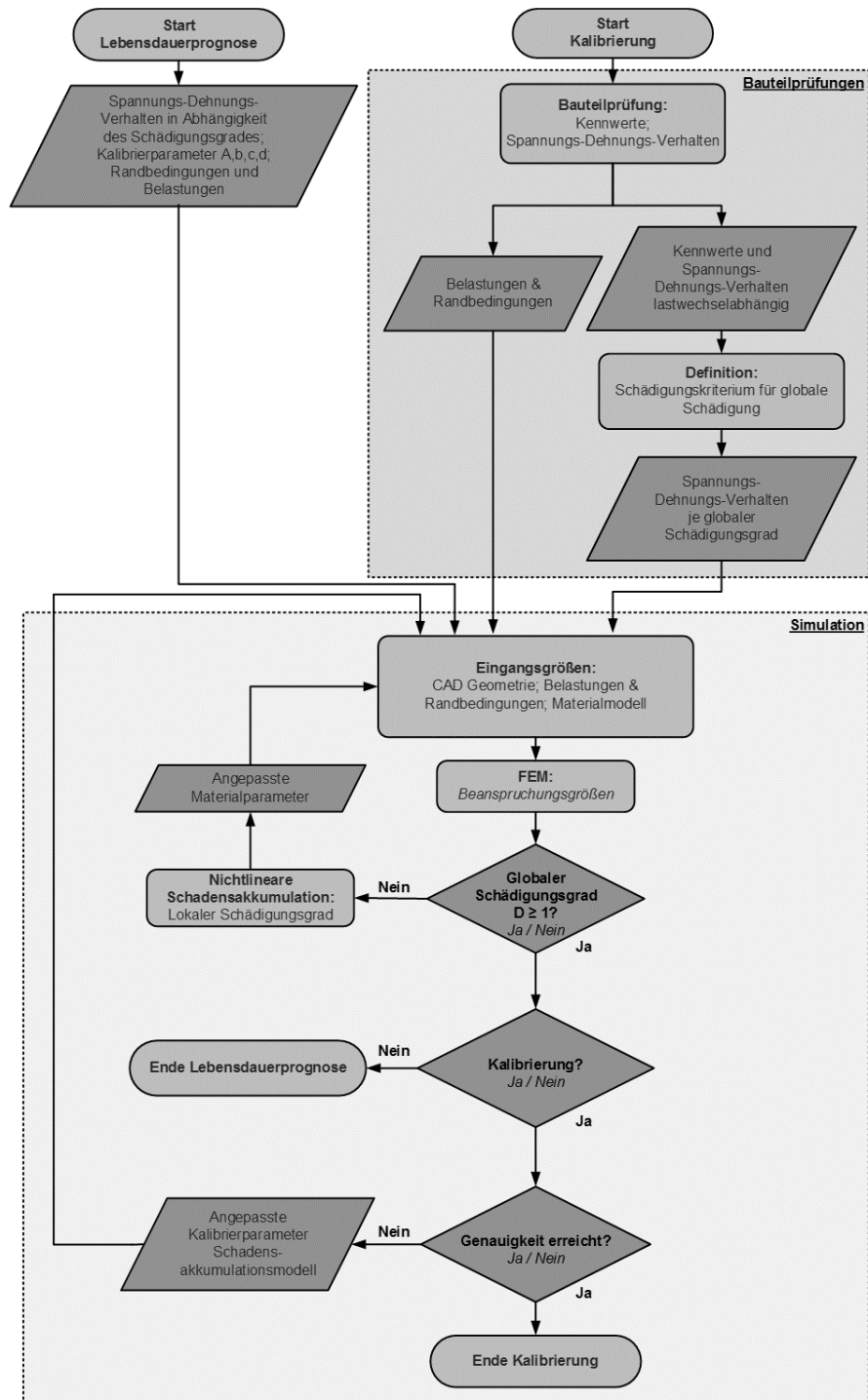


Bild 1: Ablaufdiagramm für Lebensdauerberechnung und Kalibrierung der Methode [5]

Die Lebensdauer wird anhand des durch Spitz [4] entwickelten nichtlinearen Schadensakkumulationsmodells (nLSAM) für beliebige dynamische Belastungsszenarien prognostiziert. Dabei wird die globale Lebensdauer für ein Bauteil auf Basis lokaler Schädigungsgrade berechnet. Zur Ermittlung dieser Schädigungsgrade ist die Berechnung der lokalen Bauteilbeanspruchungen erforderlich. Diese Beanspruchungen sind durch FE-Simulationen zu be-

rechnen. Der gesamte Workflow ist in Bild 1 dargestellt. Dieser gliedert sich in zwei Schwerpunkte: die Kalibrierung und Lebensdauerprognose eines Bauteils. Als Untersuchungsbauteile dienen nichtschaltbare Elastomerkupplungen, da Elastomerwerkstoffe ein ausgeprägtes zeit- und belastungsabhängiges Werkstoffverhalten zeigen, welches sich über die gesamte Lebensdauer verändert. Das modifizierte nLSAM wird über eine Benutzeroberfläche in den gesamten Programmablauf integriert. Neben der Übergabe der Parameter aus der FE-Simulation wurden weitere Funktionen, die Steuerung und Überwachung des gekoppelten numerischen und analytischen Berechnungsablaufs integriert.

3.1 Simulationsmethodik

Die Methodik basiert auf der Annahme, dass die Höhe und Anzahl der Zyklen der Materialbeanspruchungen und im realen Bauteil zu einer lokalen Materialschädigung führen, welche eine lokale Änderung der Materialeigenschaften zur Folge haben. Die Summe der lokalen Eigenschaftsänderungen ergibt den für Elastomere typischen exponentiellen Steifigkeitsverlust zum Ende der Bauteillebensdauer. Dies wird als Voraussetzung für eine Kalibrierung des Materialmodells festgelegt. Anhand von dynamischen Bauteilprüfungen werden Kennwertverläufe und Hysteresen des zu untersuchenden Bauteils aufgenommen und daraus Schädigungsverläufe abgeleitet. Der Abfall der Bauteilsteifigkeit um einen bestimmten Betrag wird dabei als Ausfallkriterium definiert. Die im Versuch je Belastungszyklus aufgenommenen Hysteresen werden anschließend dem berechneten Schädigungsgrad zugeordnet. Anhand der Hystereseschleifen wird das gewählte Materialmodell je Schädigungsgrad kalibriert, indem im FEM-Modell des Bauteils homogenes Material angenommen wird und die Materialparameter so gewählt werden, dass eine möglichst hohe Übereinstimmung von gemessenen und mit der gleichen Belastungsgröße simulierten Hystereseschleifen bzw. Spannungs-Dehnungs-Verhalten erreicht wird. Die so je Schädigungsgrad bestimmten Materialparametersätze dienen für die Lebensdauersimulation als Vorgabe für die schädigungsabhängigen lokalen Materialparameterveränderungen. Die Lebensdauersimulation selbst wird mit dem gleichen aus den Bauteilversuchen abgeleiteten Simulationsmodell durchgeführt, welches schon für die Kalibrierung des Materialmodells genutzt wurde. Zunächst werden in der initialen FE-Rechnung homogene Materialparameter für jedes einzelne Netzelement angenommen. Um den Steifigkeitsverlust des Bauteils für die Schädigungsberechnung zu extrahieren, muss die Bauteilsteifigkeit, wie im Bauteilversuch abgegriffen werden. Die erste Rechnung gibt die Steifigkeit im ungeschädigten Zustand des Bauteils zu Lastwechsel 0 aus. Die je Netzelement berechneten Materialbeanspruchungen

werden anschließend dem nichtlinearen Schadensakkumulationsmodell zugeführt, welches einen lokalen Schädigungsgrad am Netzelement je FE-Rechnung und somit je Lastwechsel berechnet. Zur Verkürzung der Gesamtrechnenzeit bietet sich hier an, Lastwechsel in Blöcken zusammenzufassen. In Abhängigkeit des berechneten lokalen Schädigungsgrades werden die Materialparameter des einzelnen Netzelements individuell gemäß des oben gefundenen Zusammenhangs angepasst. Mit den neu zugewiesenen Materialparametern und ansonsten identischen Randbedingungen wird die nächste FE-Rechnung durchgeführt. Aus dieser resultieren neue Beanspruchungsdatensätze und eine neue Gesamtbauteilsteifigkeit, die nach gewähltem Schädigungskriterium einen globalen Bauteilschädigungsgrad ergibt. Es werden so viele Rechnungen durchgeführt, bis das Bauteil definitionsgemäß als ausgefallen gilt. Durch diese Methodik werden Schädigungsverläufe erzeugt, mit denen das nichtlineare Schadensakkumulationsmodell kalibriert wird. Dabei wird die größtmögliche Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten globalen Schädigungsverläufen mit Hilfe der gezielten Veränderung von Parametern des Schadensakkumulationsmodells gesucht. Ist der Zusammenhang gefunden, können die Erkenntnisse auf beliebige Geometrien gleicher Beanspruchungsart und gleichen Materials übertragen werden. Die Beanspruchungshöhe und -reihenfolge kann anwendungsspezifisch verändert werden.

3.1.1 Allgemeiner Workflow

Der Anwender startet die Lebensdauersimulation aus der Simulationsumgebung heraus. Zuvor führt er das Preprocessing durch und erstellt dabei auch das gesamte Simulationsmodell mit Randbedingungen etc. Im Anwendungsprogramm werden dann automatisiert Templatedateien aus dem Simulationsmodell abgeleitet. Hier muss der Anwender einmalig die im Simulationsmodell definierten Lastangriffspunkte zusätzlich im Anwenderprogramm hinterlegen, um die Belastungsgrößen der Simulation auch im Anwenderprogramm steuern zu können. Die Benutzeroberfläche dient dann der Steuerung und Überwachung des Prozesses.

Die numerischen Berechnungen erfolgen in Abaqus und die analytischen in Matlab. In Abaqus werden mittels FEM die Elastomerkupplungen simuliert und in Matlab erfolgt das Fitting der Yeoh-Parameter und des nichtlinearen Schadensakkumulationsmodells. Die Endergebnisse werden nach Ablauf der Simulation und die Zwischenergebnisse in bestimmten Abständen in die GUI geladen.

3.1.2 Automatisiertes Processing

Eine Simulation in Abaqus lässt sich skriptbasiert ohne die Verwendung der Benutzeroberfläche starten. Dafür muss ein Skript im Python Format erstellt werden. Zusätzlich sind alle Informationen zu Rand- und Lastbedingungen, dem Materialmodell in einer Input-Datei zu hinterlegen, die mit Hilfe des Skriptes in Abaqus geladen und durchgerechnet wird (siehe auch Abbildung 2). Die Ergebnisse der Abaqus-Simulationen liegen später in Form von Output-Dateien, die wiederum mit Hilfe eines Pythonskripts ausgelesen werden müssen, vor. Für eine Anpassung (hinsichtlich der Modellaufbereitung für eine Lebensdauerprognose) einer bestimmten Simulation muss das Input-File geändert werden. Dafür wurde dieses in Matlab in eine Klasse überführt. Die unterschiedlichen Abschnitte der Input-Datei wie Materialmodell, Belastungsgrößen, Randbedingungen (siehe auch Abbildung 2) wurden als Attribute definiert. Der Zugriff erfolgt über verschiedene (öffentliche) Methoden. Die Input-Datei wird dadurch im System in einer Baumstruktur abgelegt.

Eine vorläufige Input-Datei wird durch den Anwender im Rahmen des Preprocessings in Abaqus erstellt. Startet der Anwender in Abaqus das Anwenderprogramm, werden automatisch aus dem Input-File alle Attribute ausgelesen und mit den späteren Einstellungen des Anwenders ergänzt.

Die Steuerung der Simulation in Abaqus erfolgt dementsprechend ausschließlich aus Matlab. Nach jeder Iteration bildet Matlab eine neue Instanz von Abaqus, startet dieses, lässt die Simulation durchführen und interpretiert die Ergebnisse der Output-Datei, sofern das Abbruchkriterium nicht erfüllt ist.

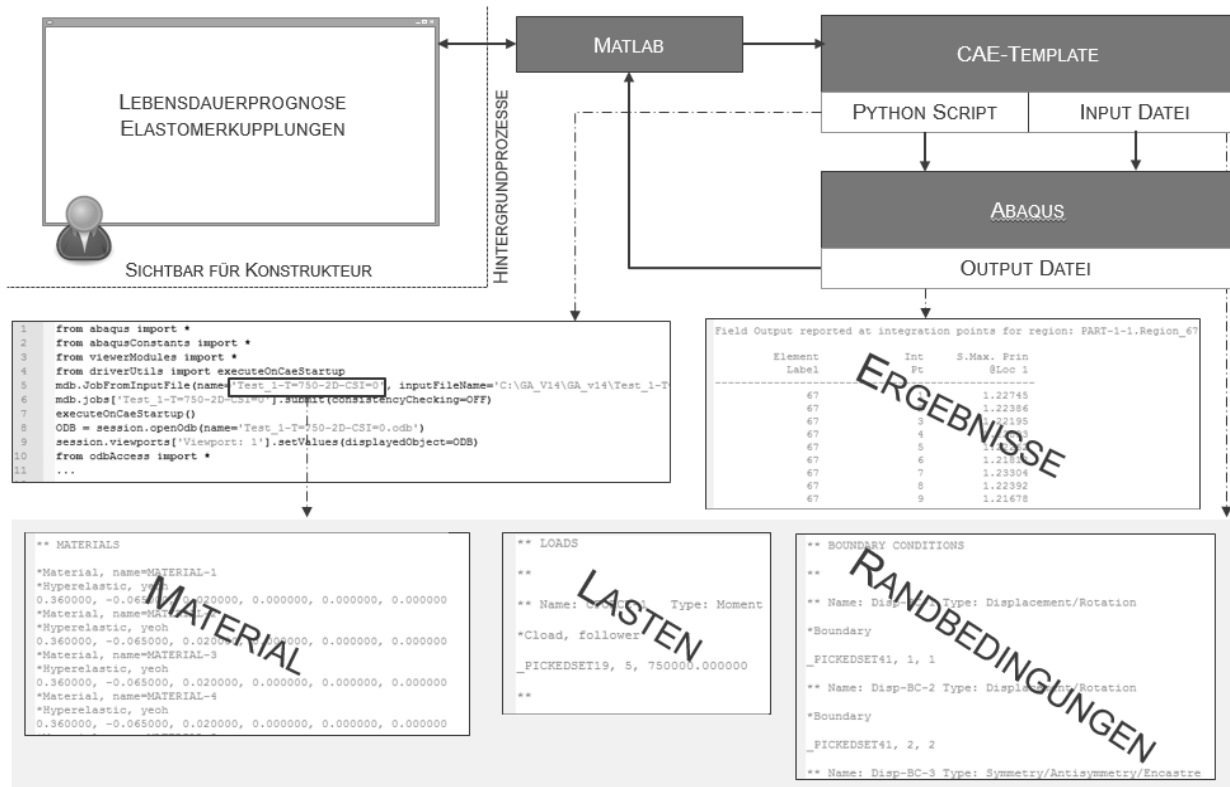


Bild 2: Datenfluss

Desweiteren wurden weitere Methoden, wie das Auslesen und die Anpassung der Yeoh-Parameter oder die Berechnung der lokalen Schädigung entwickelt, vgl. Kapitel 3.1 (Methodik). Die Methoden greifen dabei auf das Output-File zu und passen die Attribute der erstellten Klasse an, bevor diese als (neues) Input-File an Abaqus wieder übergeben werden. Ebenso greift eine Methode auf das nISAM zu.

4 Zusammenfassung

Die Lebensdauer von Bauteilen, die in funktions- und sicherheitsrelevanten Baugruppen verbaut werden, ist sowohl in der Gegenwart, als auch in der Zukunft von hoher Bedeutung zur Festlegung von Wechselintervallen und Lebensdauernachweisen. Der damit einhergehende Versuchsaufwand für produzierende Unternehmen ist sehr groß und damit zeit- und kostenintensiv. Zur Reduzierung von Versuchsaufwand und auch Verkürzung der Entwicklungszyklen von neuen Bauteilen wurde in diesem Beitrag die Methodik der Lebensdauer-simulation auf der Basis von Materialbeanspruchungsgrößen erläutert und deren programmiertechnische Lösung vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine lokale Lösung bestehend aus dem Verbund zweier Softwareschnittstellen (Abaqus/Matlab), welche durch Datenüber-gabe und –verarbeitung lokale Elementschädigungen berechnen und in Abhängigkeit dieser

Materialparameter je simulierten Lastwechsel anpasst. Auf diese Weise können kundenspezifisch Kennwertverläufe simuliert und daraus Lebensdauern für beliebige Geometrien abgeleitet werden. Voraussetzung dafür sind, im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik, wenige dynamische Bauteilprüfungen zur Kalibrierung des Material- und Schadensakkumulationsmodells.

5 Ausblick

Ein Hauptmanko des derzeitigen Standes der Implementierung sind die langen Berechnungszeiten. Eine mögliche Optimierung wäre die Integration der Berechnung der Materialparameter der einzelnen Iterationen zusammen mit der Anpassung der Input-Datei in die Abaqus-Umgebung. In der derzeitigen Implementierung wird bei jeder Iteration Abaqus neu gestartet und die Verfügbarkeit der Lizenz geprüft.

In der aktuellen Implementierung wird Abaqus zur numerischen Berechnung verwendet. Eine Übertragbarkeit auf andere Berechnungsprogramme soll überprüft werden.

Ebenso handelt es sich um eine lokale Umsetzung der Methodik. Eine webbasierte Umsetzung mittels Webservice hätte den Vorteil die langen Berechnungsprozesse auszulagern.

Die Methode selbst kann in zukünftigen Arbeiten mit dem entsprechenden Materialmodell so erweitert werden, dass der Temperatureinfluss auf die Bauteillebensdauer je Element mit abgebildet werden kann. Weiterhin ist eine Erweiterung der Methode hinsichtlich der Abbildung von Anisotropie denkbar.

Literatur

- [1] Zecha, H.: Zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens von Elastomeren bei finiten Verzerrungen: Experimente, Modellbildung und Simulationen. Dissertation, Institut für Mechanik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.
- [2] Koprowski-Theiß, N.: Kompressible, viskoelastische Werkstoffe. Experimente, Modellierung und FE-Umsetzung. Dissertation, Naturwissenschaftliche-Technische Fakultät, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2011.
- [3] Stommel, M.; Stojek, M.; Korte, W.: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [4] Spitz, M.: Modellbasierte Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomerbauteile. Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, 2012.
- [5] Wortberg, J.; Mistler, M.: Lifetime Prediction with nonlinear Damage Accumulation based on Material Stressing Part I: Introduction of a general Procedure, Kautschuk Gummi Kunststoffe, 70 (2017) 4, S.25-29

Ein Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung für die Nutzung von Potentialen additiver Fertigung in der Produktentwicklung

Felix Schumacher, Timo Richter*, Thomas Vietor*

BMW AG

Knorrstraße 147, 80788 München

Email: felix.fs.schumacher@bmw.de; Internet: <https://www.bmwgroup.com>

*Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig

Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig

Email: t.richter@tu-braunschweig.de; Internet: <https://www.tu-braunschweig.de/ik>

Inhalt: Additive Fertigungsverfahren (AM) stellen zunehmend auch eine Alternative für die Herstellung von Produkten in Serienfertigung dar. Zur Umsetzung der vielfältigen Potentiale in der Produktentwicklung mangelt es oft jedoch an notwendigem AM-Wissen für die Integration in etablierte Entwicklungsprozesse. In diesem Beitrag wird ein Rahmenwerk zur Integration von vorhandenen Ansätzen aus dem Design for Additive Manufacturing vorgeschlagen. Dafür werden technische Problemstellungen auf Potentiale für die Anwendung von AM überprüft, um darauf aufbauend Ideen für neue Produktkonzepte mithilfe eines Potentialmodells zur Bereitstellung von AM-Lösungsprinzipien generieren zu können. Abschließend wird die Lösung unter Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen konkretisiert und hinsichtlich der Erfüllung der erwarteten Potentiale bewertet.

Abstract: Additive manufacturing (AM) is becoming more and more an alternative for manufacturing products in series production. However, for accessing its potentials during the product development, often vital AM knowledge for the integration into established design processes is missing. In this contribution, a framework integrating existing approaches from Design for Additive Manufacturing is presented. Therefore, technical problems are analysed regarding potentials for using AM. Based on this, new product concepts are generated supported by a potential model providing general solution principles of AM. Finally, the solution is concretised considering manufacturing constraints and evaluated regarding the fulfilment of expected potentials.

Stichwörter: Additive Fertigung, DfAM, Konstruktionsmethoden

Keywords: Additive manufacturing, DfAM, Design Methods

1 Einleitung

Für die Einführung neuer Fertigungstechnologien ist die Bereitstellung von Wissen eine wesentliche Voraussetzung, um sowohl eine Identifizierung von Anwendungsfällen als auch die Umsetzung in technischen Systemen während der Produktentwicklung zu unterstützen. Additive Fertigung (Additive Manufacturing, AM), die zunehmend auch für die Herstellung

von Endprodukten in Frage kommt, bietet eine Vielzahl an Potentialen zur Verbesserung von Produkteigenschaften sowie zur Optimierung von Entwicklungsprozessen. Derzeit fehlt in der Produktentwicklung allerdings oftmals das erforderliche Wissen, um bewerten zu können, ob AM für bestimmte technische Problemstellungen eine erfolgsversprechende Alternative zu konventionellen Fertigungsverfahren darstellt. Folglich werden bei der Erarbeitung von technischen Lösungen etablierte Denkstrukturen nicht verlassen und die neuen verfahrensspezifischen Potentiale bleiben ungenutzt. Insbesondere in der Automobilindustrie findet häufig keine umfassende Neukonzeption von Bauteilen statt, sondern es werden Anpassungen unterschiedlicher Änderungstiefe an vorhandenen Bauteilen durchgeführt [1]. Dabei bleibt eine grundlegende Analyse von Funktions- und Wirkstrukturen von Bauteilen aus und bspw. durch AM ermöglichte Funktionserweiterungen können nicht berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund kann beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren für Endprodukte zwischen drei Umsetzungsstufen unterschieden werden, bei denen die AM-Potentiale in unterschiedlichem Maß genutzt werden (Bild 1).

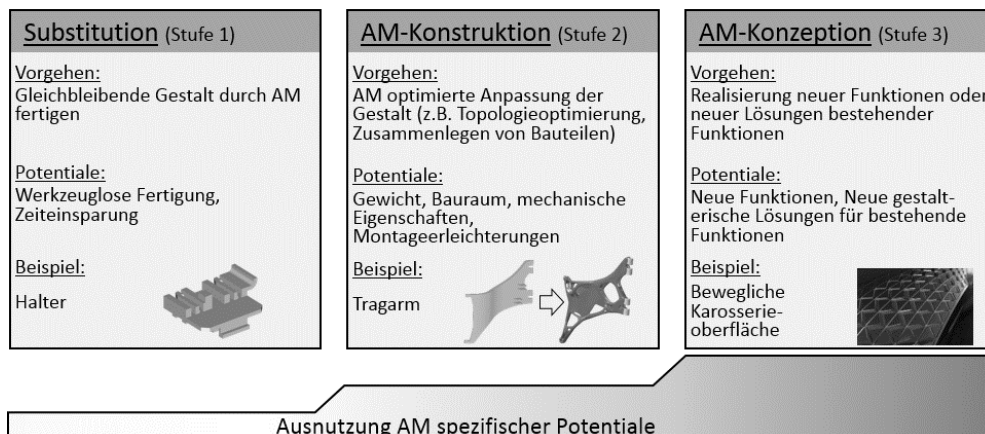


Bild 1: Umsetzungsstufen von Additive Manufacturing in der Automobilindustrie

Bei der Substitution (Stufe 1) wird die Gestalt des Bauteils nicht verändert und lediglich das bisherige Fertigungsverfahren durch AM substituiert. Dabei können bspw. Kosten- und Zeitvorteile durch die werkzeuglose Fertigung erreicht werden. Bei der AM-Konstruktion (Stufe 2) wird die Gestalt des Bauteils bspw. durch Topologieoptimierung oder die Integration von Bauteilen angepasst. Dies zielt auf eine Verbesserung der Bauteileigenschaften wie des Gewichts oder des benötigten Bauraums ab. Bei einer AM-Konzeption (Stufe 3) werden technische Lösungen grundsätzlich hinterfragt und neue Konzepte erarbeitet. Dadurch können neue Realisierungsmöglichkeiten bestehender Funktionen (bspw. integrierte Struktural-

ren) sowie neue Funktionen (bspw. durch 4D-Druck) realisiert werden. Aufgrund der Neuartigkeit und Komplexität der Lösungen ist insbesondere in Stufe 3 eine Unterstützung von Entwicklern durch die zielgerichtete Bereitstellung von AM-Wissen und Werkzeugen notwendig. Zur Erarbeitung einer zweckmäßigen Unterstützung werden in dem diesem Beitrag daher folgende Fragestellungen diskutiert:

- Wie können vorliegende (bisher konventionell gefertigte) technische Systeme sowie neue technische Entwicklungsaufgaben beschrieben werden, um die Eignung von AM als Fertigungstechnologie überprüfen zu können? (Problemformulierung)
- Wie können neue Lösungsansätze für technische Systeme in AM-Fertigung durch die Bereitstellung von Wissen generiert werden? (Ideengenerierung)
- Wie kann die fertigungs- und kostengerechte Gestaltung von technischen Systemen unterstützt werden? (Lösungskonkretisierung)

Zur Beantwortung dieser Fragen werden in Kapitel 2 bestehende Ansätze aus der Literatur zur Integration von AM-Wissen in die Produktentwicklung analysiert und Bedarfe an eine neue methodische Unterstützung formuliert. In Kapitel 3 wird darauf aufbauend ein Rahmenwerk bestehend aus drei grundlegenden Schritten für die Produktentwicklung vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Integration von AM-Wissen in die Produktentwicklung

Ziel der vorgestellten Forschungsarbeiten ist es, basierend auf bestehenden Methoden aus dem Bereich des *Design for Additive Manufacturing (DfAM)* ein Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung zu erarbeiten, um die Entwicklung von Endprodukten im Hinblick auf eine zielgerichtete Berücksichtigung AM-spezifischer Potentiale zu unterstützen. Ausgangszustände für die Integration von AM in den Entwicklungsprozess sind dabei:

- **Herausforderungen der Produktentwicklung**, für die keine technischen Lösungen vorliegen, die die Anforderungen erfüllen (z. B. Bauraumrestriktionen, hohe Lasten, komplexe Montageprozesse)
- **Technische Lösungen in konventioneller Fertigung**, für die nicht bekannt ist, ob durch AM Potentiale Verbesserungen von Eigenschaften erschlossen werden können

Ausgangslage für die Erarbeitung des Rahmenwerks bieten Beobachtungen aus der Praxis der Automobilentwicklung, die Lücken im bestehenden Stand der Wissenschaft aufzeigen. Sie gliedern sich an den im Einleitungskapitel beschriebenen Fragestellungen.

2.1 Problemformulierung

Die Problemformulierung zielt darauf ab, vorliegende Herausforderungen oder technische Lösungen bezüglich AM-Potentialen zu analysieren und geeignete Problemmodelle für die nachfolgenden Schritte zu erarbeiten. Bestehende DfAM-Methoden berücksichtigen die Problemformulierung bereits als einen notwendigen ersten Schritt bei der Entwicklung von AM-Bauteilen. Sie bedienen sich dazu verschiedener Modelle unterschiedlichen Abstraktionsgrades wie bspw. CAD-Modellen [2], Funktionsstrukturen, Anforderungslisten [3] und Wirkstruktur-Modellen bei denen ein- und ausgehende Material-, Informations- und Energieflüsse analysiert werden [4]. Diese Ansätze können Produktentwickler dabei unterstützen, spezifische AM-Potentiale zu identifizieren. Es besteht jedoch keine Unterstützung für die Identifizierung geeigneter Problemmodelle, die eine ganzheitliche Betrachtung von AM-Potentialen ermöglichen, vgl. Stufen der AM-Integration in Bild 1.

Ein weiterer Aspekt der Problemformulierung ist die Definition der Systemgrenze von betrachteten Anwendungsfällen. Bestehende Ansätze in der Literatur betrachten diesbezüglich häufig ein zu Beginn definiertes System [5]. Einige Potentiale wie bspw. Gewichts- oder Bauraumeinsparungen können dadurch erschlossen werden (Stufe 2). Um die Potentiale aus Stufe 3 erschließen zu können, ist jedoch die explizite Betrachtung der Systemgrenze notwendig. Gerade die Integration von Funktionen oder die Erschließung neuer Funktionen wird erst dadurch ermöglicht.

2.2 Ideengenerierung

Spezifisches AM-Wissen ist in der Literatur durch Merkmalsdatenbanken [6], Beispielsammlungen [7] sowie die Beschreibung konkreter Anwendungsfälle dokumentiert. Diese beinhalten bereits eine große Fülle an AM-Wissen. In Hinblick auf die weitere Nutzung des AM-Wissens zur Generierung von Lösungen werden Kreativitätstechniken [8] und weitere Werkzeuge [9] vorgeschlagen. Die Anwendung in der Praxis zeigt jedoch, dass der Zugriff auf AM-Wissen und die Übertragung auf konkrete Anwendungsfälle eine bleibende Herausforderung darstellt. Durch die geringe Erfahrung von Entwicklern mit den Potentialen von AM ist die Unterstützung bei der zweckmäßigen Verknüpfung mit Anwendungsfällen notwendig. In diesem Zuge wird zudem eine qualitative Bewertung der mit den Potentialen verbundenen Auswirkungen benötigt. Auswirkungen können Verbesserungen von Eigenschaften und Wechselwirkungen (bspw. geringeres Gewicht bei steigenden Kosten) zwischen diesen sein.

2.3 Lösungskonkretisierung

Die Lösungskonkretisierung beinhaltet sowohl die Gestaltung als auch die Bewertung der technischen Lösung. Im Hinblick auf die fertigungsgerechte Gestaltung besteht eine Vielzahl an Gestaltungsrichtlinien. Diese bieten vor allem dem mit AM vertrauten Entwickler das notwendige Wissen für die Detailkonstruktion. Bspw. stellt Kranz Gestaltungsrichtlinien für Grundformen, die in Leichtbaukonstruktionen verwendet werden, vor [10]. Adam geht einen Schritt weiter und schlägt quantitative Konstruktionsvorgaben wie bspw. maximale Spaltlängen abhängig vom gewählten additiven Fertigungsverfahren vor [11]. Ein umfassendes Gestaltungsrichtlinienwerk, das qualitative und quantitative Richtlinien für die verfügbaren additiven Fertigungsverfahren beinhaltet, besteht jedoch nicht.

Eine wichtige Aussage für die Bewertung von Bauteilen in der Praxis sind die Bauteilkosten. Die Kalkulation dieser erfordert bisher für AM-Bauteile noch einen hohen Kalkulationsaufwand, da noch nicht genug Erfahrungen bestehen und die Kosten daher für jedes Bauteil spezifisch ermittelt werden müssen. Dabei besitzt bspw. die Bauteilgeometrie (im Speziellen die Bauteilkomplexität), das AM-Verfahren und der Werkstoff einen Einfluss auf die Kosten. Ansätze zur Bewertung der Bauteilkomplexität sowie der spezifischen Verfahrens- und Werkstoffkosten sind bereits vorhanden [12]. In Zukunft ist analog zu den etablierten Fertigungsverfahren eine Bewertung mit geringerem Zeitaufwand notwendig.

3 Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung

Um die genannten Bedarfe zu adressieren, wird in diesem Abschnitt ein Rahmenwerk vorgeschlagen, das Ansätze aus der Literatur zur Berücksichtigung von Potentialen additiver Fertigung zusammenführt und eine ganzheitliche Unterstützung für die Produktentwicklung bietet. Das Rahmenwerk gliedert sich in drei grundlegende Schritte, die iterativ durchlaufen und jeweils durch spezifische Hilfsmittel unterstützt werden. Eine Übersicht über die Schritte des Rahmenwerks zeigt Bild 2.

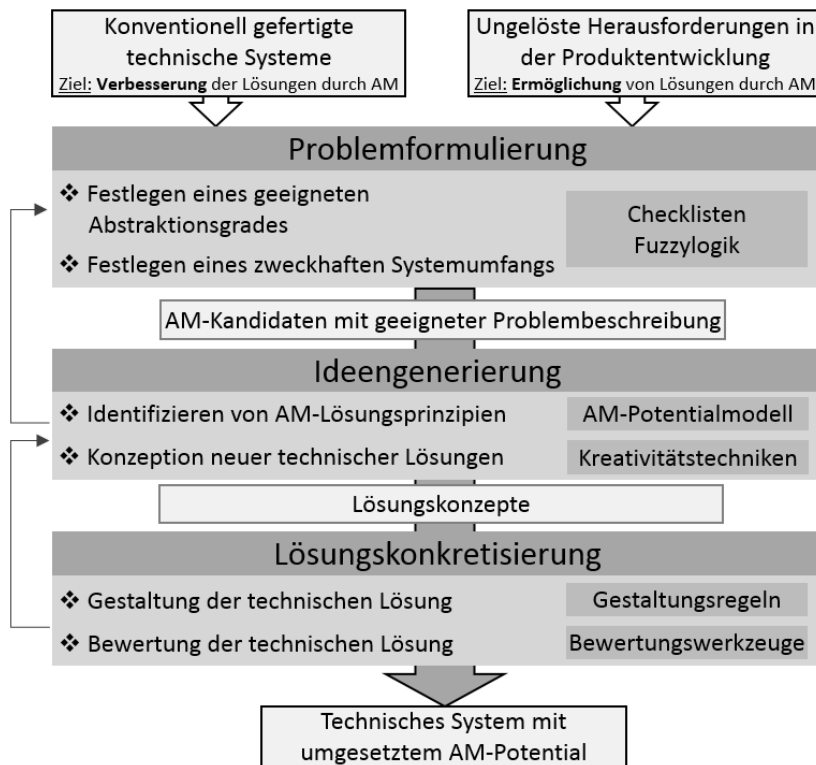


Bild 2: Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung für die Nutzung von AM-Potentialen

3.1 Vorauswahl und Problemformulierung

Ziel des ersten Schritts ist es, die vorliegenden Herausforderungen oder technischen Systeme mithilfe von Vorauswahl-Kriterien zu analysieren, um zu überprüfen, ob eine Betrachtung von AM zielführend ist, und um das Problem zweckmäßig zu formulieren. Dabei wird sowohl ein geeigneter Abstraktionsgrad als auch ein geeigneter System-Umfang durch die Festlegung der Systemgrenze definiert, worauf aufbauend im nächsten Schritt neue technische Lösungen erarbeitet werden können.

Die Grundannahme der Definition des **Abstraktionsgrads** ist es, dass in der Produktentwicklung eine Vielzahl unterschiedlicher Produktmodelle (bspw. Funktionsstrukturen, Prinzipskizzen, CAD-Modelle) verwendet werden, die die Lösung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen beschreiben. AM-Potentiale können dabei auf unterschiedlichen Ebenen zur Lösungsfindung beitragen. Im vorliegenden Beitrag werden deshalb vier Abstraktionsebenen in Anlehnung an Roth [13] vorgeschlagen, vgl. auch [14]:

- **Funktionsstruktur-Ebene:** Zu erfüllende Funktionen sowie funktionale Ein- und Ausgangsgrößen und deren Ausprägungen (Beispiel: Definierte Änderung der Bauteilgeometrie und -eigenschaften als Reaktion auf die Änderung äußerer Einflüsse)

- **Effektstruktur-Ebene:** Physikalische Effekte zur Realisierung der geforderten Funktionen (Beispiel: Steifigkeitsänderung durch auxetisches Bauteilverhalten)
- **Wirkstruktur-Ebene:** Wirkkörper und Wirkflächen der prinzipiellen Lösungen (Beispiel: Wirkflächenpaare für die Kraftübertragung zwischen Crashelementen)
- **Baustruktur-Ebene:** Zu fertigende Bauteile mit Festlegung von geometrischer Gestalt, Material, Fertigungsverfahren usw. (Beispiel: Mechanisches Deformationselement ausgelegt für unterschiedliche Crashlastfälle)

Zur Definition einer geeigneten Ebene sollen in diesem Schritt Vorauswahlkriterien in Form von Checklisten zur Verfügung gestellt werden, die basierend auf Erfahrungen (formalisiert durch *AM-Lösungsprinzipien*, siehe nächster Schritt) abgeleitet werden. Ziel ist es, dadurch effizient zu überprüfen, ob bspw. funktionale Anforderungen, Effekte, Bauteilstrukturen, Geometriemerkmale usw. im betrachteten Fall vorliegen, die Hinweise auf bestimmte AM-Potentiale und die zu betrachtende Ebene geben. Dadurch soll das Vorgehen auch AM-Novizen die Bewertung von Bauteilen ermöglichen.

Neben der Definition einer geeigneten Abstraktionsebene muss zudem entschieden werden, welcher **System-Umfang** betrachtet wird, also bspw. ob nur ein einzelnes Bauteil oder auch Nachbarbauteile einbezogen werden. Dafür kann die Systemgrenze beliebig vergrößert oder reduziert werden. Hierbei können Vorauswahlkriterien dazu dienen, erfahrungsbasiert Entscheidungen zu treffen, bspw. indem je nach Abstraktionsebene benachbarte Funktionen, Effekte, Wirkkörper/Wirkflächen oder Bauteile auf Ähnlichkeiten analysiert werden. So können bspw. Nachbarbauteile mit ähnlichen Materialeigenschaften eher integriert werden als Bauteile mit abweichenden geforderten Materialeigenschaften.

Zukünftig sollen die Checklisten durch eine Systematik ersetzt werden, die zum einen Wechselwirkungen zwischen Vorauswahlkriterien berücksichtigt und zum anderen „unscharfe“ Aussagen über die Eignung eines Potentials (bspw. wenig geeignet, unter Voraussetzungen geeignet) zulässt. Ein Beispiel für die Notwendigkeit ist die Überprüfung der Eignung von Bauteilen für eine Funktionsintegration. Diese ist von einer Vielzahl von Kriterien, die sowohl auf die Systemeigenschaften (konstruktive Umsetzbarkeit der Effektkombinationen, Verbindungstechnik etc.) als auch auf die Fertigbarkeit (geforderten Materialkombinationen, Bauteilgröße, Oberfläche etc.) eingehen, abhängig und kann ohne eine Expertenbewertung nicht abschließend bewertet werden. Eine Möglichkeit, eine „unscharfe“ Aussage über die Eignung eines Potentials unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zu treffen, bietet eine Fuzzylogik.

3.2 Ideengenerierung

Ziel des zweiten Schrittes ist es, basierend auf den im ersten Schritt erarbeiteten Problem-beschreibungsmodellen, potentialversprechende AM-Lösungsprinzipien zu identifizieren, um darauf aufbauend neue technische Lösungen erarbeiten zu können. AM-Lösungsprinzipien beschreiben dabei allgemeingültige Ansätze für Lösungen von Herausforderungen durch AM-Potentiale, bspw. Verwendung von innenliegenden Strukturen (Wabenstrukturen), Realisierung auxetischen Bauteilverhaltens usw.

Zur Identifizierung von AM-Lösungsprinzipien wird ein sog. **Potentialmodell** genutzt, dessen Struktur in Bild 3 exemplarisch gezeigt ist. Damit kann der Zugriff auf ein Lösungsprinzip zum einen über damit verknüpfte *Lösungselemente* einer bestimmten Abstraktionsebene des vorliegenden Problemmodells erfolgen (bspw. der Effektstruktur, siehe Reiter in Bild 3). Zum anderen kann der Zugriff über beeinflussbare *Eigenschaften* erfolgen, bspw. über *Gewicht*, wenn durch das Prinzip eine Gewichtsreduktion erzielt werden kann (rechts im Bild). Die Beschreibung von Lösungsprinzipien enthält zudem Hinweise zu deren Umsetzung sowie Restriktionen der Realisierbarkeit (Baugrößen, Materialeigenschaften usw.) und Beispiele aus bereits erfolgten Anwendungen.

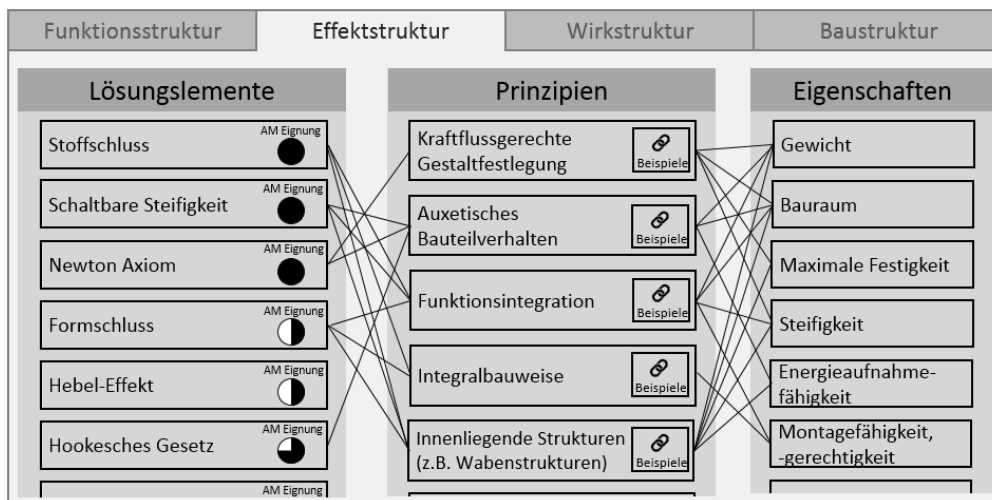


Bild 3: Exemplarische Beschreibung der Struktur des Potentialmodells für AM-Lösungsprinzipien

Für die **Konzeption neuer technischer Lösungen** können je nach Anwendungsfall unterschiedliche Methoden und Hilfsmittel genutzt werden, um die Synthese auf vorliegende Problemstellungen zu unterstützen. Für jedes AM-Lösungsprinzip gehen dabei Vorschläge für Methoden und Hilfsmittel aus deren Beschreibung hervor. Bspw. können für die Übertragung des Prinzips „innenliegende Strukturen“ sog. Toolboxes angewendet werden. Dabei

handelt es sich um additiv gefertigte Würfel, die konstruktive Freiheiten von AM in Form verschiedener Konstruktionsfeatures visualisieren [15]. Die Anwendung dieser bietet sich in Verbindung mit Kreativitätstechniken wie bspw. der Disney-Methode an.

3.3 Bauteilgestaltung und -bewertung

Ziel des dritten Schritts ist es, die in Schritt zwei erarbeiteten Konzepte zu konkretisieren, um die finale Bewertung der Bauteileigenschaften (insbesondere Kosten und Durchlaufzeiten) durchführen zu können. Dazu werden zum einen Hilfsmittel zur Gestaltung vorgeschlagen, die bspw. Regeln für die fertigungsgerechte Gestaltung zur Verfügung stellen. Insbesondere können dabei auch Simulationshilfsmittel bspw. zur Topologieoptimierung eingesetzt werden, die eine kraftflussgerechte Gestaltung bei geringem Materialeinsatz ermöglichen. Diese kommen in der Praxis schon länger zum Einsatz und gehören somit zum Stand der Technik. Zum anderen werden Bewertungshilfsmittel eingesetzt, die bspw. Kosten, Toleranzen, Montagegerechtigkeit oder Life-Cycle-Betrachtungen berücksichtigen. Da der Fokus im vorliegenden Artikel auf den ersten beiden Schritten liegt, werden diese Bewertungshilfsmittel hier nicht tiefer betrachtet.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurden zunächst drei Umsetzungsstufen von AM in der Automobilindustrie erläutert. Vor diesem Hintergrund sowie Erfahrungen aus der Praxis wurden drei Forschungsfragen definiert, anhand derer sich das im Folgenden vorgestellte Rahmenwerk orientiert. Im Rahmen der drei Schritte des Rahmenwerks wurde im Besonderen auf Abstraktionsebenen während der Problemformulierung sowie auf ein Potentialmodell, welches für die Lösungsfindung benötigt wird, eingegangen.

In den nächsten Schritten soll das vorgestellte Rahmenwerk in der Praxis für verschiedene Anwendungsfälle angewandt werden. Des Weiteren ist der vorgestellte Stand des Rahmenwerks nicht als abgeschlossen zu verstehen und sollte daher laufend erweitert werden. Dabei sind hinsichtlich der Problembeschreibung weitere Erfahrungen über die für den jeweiligen Anwendungsfall optimale Problembeschreibungsebene notwendig, die dann in einer Fuzzylogik formalisiert werden können. Hinsichtlich der Ideenfindung wurde das Potentialmodell vorgestellt, das kontinuierlich durch neue Prinzipien erweitert wird, die in die Zugriffslogik eingegliedert werden. Im Weiteren sollten die darin enthaltenen AM-Prinzipien durch Beispiele und konkrete Anwendungsempfehlungen aus der Praxis erweitert werden. Im

Rahmen des letzten Schritts der Bauteilgestaltung und -bewertung wurde auf die in der Literatur vorhandenen Werkzeuge verwiesen. Für die Anwendung in der Praxis sollten diese durch ein Werkzeug zur aufwandsminimalen Kostenschätzung erweitert werden.

Literatur

- [1] Albers, A.; Bursac, N.; Wintergeist, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus seiner entwicklungsmethodischen Perspektive. In: SSP, 1-10, 2015
- [2] Yang, S.; Tang, Y.; Zhao, Y. F.: Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80 (1), 327–342, 2015
- [3] Kumke, M.; Watschke, H.; Vietor, T.: A new methodological framework for design for additive manufacturing. In: Virtual Phys. Prototyp. 11(1), 3–19, 2016
- [4] Lindemann, C.; Koch, R.: Cost Efficient Design and Planning for Additive Manufacturing Technologies. In: Solid Freeform Fabrication Symposium, 2016
- [5] Schmelzle, J., et al.: (Re)Designing for Part Consolidation: Understanding the Challenges of Metal Additive Manufacturing. In: Journal of Mechanical Design 137(11), 2015
- [6] Bin Maidin, S.; Campbell, I.; Pei, E.: Development of a design feature database to support design for additive manufacturing. In: Assembly Automation 32, Nr. 3, S. 235–244, 2012
- [7] 3D Systems Corporation: SLS Design Guide – Applications and Technologies of Selective Laser Sintering, 2016
- [8] Kumke, M.; et al.: Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials. In: International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2017
- [9] Boyard, N.; et al.: A design methodology for parts using additive manufacturing. In: P.J. Bártolo et al., eds. High Value Manufacturing. Boca-Raton, FL: CRC Press, 399–404, 2013
- [10] Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C.: Methodik für die fertigungsgerechte Konstruktion von laseradditiv gefertigten bionischen Leichtbaustrukturen aus TiAl6V4. In: RapidTech, Erfurt, 2014
- [11] Adam, G. A.O.; Zimmer, D.: Design for additive manufacturing – element transitions and aggregated structures. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 7 (1), 20–28, 2014
- [12] Conner, B. P., et al.: Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. In: Additive Manufacturing, 1–4, 64–76, 2014
- [13] Roth, K.: Design catalogues and their usage. In: A. Chakrabarti, ed. Engineering design synthesis: understanding, approaches and tools. London: Springer, 121–129, 2002
- [14] Richter, T.; Watschke, H.; Inkermann, D.; Vietor, T.: Produktarchitekturgestaltung unter Berücksichtigung additiver Fertigungsverfahren. In: Entwerfen Entwickeln Erleben 2016, 2016.
- [15] Watschke, Hagen; Kumke, Martin; Vietor, Thomas: Design for Additive Manufacturing – Praxisnahe Hilfsmittel und Nutzung konstruktiver Freiheiten. In: 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2016

Sicherheitsgerichtete Produktentwicklung im Sonderfahrzeugbau

Dr. Tobias Bläßing

Abteilungsleiter Fahrzeugverifikation

Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH

Henschelplatz 1, 34127 Kassel

E-Mail: tobias.blaessing@rheinmetall.de; Internet: <https://www.rheinmetall.com>

Inhalt: Innerhalb der zivilen Produktentwicklung werden seit Jahren Normen und Richtlinien für neue Produkte angewandt und umgesetzt.

Die Forderungen des Marktes und damit letztlich der Kunden ist die Entwicklung eines sicheren Produkts. Viele der heutzutage auf den Markt gebrachten Produkte sind aus dem elektrischen, elektronischen oder elektronisch-programmierbaren Bereich. Von diesen Produkten geht in der Regel die größte Unsicherheit aus, wenngleich jedes System in sich eine generelle Gefahr birgt.

Aus diesen Gründen sollte schon zum Beginn einer neuen Produktentwicklung an mögliche Risiken und Gefahren, welche von dem Produkt ausgehen können, gedacht werden. Zudem besteht eine Forderung der fortlaufenden und dokumentierten Betrachtung von Risiken und deren Ausschluss / Verminderung über den gesamten Entwicklungsverlauf.

Bis vor wenigen Jahren war die Anwendung dieser Normen im militärischen Sonderfahrzeugbau ein Nebenbestandteil der Entwicklung. Durch die Abänderung der Gesetzeslage durch den Bund (BMVG) vom 22.03.2004 wurden die Vorschriften und Normen zur Risikobetrachtung auch in die Entwicklung geschützter Sonderkraftfahrzeuge fest eingeführt und rückten damit sukzessive in den Vordergrund.

So finden Normen beispielweise Berücksichtigung bei der Entwicklung von Sicherheitseinrichtungen und technischen Zusatzfunktionen unserer Fahrzeuge. Die Kombination von Altsystemen mit neuen Anteilen und Funktionen und deren Passung mit den neuen Richtlinien stellen eine weitere neue Herausforderung dar.

Abstract: Standards and guidelines for new products have been applied and implemented in the civil product development for a long time.

The demand of the market and the customer is the development of a safe product. Every system has a general risk, although the electrical, electronic or electronically programmable devices have the highest risk.

For these reasons, the potential risks and dangers that may arise from the product should be considered at the beginning of a new product development. In addition, there is a requirement for an ongoing and documented assessment of risks and their exclusion / reduction over the entire development process.

Up to a few years ago, the application of these standards in military special-purpose vehicles was just a small part of many in development. As a result of the amendments made by the federal government (BMVG)

on March 22, 2004, the regulations and standards for risk assessment were also firmly introduced into the development of protected special-purpose vehicles and thus gradually became the focus of attention.

For example, standards are taken into account in the development of safety devices. The combination of legacy systems with new shares and functions and their fit with the new guidelines represent another new challenge.

Stichwörter: *Sicherheitsgerichtete Produktentwicklung, FMEA, Nachweisführung, Simulation/Berechnung, militärischer Sonderfahrzeugbau, Risikobetrachtung, Rheinmetall*

Keywords: *Safety-oriented product development, FMEA, verification, simulation, special military vehicle construction, risk assessment, Rheinmetall*

1 Einführung

Für zivile Produktentwicklungen gelten seit Jahren Normen und Richtlinien, um die Produktsicherheit der hergestellten Waren zu gewährleisten. Hierzu gehören beispielsweise die EU-Richtlinien im Rahmen der CE-Kennzeichnung (Communauté européenne) oder die Normen zum Nachweisen der Funktionalen Sicherheit.

Die Gesetzgebung, die Märkte und letztlich der Kunde fordern die Entwicklung sicherer Produkte. Dieser Trend findet in den letzten Jahren immer mehr Einzug in den Bereich des Sondermaschinenbaus. Die Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH gehört zum Bereich der militärischen Sonderfahrzeuge und stellt sich den Herausforderungen von optimaler Funktionalität und bei gleichzeitig höchster Produktsicherheit. Diese teilweise auch konfliktbehafteten Anforderungen bearbeitet innerhalb der RMMV die Abteilung Fahrzeugverifikation. Sie begleitet das Produkt von der ersten Idee über die Entwicklung und Erprobung bis hin zur Kundenübergabe und deren anschließender Nutzung.

1.1 Rheinmetall Group – Mobilität und Sicherheit unter einem Dach

Die börsennotierte Rheinmetall AG mit Sitz in Düsseldorf ist ein international tätiger Technologiekonzern für Sicherheit und Mobilität. Urbanisierung, demografischer Wandel, Migrationsströme, Globalisierung und Klimawandel wie auch die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Konflikten und militärischen Auseinandersetzungen lassen das Streben nach Sicherheit und Mobilität stetig wachsen.

Das operative Geschäft des Rheinmetall-Konzerns verteilt sich auf sechs Divisionen, die den beiden Unternehmensbereichen Automotive und Defence zugeordnet sind. Zum Automotive Bereich gehören z. B. die Premiummarken Kolbenschmidt Pierburg und Motorservice.

Rheinmetall Defence ist als führendes europäisches Systemhaus für Heerestechnik ein zuverlässiger Partner der Streitkräfte Deutschlands, der Nato und befreundeter Nationen. Die Innovationskraft von Rheinmetall Defence fokussiert sich auf drei spezialisierte Divisionen: Weapon and Ammunition, Electronic Solutions und Vehicle Systems.

Die Division Vehicle Systems umfasst die Firmen Rheinmetall Landsysteme GmbH (kurz: RLS) und Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH (kurz: RMMV). Deren Leistungsspektren umfassen logistische und taktische Radfahrzeuge, gepanzerte Kettenfahrzeuge, ABC-Schutzsysteme, Turmsysteme und Customer Service.

Alle Entwicklungs-, Fertigungs- und Serviceaktivitäten sind darauf ausgerichtet, bestmöglichen Schutz für die Soldatinnen und Soldaten im Einsatz zu gewährleisten.

Die RMMV entstand 2010 aus einem Joint Venture der Rheinmetall AG und der MAN Nutzfahrzeuge AG. Das Produktportfolio umfasst die Entwicklung logistisch und taktisch genutzter Radfahrzeuge. Hierzu zählen beispielsweise geschützte und ungeschützte Transport-, Führungs- und Funktionsfahrzeuge für die internationalen Streitkräfte. Gegenwärtig beschäftigt RMMV rund 1.800 Mitarbeiter.

1.2 Produktbeispiele der RMMV

Zu den bekanntesten Fahrzeugprodukten der RMMV zählen der FUCHS, der BOXER und der SURVIVOR R. Nachfolgend werden ein paar Informationen zu den Fahrzeugen dargestellt.

Der FUCHS ist eine konsequent auf das moderne, militärische Einsatzspektrum der internationalen Streitkräfte ausgerichtete Entwicklung, die mit ihrem überzeugenden Schutzkonzept und den ausgezeichneten Fahreigenschaften bereits weltweit Maßstäbe hinsichtlich Mobilität und Sicherheit setzen konnte. Zu den aktuell eingeführten Varianten zählen das Führungsfahrzeug, der Mannschaftstransporter, das Ambulanz-Fahrzeug, der ABC-Spüfuchs und der Bio-Spüfuchs.

Der Boxer ist ein hochmobiles Radfahrzeug, dessen modularer Aufbau eine Vielzahl missionsspezifischer Varianten ermöglicht. Die Fahrzeugfamilie besteht aus einem einheitlichen Fahrmodul sowie austauschbaren, nutzerspezifischen Missionsmodulen. Zu den bereits entwickelten Varianten gehören der Gruppentransporter, das Sanitätsfahrzeug, Pioniergruppenfahrzeug, Führungsfahrzeug C4I, Führungsfahrzeug C2, Versorgungsfahrzeug sowie das Gefechtsschaden-Instandsetzungsfahrzeug.

Der SURVIVOR R verfügt über eine ideale Kombination aus Mobilität und Schutz und bietet modernen Einsatzkräften eine optimale Unterstützung in allen relevanten Einsatzgebiete-

ten. Basierend auf einem 330PS (242kW) starken 4 x 4 Lkw Fahrgestell von MAN und einem gepanzerten Aufbau von Rheinmetall Defence verbindet der SURVIVOR R automotiv Großserientechnik mit modernster Schutztechnologie des führenden militärischen Systemanbieters aus Deutschland. Der Innenraum bietet Platz für bis zu 10 Personen mit persönlicher Ausrüstung, sowie umfangreicher Funk- und Führungsausrüstung. Der SURVIVOR R wird kundenindividuell auch mit umfangreicher Sonderausstattung für den Polizeibedarf ausgestattet (Bild1).



Bild 1: Beispiel SURVIVOR R in Polizeiausführung

2 Sicherheitsgerichtete Produktentwicklung

2.1 Produktentwicklung bei RMMV

Im Bild 2 ist der Produktentstehungsprozess (PEP) der RMMV schematisch dargestellt. Die Produktentwicklung beginnt in der Regel als Idee und Kundenwunsch in der Definitionsphase. Hier werden die Kundenwünsche aufgenommen und in ein Lastenheft und Pflichtenheft Teil I (- Spezifikation der Anforderungen) überführt. In der anschließenden Phase werden konkrete Konzepte (hier Grobkonzept) erstellt und das Lastenheft Teil II in das Pflichtenheft Teil II überführt. In diese Phase fällt auch die erste Risikobetrachtung. Diese Phase schließt mit der Vertragsunterzeichnung durch den Kunden ab. Danach werden Spezifikationen weiter ausgearbeitet und das Feinkonzept erstellt. Hier liegt der Hauptteil der Risikobetrachtung, wenngleich eine begleitende Betrachtung in allen Phasen vorkommt.

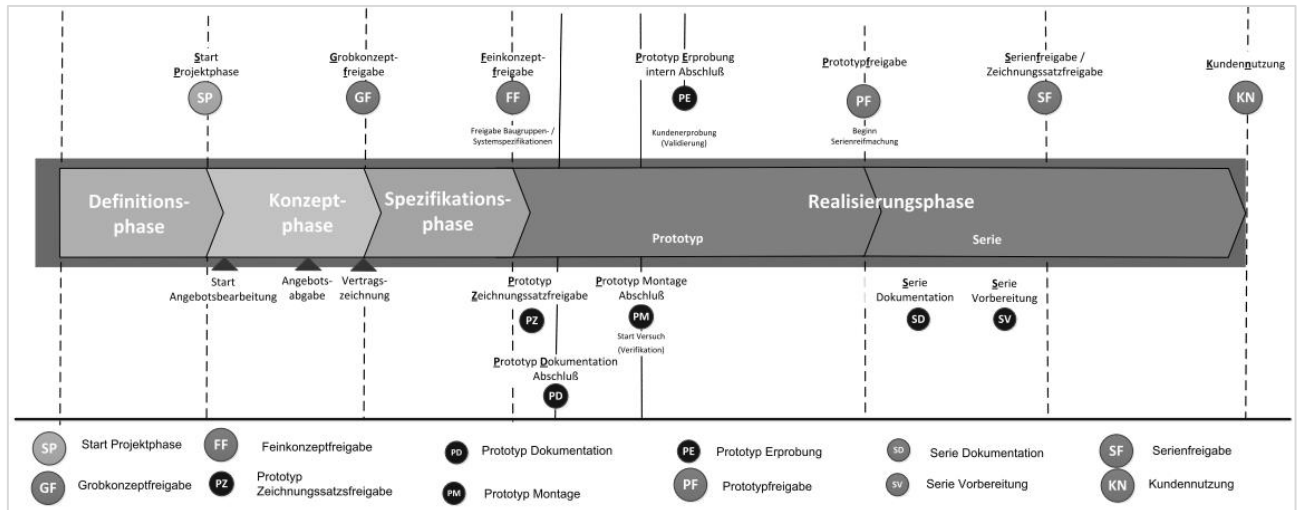


Bild 2: Produktentstehungsprozess RMMV

2.2 Risikobetrachtung

Zu jedem neu entwickelten Produkt wird mit Kundenübergabe eine Produktsicherheitserklärung erstellt, durch die technisch Verantwortlichen signiert und dem Kunden ausgehändigt. Diese beinhaltet die Zusicherung, dass das Produkt bei sach- und zweckgemäßem Gebrauch ohne Gefährdung uneingeschränkt verwendet werden kann. Um dies zu zusichern, ist eine ausführliche Risikobetrachtung im Vorfeld notwendig.

Bereits bei der Konzeptidee wird eine erste Risikoabschätzung vorgenommen, die die ersten Risiken für Leib und Leben aufzeigt. Darauf folgt eine Risikobewertung, die sich vom Gesamtsystem bis zur Einzelbaugruppe / Einzelbauteil aufgliedert, um sicherzustellen, dass alle Eventualitäten beachtet werden. Anschließend wird entschieden, ob und welche Form und Umfang die Risikobetrachtung zu erfolgen hat. Innerhalb der Entwicklung werden zwei gängige Methoden zur Nachweisführung der Risikobetrachtung herangezogen. Die FMEA (**F**ehler**m**öglichkeiten- und **E**influss**a**nalyse) wird für rein mechanische Komponenten und Baugruppen verwendet. Für elektrische, elektronische und elektrisch programmierbare Komponenten wird die FMEDA (**F**ehler**m**öglichkeiten-, **E**influss- und **D**iagnostische **A**nalyse) herangezogen. Mit diesen Methoden werden Fehlerarten identifiziert und deren Fehlerfolgen und -ursachen analysiert und durch mögliche Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen minimiert. Durch die Bewertungsfaktoren Bedeutung (B), Auftreten (A) und Entdeckung (E) erfolgt die Risikobewertung durch Ermittlung der **R**isikop**r**ioritäts**z**ahl (RPZ), welche dann durch eine firmeninterne Bewertungsskala zur Beurteilung des Restrisikos dient. Nach Größe der RPZ werden dann notwendige weitere Entwicklungs- und Nachweisprozesse festgelegt. Fehler unterhalb einer definierten RPZ (akzep-

tables Restrisiko oder Grenzrisiko genannt) werden nicht weiter betrachtet. Ziel ist in erster Linie, entdeckte Risiken durch technische Maßnahmen zu eliminieren oder mindestens zu reduzieren. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass technische vor organisatorische Maßnahmen zur ergreifen sind. Zur Realisierung können beispielsweise FEM-Berechnungen oder Simulationen (Mehrkörpersimulation, Strömungssimulationen oder kurzzeitdynamische Simulationen) herangezogen werden. Entsprechend den Ergebnissen werden dann das Auftreten (A) und Entdeckbarkeit (E) neu bewertet und die RPZ ändert sich. Am Ende dieser Schritte kann zum Beispiel eine konstruktive oder technische Veränderung stehen, eine akzeptable RPZ oder weitere Maßnahmen im Sinne praktischer Nachweiserprobungen. Dies sind in der Regel praktische Versuche, in denen diese Risiken in Realversuchen getestet werden (z.B. Crashtests). Steht auch hier am Ende keine akzeptable RPZ sind das Verwerfen der Ideen oder des Konzeptes denkbar oder auch – in letzter Instanz – organisatorische Maßnahmen, wie z.B. Beschilderungen sowie Schulungen zu Verhaltensregeln und Bedienerhinweise.

3 Praktische Anwendungen

3.1 Gasregulierung

Für eine missionsspezifische Funktion ist es erforderlich, dass das Triebwerk eines Fahrzeuges mit einer erhöhten Leerlaufdrehzahl (Arbeitsdrehzahl) betrieben wird. Hierzu wird eine Adapterbox (Stellgerät) an das Fahrpedal (umgangssprachlich: Gaspedal) angeschlossen. Das Triebwerk besitzt keine elektronische Regelung, daher ist es notwendig, einen Umweg über eine Adapterbox zu gehen. Diese Adapterbox besteht aus zwei Hauptbaugruppen – eine mechanische und eine elektronische. Die folgende Betrachtung bezieht sich auf ein exemplarisches Beispiel des mechanischen Anteils. Das Risiko besteht hier im Versagen der Anbindung der Adapterbox an die Anbindungsstrebe (siehe Bild 3). Sollte dies der Fall sein, verklemmt sich das Gestänge des Fahrpedals und es kommt zu einer unkontrollierten Beschleunigung des Fahrzeuges. Dadurch kann es zu einem Verkehrsunfall mit mindestens einem Toten und mehreren Verletzten kommen – definiert als Gefahr für Leib und Leben. In der sich anschließenden FMEA ergab sich eine hohe RPZ ohne Berücksichtigung von Maßnahmen.

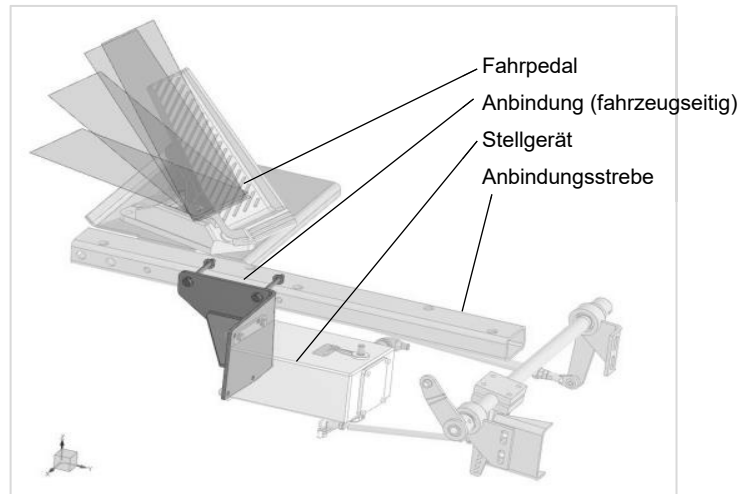


Bild 3: Darstellung Gasregulierung

Mit den Lastvorgaben und dem Einsatzszenario für den Betrieb des Fahrpedals und der Adapterbox konnte eine FEM Berechnung durchgeführt werden. Es konnte der rechnerische Nachweis erbracht werden, dass die Konstruktion richtig ausgelegt wurde und keine Gefahr für ein Versagen der Anbindung zu erwarten ist (siehe Bild 4). Die RPZ reduzierte sich unter Berücksichtigung der durchgeführten Maßnahmen auf ein akzeptables Maß (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Gasregulierung Auszug aus FMEA (nur schwarz / weiß)

Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
Systemelement: Halter, Einbau								
Funktion: Halterung/in Position halten des „Stellgeräts mit Getriebe“ gemäß Anforderung								
Unkontrolliertes Beschleunigen		Bruch des Halters, Blockieren des Fahrpedalgestänges (Fahrzeug im Fahrbetrieb)	Unterdimensionierung des Halters (fahr-dynamische Belastung)	Berechnung: Statischer Festigkeitsnachweis BER4100106-960055.000.0		Bediener würde einen Defekt am Halter feststellen, durch: - eine Drehzahländerung außerhalb des definierten Drehzahlbereichs für die unterschiedlichen Betriebsmodi, - Schwergängigkeit / Blockade des Fahrpedals		
Unkontrolliertes Verzögern				Berechnung: Ermüdungsfestigkeitsnachweis BER4100106-960055.000.0				
						Fristenarbeiten: einmal pro Jahr, Sichtkontrolle (F3)		

Fazit

Der statische Festigkeitsnachweis sowie der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM /1/ ist für die untersuchten Strukturen außerhalb der Singularitäten erfüllt.

Die aufgebrachten Lasten können, unter Berücksichtigung der beschriebenen Annahmen und Randbedingungen, mit ausreichenden Sicherheiten von den Strukturen ertragen werden.

Festigkeitsnachweis gem. FKM-Richtlinie /1/	erfüllt	nicht erfüllt	Bemerkungen
Statischer Festigkeitsnachweis	X		
Ermüdungsfestigkeitsnachweis Grundwerkstoff	X		
Ermüdungsfestigkeitsnachweis Schweißnahtwerkstoff	X		

Bild 4: Ergebnis FEM Betrachtung „Anbindung Gasregulierung“

3.2 Räumen von Hindernissen (Räumschild)

Für die Hindernisbeseitigung kann ein Fahrzeug mit einem Räumschild ausgestattet werden. Dieses wird über Halterungen an die Fahrzeugwanne angebunden und an die Hydraulikanlage des Fahrzeuges angeschlossen. Kommt es im Betrieb zum Ausfall des Räumschildes kann dies irreversible Schäden am Menschen zur Folge haben – es besteht Gefahr für Leib und Leben. Daher stellt hier das FMEA-Team Betrachtungen bezüglich des Risikos an. Es werden die Struktur des Systems und dessen Funktionen erfasst, mögliche Fehlerarten identifiziert, Ursachen analysiert, Maßnahmen formuliert und bewertet, sowie die Risikoprioritätszahl bestimmt. Die RPZ wird errechnet durch Multiplikation der Bewertungsfaktoren.

Diese Bewertung erfolgte im FMEA-Team im Rahmen einer Besprechung mit dem technisch verantwortlichen Projektleiter, dem System-Ingenieur, dem Baugruppenverantwortlichen, dem Versuchsingenieur und dem Berechnungsingenieur. Sämtliche Analysen wurden mittels spezieller Software strukturiert durchgeführt und dokumentiert (siehe Tabelle 2). Die Fehleranalyse unterscheidet Fehlerursachen, Fehlerarten und Fehlerfolgen. Bezüglich der Funktion „Räumen von Hindernissen“ sind zahlreiche Fehlerarten möglich. Hier soll nun exemplarisch die Fehlerart „Plastische Verformung des Räumschildes“ mit den zugehörigen Fehlerfolgen und -ursachen betrachtet werden.

Tabelle 2: Räumschild Auszug aus FMEA

Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
Systemelement: Räumschild								
Funktion: Räumen von Hindernissen								
Ausfall des Räumschildes		Plastische Verformung des Räumschildes	Rammstoß durch Räumen verankerter Hindernisse	SPC4100805-000000.020.0 Pkt. 2.6 / 2.7 Das Räumen von verankerten Hindernissen wird in der Dokumentation untersagt.		VP CKV 2 -001-04; Pkt. 5.3 Räumen von nicht verankerten Hindernissen (15kN mittig angreifende Räumkraft) Bericht Nr. 854 - 14		
			Überschreitung der zulässigen Räumkraft (1,5t)	Hinweis in der Dokumentation: Wird die zulässige Räumkraft überschritten, kann es zu plastischen Verformungen am Räumschild kommen.		Berechnung Räumschild BER 10012416		
			Außermittige Räumung von Hindernissen	SPC4100805-000000.020.0 Pkt. 2.6 Räumen		Berechnung Räumschildanbindung BER 10012417		

Kommt es im Betrieb durch das Räumen verankerter Hindernisse zu einem Rammstoß (Fehlerursache) kann dies eine plastische Verformung des Räumschildes (Fehlerart) verursachen, die wiederum einen Ausfall des Räumschildes (Fehlerfolge) zur Folge haben. Weitere Ursachen für eine plastische Verformung des Räumschildes sind einerseits die Überschreitung der zulässigen Räumkraft und andererseits die außermittige Räumung von Hindernissen. Zur Vermeidung von Schäden durch einen Rammstoßes wird das Räumen von verankerten Hindernissen in der Spezifikation untersagt (Vermeidungsmaßnahme). Ebenso wird das Überschreiten der mittig angreifenden Räumkraft beim Räumen von nicht verankerten Hindernissen untersagt. Auch wird auf eine mögliche plastische Verformung des Räumschildes bei Überschreiten dieser max. zulässigen Räumkraft in der Dokumentation hingewiesen (Vermeidungsmaßnahme). Den Nachweis für ein mögliches mittiges Räumen bis zu diesem Grenzwert lieferten Berechnungen für das Räumschild und dessen zugehörige Anbindung (Entdeckungsmaßnahme). Weiter wurde auch in Versuchen die max. Räumkraft nachgewiesen. Durch diese Maßnahmen wurde die RPZ gesenkt. Sie liegt nun im gelben Bereich und muss vom technisch verantwortlichen Projektleiter und BGV beurteilt werden. Für die getroffenen Maßnahmen wurde das Restrisiko als akzeptabel beurteilt und somit waren keine weiteren Optimierungsmaßnahmen erforderlich.

4 Fazit

Die hier dargestellten Fälle geben einen kurzen Einblick in die Anwendungsbereich und die Komplexität der Thematik „Sicherheitsgerichtete Produktentwicklung“. Um die Gefahr für Leib und Leben abzuwenden oder zu minimieren werden als zentrale Elemente die Einstufungen von Risiken und die sich anschließenden Dialoge und Maßnahmen (FMEA / FMEDA) genutzt. Es ist abzusehen, dass dieses Thema in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird – auch im Sondermaschinenbau.

Literaturverzeichnis

- [1] RMMV Managementsystem 2017, Gate2Defence (Intranet)
- [2] VDA-Band 4, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie; Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft – Allgemeines, Risikoanalysen, Methoden, Vorgehensmodelle -, 2. überarbeitetes und erweitertes Ringbuch – Auflage 2009
- [3] DIN EN 61508-2 (VDE 0803-2):2011-02, Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 2: Anforderungen an sicherheitsbezogene elektrische/elektronische/programmierbare elektronische Systeme (IEC 61508-2:2010)

Der Einsatz von Druckentlastung im Explosionsschutz – eine innovative Basis für den Leichtbau

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://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: *Durch eine Explosion steigen Temperatur und Druck schlagartig an. Die Auswirkungen solch einer chemischen Reaktion gefährden Mensch und Umwelt. Infolgedessen haben sich unterschiedliche Schutzkonzepte zur Minimierung des Risikos etabliert. Eine Variante stellt dabei die Einhausung der potentiellen Zündquelle dar. Diese als druckfeste Kapselung bezeichneten Gehäuse charakterisieren sich durch Konstruktionen mit hohem Materialeinsatz, um die durch die Explosion entstehenden Kräfte aufnehmen zu können. Die Integration einer Funktion zur Druckentlastung kann die auftretenden Kräfte reduzieren. Somit ist eine Auslegung auf Basis des Leichtbaues möglich, jedoch muss ein geeignetes Wirkprinzip zur Gestaltung der Druckentlastungsfunktion generiert werden.*

Abstract: *An explosion causes an abruptly increase in temperature and pressure. The effects of such chemical reaction endanger humans and environment. As a result, protection concepts have established to minimize the risk. A version is the enclosure of the potential ignition source. This solution is known as flameproof enclosure. This enclosure is characterized by constructions with high use of material, to absorb the forces caused by the explosion. The integration of a function to release pressure can reduce these resulting forces. Thus the dimensioning on the basis of lightweight design is possible, but it must generate a suitable operating principle for the design of the pressure relief function.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, Explosionsschutz, Konstruktionsmethodik, Druckfeste Kapselung*

Keywords: *product development, explosion protection, design methodology, flameproof enclosures*

1 Einleitung

Eine bedeutende Herausforderung, welche die Produktion in der Zukunft beeinflussen wird, ist die Ressourcenverknappung [1]. Dieser Einfluss fordert einen schonenden Umgang mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen und bedingt demzufolge eine ganzheitliche Optimierung der Wertschöpfungskette eines Produktes unter diesem Aspekt. [2]. Im Explosionsschutz ist ein Zündschutzart mit sehr hohem Materialeinsatz die druckfeste

Kapselung. Die druckfeste Kapselung umschließt ein nicht explosionsgeschütztes Gerät, welches eine potentielle Zündquelle darstellt. Unter der Zuhilfenahme dieses Gehäuses wird das Übergreifen einer durch die potentielle Zündquelle ausgelösten Explosion auf die Umwelt verhindert. Mit der Explosion steigen der Druck und die Temperatur in der druckfesten Kapselung sehr stark innerhalb weniger Millisekunden an. Die dabei auftretenden Kräfte bedingen eine materialintensive Auslegung des Gehäuses. Durch die spezifischen Anforderungen des Explosionsschutzes ist die Integration der etablierten Methoden zum Leichtbau nur durch erhöhten Aufwand realisierbar. Daher könnte durch die Einbindung einer Druckentlastungsfunktion in das Gehäuse die Reduzierung der auftretenden Kräfte erfolgen und somit eine innovative Basis für die Anwendung des Leichtbaues geschaffen werden.

2 Explosionsschutz

2.1 Definition

Eine Explosion wird in der Norm ISO 8421-1 als eine „plötzliche Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beider gleichzeitig“ [3] definiert. Der Ablauf dieser Reaktion ist jedoch nur unter der Voraussetzung von drei Faktoren möglich. Ein brennbarer Stoff bildet in einem definierten Konzentrationsbereich mit dem Sauerstoff aus der Luft eine explosionsfähige Atmosphäre. Durch das Auftreten einer Zündquelle mit ausreichender Energiemenge ist die Entstehung des schlagartigen Verbrennungsvorgangs, die Explosion, möglich. Bild 1 stellt diesen Zusammenhang schematisch dar.

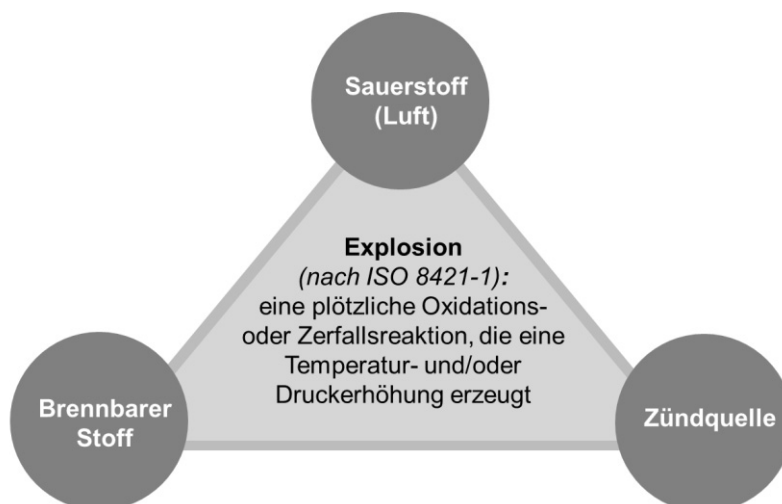


Bild 1: Voraussetzungenfaktoren einer Explosion

Die Voraussetzungsfaktoren für eine Explosion treten häufig bei der Herstellung von chemischen und petrochemischen Stoffen auf. Jedoch ist die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre auch bei anderen Prozessen möglich, wie beispielsweise bei der Herstellung von Medikamenten oder Textilien. Eine Eingrenzung aufgrund der individuellen Prozesse und eingesetzten Stoffe ist kaum möglich. Durch den Einsatz des Explosionsschutzes sollen die Gefahren einer Explosion vermieden und das Risiko minimiert werden.

2.2 Zündschutzarten

Durch die Historie des Explosionsschutzes wurden Schutzkonzepte entwickelt, die auf den Erkenntnissen umfangreicher Forschungstätigkeiten basieren. Diese Schutzkonzepte etablierten sich in der industriellen Anwendung und wurden durch Normen als Standard verankert. Die Konzepte werden auch als *Zündschutzarten* bezeichnet. [4,5]

Die Anforderungen und Vorgehensweisen zur Einhaltung bzw. Umsetzung der Zündschutzarten werden in den Normen festgesetzt. Die Zündschutzarten sind Hilfsmittel für den Konstrukteur, der durch diese Hinweise zur explosionsschutzgerechten Konstruktion der Produkte erhält. Darüber hinaus kann durch die notwendige Erfüllung der Anforderungen ein übereinstimmendes Sicherheitsniveau der Geräte garantiert werden. Aktuell unterscheiden sich die Zündschutzarten für elektrische und nicht-electrische Geräte. Eine Zündschutzart, die jedoch in beiden Bereichen zum Einsatz kommt, ist die *druckfeste Kapselung*.

2.3 Zündschutzart Druckfeste Kapselung

Mit der Zündschutzart druckfeste Kapselung, welche durch die Norm IEC 60079-1 [6] definiert ist, wird das Prinzip verfolgt, eine auftretende Explosion zu umschließen, um die Ausweitung dieser auf die Umgebung zu verhindern. Zur Realisierung dieses Zieles wird das nicht explosionsschutzgeschützte Gerät, welches jedoch in der explosionsfähigen Atmosphäre positioniert werden muss und somit eine potentielle Zündquelle darstellt, in der druckfesten Kapselung installiert. Bild 2 verdeutlicht schematisch das Grundprinzip der dieser Zündschutzart.

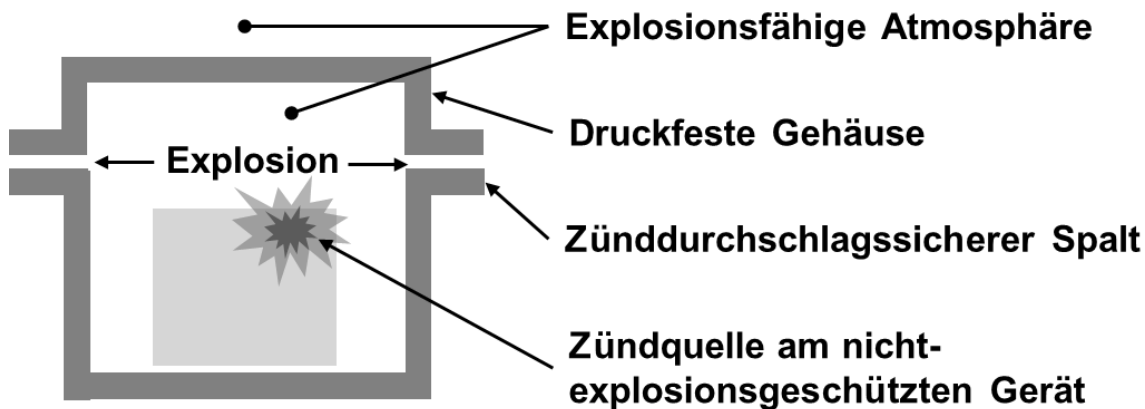


Bild 2: Grundprinzip der Zündschutzart druckfeste Kapselung

Die durch die Explosion entstehenden Kräfte und Temperaturen muss dieses Gehäuse ohne Beschädigungen aufnehmen können. Dementsprechend bedingen diese Anforderungen massive und somit materialintensive Konstruktionen. Die Flammenausbreitung einer Explosion tritt häufig mit Unterschallgeschwindigkeit auf und ist folglich eine Deflagration. Durch die umfangreichen Forschungsarbeiten mit dem Modell eines kugelförmigen Behälters ist erwiesen, dass bei einer Explosion der zeitliche Verlauf der Flammenfront und des Druckanstieges versetzt erfolgt. In dem Modell wird die explosionsfähige Atmosphäre im Zentrum der Kugel gezündet. Zu dem Zeitpunkt, wo die Flammenfront fast den gesamten Weg bis zur Gehäusewand zurückgelegt hat, ist der Druck erst bis zur Hälfte seines Maximalwertes angestiegen. Durch den Anstieg des Explosionsdrucks wird das im Bereich der Gehäusewand vorrätige unverbrannte Gas komprimiert. Folglich bilden sich dort höhere Temperaturen. Da die Wärmeleitung im Zusammenhang zur Flammenfront besteht, bilden sich die hohen Temperaturen nur im verbrannten Gas. [7 S. 563-576, 8]

Durch den Einsatz einer Druckentlastungsfunktion könnte das Gas ausströmen. Eine Reduzierung des Explosionsdruckes und der entstehenden Temperaturen wären möglich.

3 Druckentlastung

3.1 Allgemein

Eine eindeutige Definition für den Begriff der Druckentlastung kann der Literatur nicht entnommen werden. Die Interpretation ist auf unterschiedlichste Art und Weise möglich, da die Anwendung der Druckentlastung eine große Vielfalt aufweist. Neben den technischen Einsatzmöglichkeiten sind u.a. auch Prozesse der Druckentlastung im Bereich der Medizin (Dekubitusprophylaxe [9, 10]) und Geografie (Physikalische Verwitterung – Exfoliation [11,

12]) bekannt. Die Druckentlastung kann als Phänomen der Natur deklariert werden, welches der Mensch auf verschiedene Applikationen übertragen hat.

3.2 Wirkprinzipien

Bei technischen Anwendungen werden einzelne Druckentlastungselemente oder Druckentlastungssysteme häufig als Sicherheitseinrichtung für unter druckstehende Behälter oder Prozesse genutzt. Dabei reicht der Einsatz von Druckentlastungselementen in einfachen Druckluftzuleitungen bis hin zu Druckentlastungssystemen bei Kernreaktoren. Die Analyse des Standes der Technik weist auf, dass übergreifend bei allen Beispielen einwirkende Kräfte reduziert werden. Zur Realisierung dieser Funktion werden jedoch unterschiedliche Wirkprinzipien genutzt, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Wirkprinzipien zur Realisierung der Funktion „Druckentlastung“

Druckentlastungselement/-system	Wirkprinzip der Funktion „Druckentlastung“			
	Vergrößerung des Volumens			
	Begrenztes Volumen	Unbegrenztes Volumen		
Geografie				
Physikalische Verwitterung-Exfoliation [11, 12]		x		
Medizin				
Dekubitusprophylaxe [9, 10]			x	
Technik				
Kugelhahn mit Druckentlastung [13, 14]	x			
Sicherheitsventile [15, 16]	x	x		
Berstscheiben/-stopfen	x	x		
Druckentlastungsklappen/Explosionsklappe/Druckentlastungskuppel/Druckentlastungsjalousie [17, 18]	x	x		
Flammenlose Druckentlastung [7, 19]	x	x	x	x

Bei der Vielzahl von Druckentlastungselementen/-systemen wird die Funktion durch die Vergrößerung des zur Verfügung stehenden Volumens realisiert. Dabei wird das Volumen durch einen begrenzten oder unbegrenzten zusätzlichen Raum erweitert. Auch die Ver-

größerung der zur Verfügung stehenden Oberfläche, auf dem die Kraft einwirkt, stellt eine technische Lösung dar. Das Beispiel der flammenlosen Druckentlastung zeigt, dass auch die Umwandlung der Energie eine Möglichkeit ist, denn bei dieser Anwendung wird neben der mechanischen Energie auch thermische Energie umgewandelt. Dies trägt zur Folge, dass die druckverursachende Kraft minimiert wird.

4 Druckentlastung im Explosionsschutz

Die Untersuchung des Standes der Technik zeigt bereits, dass Druckentlastungselemente und -systeme im Explosionsschutz eingesetzt werden. Der Gebrauch lässt sich durch die bereits beschriebene Explosionsdynamik begründen. Die Systeme dienen zur Reduzierung des bei einer Explosion entstehenden Druckes. Dabei ist die Anwendung häufig nicht direkt am Gerät vorgesehen, sondern an Anschlusskonstruktionen wie Aspirationsanlagen, Rohrleitungen, die den Verbund zwischen unterschiedlichen Anlagen darstellen oder Ablasskanälen. Dort werden beispielsweise Berstscheiben, Druckentlastungsklappen, Druckentlastungsjalousien oder flammenlose Druckentlastungen integriert. Bis auf die flammenlose Druckentlastung vergrößern die Druckentlastungselemente und -systeme bei einem definierten Ansprechdruck das für die Druckausbreitung zur Verfügung stehende Volumen. Bei der flammenlosen Druckentlastung wandeln Flammenlöschelemente aus Drahtgewebe, Stahl-, Stein- oder Glaswolle die Energie um.

Die aktuelle Integration der Druckentlastungsfunktion bedarf eines großen Bauraums, da die Realisierung nur durch zusätzliche Bauteile möglich ist. Gegenwärtige Entwicklungen zeigen, dass die Idee existiert, die Druckentlastungsfunktion in bestehende Elemente von Geräten und Maschinen einzubinden. Im Fokus dieser Betrachtungen steht die Zündschutzart druckfeste Kapselung. Im Patent DE 198 26 911 A1 [20] wird der Einsatz von Druckentlastungsöffnungen in der druckfesten Kapselung beschrieben. Die Öffnungen sind mit Flammensperren bestückt, um das Flammenlöschvermögen zu verwirklichen. Das Patent DE 10 2005 042 565 [21] sieht zur Realisierung der Druckentlastung ein Gehäuse vor, welches vollständig aus porösem Material besteht. Die Untersuchungen, welche im Rahmen der Dissertation „Permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagssicheren Explosionsdruckentlastung“ [22] durchgeführt wurden, zeigen, dass der Einsatz von porösem Material als Druckentlastungselement in der druckfesten Kapselung eine Reduzierung des Explosionsdruckes ermöglicht. Mit dieser Forschungsarbeit werden grundlegende Konstruktionsrichtlinien zur Auslegung von druckfesten Gehäusen mit porösen Materialien

ausgestatteten Druckentlastungsöffnungen geschaffen. Als poröse Materialien werden Bandwickel, gesinterte Partikelschüttung und gesinterte Kurzfasern in druckfeste Gehäuse mit einem Volumen unter 10 Litern eingesetzt. Die Integration der gesinterten Kurzfasern erzielt aufgrund des anisotropen Aufbaues und der vielseitigen Porositätsgestaltung in den Untersuchungen die optimalsten Ergebnisse.

5 Forschungsansatz

Die Einbindung einer Druckentlastung in die Zündschutzart druckfeste Kapselung ist möglich. Die aktuellen technischen Lösungen basieren auf einer Kombination der aufgezeigten unterschiedlichen Wirkprinzipien. Zum einen kann durch poröses Material Gas in ein begrenztes bzw. unbegrenztes zusätzliches Volumen strömen, zum anderen wird durch dieses Material die durch den Druck belastete Oberfläche vergrößert. Darüber hinaus erfolgt mit der Durchströmung des porösen Materials die Umwandlung von Energie durch Reibung und Wärmeübertragung.

Die Sicherheit von Mensch und Umwelt ist das oberste Ziel des Explosionsschutzes. Dieses wird u.a. durch exakte Anforderungen garantiert. Bei der Zündschutzart druckfeste Kapselung sind die Spaltlänge und -weite solche Kenngrößen. Die detaillierten Vorgaben der Norm sind bei der Dimensionierung von Öffnungen wie beispielsweise Deckel oder Durchführungen zu berücksichtigen. Der sichere Einsatz von porösem Material mit nicht zu vermaßenden Spalten kann nur durch erhöhten Aufwand ermöglicht werden. Mit exakt definierten, reproduzierbaren Kanälen ist ein eindeutiger Vergleich der Eigenschaften möglich. Demzufolge ist zu untersuchen, welche porösen Materialien dieser Anforderung entsprechen und die Funktion als Druckentlastungselement in der druckfesten Kapselung erfüllen können, um den maximalen Explosionsdruck zu reduzieren. Infolgedessen besteht die Möglichkeit, die Methoden des Leichtbaus anzuwenden, da eine Minimierung der auf das Gehäuse einwirkenden Kräfte erfolgt ist.

6 Zusammenfassung

Druckentlastungselemente und -systeme werden bereits erfolgreich im Bereich des Explosionsschutzes eingesetzt. Diese dienen zur Druckentlastung von Maschinen bzw. Anlagen und können nur durch zusätzliche Bauteile realisiert werden. Es existieren erste Bestrebungen die Funktion der Druckentlastung auch in bestehende Geräte ohne Erfordernis von zusätzlichen Bauteilen und -raum zu integrieren. Demzufolge sind Elemente oder Sys-

teme zu entwickeln, welche diese Funktion nicht aktiv sondern passiv umsetzen. Dafür ist die Zündschutzart druckfeste Kapselung prädestiniert. Mit dem Einsatz einer Druckentlastung in der druckfesten Kapselung durch ein Element, welches sich unter Erfüllung der normativen Anforderungen in das Gehäuse integrieren lässt, ist es möglich den maximalen Explosionsdruck zu senken und Methoden des Leichtbaues für die Konstruktion zur nutzen. In den aktuellen Untersuchungen werden für die Druckentlastung poröse Materialien eingesetzt, die kein eindeutig definiertes Gewebegeflecht aufweisen. Zur Erfüllung der Anforderungen und Bestehen der Zertifizierung ohne erhöhten Aufwand wäre der Einsatz von Materialien mit einer definierten und reproduzierbaren Struktur jedoch wünschenswert. Diese weiterführenden Anforderungen stellen den Fokus der zukünftig durchzuführenden Forschungstätigkeiten dar.

Literatur

- [1] Abele, Eberhard; Reinhart, Gunther: Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011 – ISBN: 978-3-446-42595-8
- [2] Spath, Dieter (Hrsg.): Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013. – ISBN: 978-3-8396-0570-7
- [3] ISO 8421-1: Fire protection; Vocabulary; Part 1: General terms and phenomena of fire Bilingual edition, 1987.
- [4] Beyling, Karl: Versuche zwecks Erprobung der Schlagwettersicherheit besonders geschützter elektrischer Motoren und Apparate sowie zur Ermittlung geeigneter Schutzvorrichtungen für solche Betriebsmittel ausgeführt auf der berggewerkschaftlichen Versuchstrecke in Gelsenkirchen-Bismarck. Glückauf. Essen-Ruhr: Verl. d. Berg- u. Hüttenmännischen Zeitschrift "Glückauf", 1906.
- [5] Von Pidoll, Ullrich: Explosionsschutz in der CTR und Weiterführung der Aufgaben in ihren Nachfolgeorganisationen. PTB-Bericht Ex, Explosionsschutz. 7. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2015.– ISBN 978-3-95606-192-9.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 60079-1: Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung „d“ (IEC 60079-1:2014); Deutsche Fassung EN 60079-1:2014. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015
- [7] Steen, Henrikus. Handbuch des Explosionsschutzes. Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH, 2009, S. 563-576 – ISBN 9783527624997.
- [8] Beyer, Michael: Über den Zünddurchschlag explodierender Gasgemische an Gehäusen der Zündschutzart "Druckfeste Kapselung". Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl., 1997. Fortschrittberichte VDI Reihe 21, Elektrotechnik. 228, S. 19-22 – ISBN 3-18-322821-1.
- [9] Ahnert, Frank: Einführung in die Geomorphologie. 4. Aufl., 2009. utb-studi-e-book. – ISBN 9783838581033.

- [10] Zepp, Harald: Geomorphologie. Eine Einführung. 6., aktual. Aufl., 2014. utb-studi-e-book. – ISBN 978-3-838-54030-6.
- [11] Hellmann, Stefanie; Rößlein, Rosa: Pflegepraktischer Umgang mit Dekubitus. 2., aktualis. Aufl. Hannover: Schlütersche, 2013. Pflegekolleg. – ISBN 978-3-842-68421-8.
- [12] Schmidt, Simone: Expertenstandards in der Pflege - eine Gebrauchsanleitung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 140 – ISBN 978-3-662-47726-7.
- [13] Avintos AG: Peter Meyer Kugelhähne [online]. Verfügbar unter: http://www.avintos.com/upload/prj/product/attachment/AVI_CAT_PM_KATAL_FKGH_DE.pdf
- [14] Böhmer: Vollverschweisste Kugelhähne [online]. Verfügbar unter: http://www.boehmer.de/fileadmin/content/Docs/literature/Boehmer_Katalog_Vollverschweisst.pdf
- [15] Hauptmanns, Ulrich: Prozess- und Anlagensicherheit. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 226f. – ISBN 978-3-642-37252-0.
- [16] Weber, Klaus H.: Engineering verfahrenstechnischer Anlagen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 303-307 – ISBN 978-3-662-52896-9.
- [17] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002
- [18] Betonbau GmbH & Co. KG: Komponenten für Technikgebäude [online]. Verfügbar unter: https://www.betonbau.com/application/files/1914/2589/1935/Komponenten_Technikgebaeude_01.pdf
- [19] REMBE® GmbH Safety + Control.: REMBE Explosionsschutz [online], 2016. Verfügbar unter: http://www.rembe.de/fileadmin/produkte/explosionsschutz/Basics/REMBE_Explosionsschutz.pdf
- [20] Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das BMWI, dieses wiederum vertreten durch den Präsidenten der PTB Braunschweig und Berlin: Verfahren zur Führung von im Innern eines Gehäuses gebildeten Explosionsgasen durch zünddurchschlagsicher ausgebildete Spalte und explosionsgeschütztes Gehäuse. Erfinder: U. Klausmeyer. Anmeldung: 17. Juni 1998. Deutschland. DE 198 26 911 A1.
- [21] FHF Funke + Huster Fernsig GmbH. Gehäuse für ein elektrisch betriebenes Gerät. Erfinder: H.-P. OPITZ. Anmeldung: 8. September 2005. Deutschland. DE 10 2005 042 565 B4 I.
- [22] Hornig, Julia: Permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung. Gestaltung und Anwendungsmöglichkeiten. Zugl.: Magdeburg, Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2012. Aachen: Shaker, 2013. Fortschritte in der Maschinenkonstruktion. 2013,3. ISBN 978-3-8440-1835-6.

Vernetzen von freien Skizzen in SysML Systemmodellen zur Unterstützung der Konstrukteurstätigkeit

Albert Albers, Georg Moeser, Mesut Salihoglu

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

Kaiserstraße 10, 76131 Karlsruhe

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

Inhalt: Dieser Beitrag zeigt eine Softwareerweiterung (Plugin) für das Systems Modeling Language (SysML)-Modellierungstool Cameo Systems Modeler (CSM) der Firma NoMagic, mit der es möglich ist Skizzenbereiche von freien Skizzen zu SysML-Modellelementen zu verknüpfen. Der Bedarf hierfür und der Ansatz wurden bereits in vorigen Arbeiten gezeigt [1][2]. Das Plugin ermöglicht durch die Verwendung von Skizzenbereichen [1] eine präzise Modellierung und eindeutige Verknüpfung von Informationen in freien Skizzen zu SysML Inhalten. Es wird gezeigt wie freie Skizzen und deren Inhalte mit dem Plugin zu SysML-Modellelementen verknüpft werden und damit für Entwickler leicht zugänglich werden.

Abstract: This article shows a software plugin for the Systems Modeling Language (SysML)-modeling tool Cameo Systems Modeler (CSM) by NoMagic. It makes it possible to link sketch snippets of free sketches to SysML-model elements. The need to do so in product engineering and an applicable approach have been shown in prior work [1][2]. The plugin enables the engineer to model precise with unambiguous linkage of information from free sketches to SysML-model elements by using sketch snippets [1]. It is shown how free sketches and their contents are linked with the plugin to SysML-model elements and thus are easily accessible by the user.

Stichwörter: MBSE, SysML, Skizzen, Konstruktion; Systemmodell

Keywords: MBSE, SysML, Sketches, Design; System Model

1 Einleitung

Bei durchgängiger, formalisierter Anwendung von Modellierung zur Unterstützung der Aktivitäten des Systems Engineering (SE) [3] wird von Model-Based Systems Engineering (MBSE) gesprochen [4]. Bei dem Wandel von einem dokumentenzentrierten zu einem modellbasierten Vorgehen hat sich die Systems Modeling Language (SysML) [5] als meist verbreitete Modellierungssprache des MBSE hervorgetan [6]. SysML ist auf Basis bzw. in Erweiterung der Unified Modeling Language (UML) [7] definiert [5]. Sie ist somit eine sogenannte „grafische Modellierungssprache“ [8]. Diese Bezeichnung ist jedoch teilweise irreführend, da dies lediglich bedeutet, dass mit grafischen Elementen (bspw. Kästen und

Pfeile) in den Modelldiagrammen eine Beschreibung von Anforderungen, Struktur und Verhalten des modellierten Systems möglich ist [9]. Die Produktgestalt ist jedoch grafisch nicht repräsentiert. Insbesondere bei der Entwicklung von mechanischen (Teil-)Systemen ist jedoch die Darstellung der (vorläufigen) Produktgestalt von hohem Interesse: LEMBURG berichtet von der „Skizze als Dokumentationsform während des Entwerfens“ [10]. Weitere Literatur zur Relevanz von Skizzen wurde bereits von MOESER et. al. [1] zusammengefasst. Damit SysML Modelle in der Entwicklung von Mechanik sinnvoll eingesetzt werden können, besteht der Bedarf zur Vernetzung von Inhalten aus Skizzen zu SysML Modellelementen [1][11]. Ein Ansatz zur Vernetzung über Skizzenbereiche wurde in vorigen Arbeiten von MOESER et. al. vorgestellt [1][11]. Über die SysML Modelle kann eine Verknüpfung zu der finalen Gestaltmodellierung im CAD hergestellt werden [2][11] und somit der Konstrukteur bei seiner Arbeit durchgängig mit konsistenten Modellen arbeiten.

2 Stand der Technik und Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik und der Stand der Forschung zur Nutzung von Skizzen in SysML aufgezeigt. In diesem Beitrag wird der Begriff freie Skizze verwendet, der von MOESER et. al. als beliebige zweidimensionale Darstellung definiert wurde [1].

2.1 Aktuelle Möglichkeiten zur Verwendung von freien Skizzen in SysML

Es bestehen bereits Möglichkeiten zur Verwendung von freien Skizzen in SysML. Die SysML Spezifikation [5] gibt hierzu wenige Hinweise. Lediglich im Anhang ist für Internal Block Diagrams folgendes angemerkt: „*Each model element depicted may include a graphical icon to help convey its intended meaning*“ [5]. Hiermit ist die Möglichkeit gegeben den einzelnen (isolierten) Modellelementen eine grafische Repräsentation zu geben (vgl. Bild 1). Hierbei können in den Icons jedoch keine Wechselwirkungen dargestellt werden, da diese der Zuordnung zu einem Modellelement widersprechen.

SysML-Tools bieten weitere Möglichkeiten freie Skizzen in SysML-Modellen zu nutzen. Im Folgenden sind Funktionalitäten von Cameo Systems Modeler (CSM; Version 18.3) der Firma NoMagic [12], Integrity Modeler (IM; Version 8.2.13) der Firma PTC [13] und Rational Rhapsody Designer for Systems Engineers (RRD; Version 8.1.5) der Firma IBM [14] gezeigt. Von weiteren SysML-Tools sind keine weiteren Funktionen zur Nutzung von freien Skizzen bekannt. Zur Demonstration der Tool-Funktionalitäten wurde eine Beispielgrafik (vgl. Bilder 2, 3 und 4 sowie Tabelle 1) verwendet.

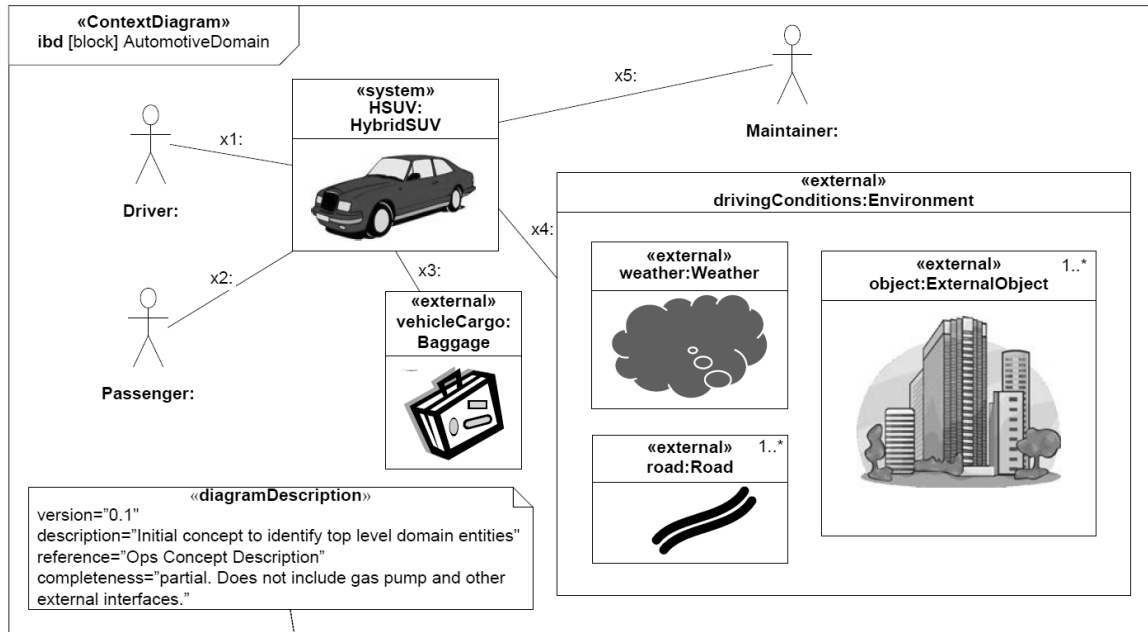


Bild 1: Nutzung von Icons in Internal Block Diagrams für die Kontextbeschreibung eines Hybrid SUV [5]

Einfügen von freien Skizzen als Icons für SysML-Elemente

Viele SysML-Tools bieten die Möglichkeit in unterschiedlichsten Diagrammarten die angezeigten Modellelemente jeweils durch ein Icon zu repräsentieren. Auch hier besteht die Einschränkung, dass die als Icon eingesetzte freie Skizze das entsprechende Element isoliert darstellen muss, um Konsistenz zwischen Modellelement und Inhalt der freien Skizze zu gewährleisten. Bild 2 zeigt den Einsatz von freien Skizzen als Icon mit den untersuchten SysML-Tools.

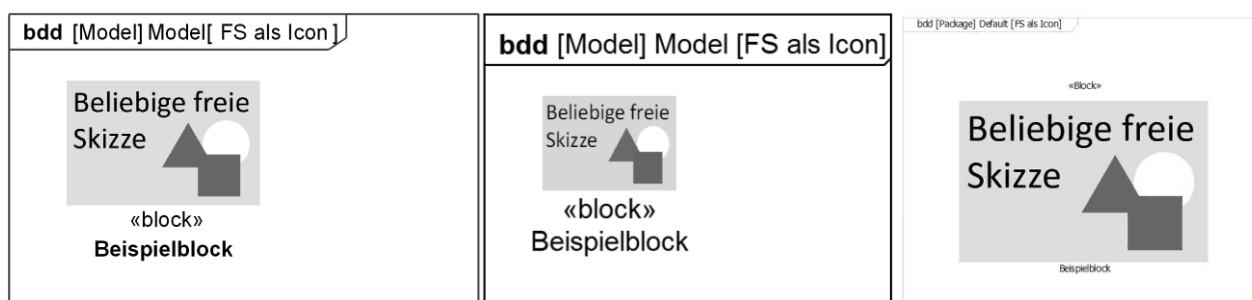


Bild 2: Einsatz einer freien Skizze als Icon für einen Block „Beispielblock“ in CSM, IM und RRD (v.l.n.r.)

Einfügen von freien Skizzen in SysML Diagrammen

Die Tools erlauben es auch freie Skizzen in Diagrammen ohne Bezug zu den dargestellten Modellelementen anzuzeigen. CSM und RRD bieten die Möglichkeit Bilddaten als eigenes Element im Diagramm anzuzeigen. Im CSM heißt dieses Element „Image Shape“ und in RRD „Image“. Bild 3 zeigt Diagramme in denen diese Funktionalität genutzt wurden. Beide

Tools bieten die Möglichkeit beliebig viele (auch unterschiedliche) freie Skizzen einzufügen und die Größe der Darstellung anzupassen. Das Image Shape- bzw. Image wird nicht im Containment-Baum des Modells gelistet und eine Verknüpfung mittels einer SysML-Beziehung ist nicht möglich. Andere Modellelemente wie die beispielhaft gezeigten Blöcke in Bild 3 werden vor dem Image Shape bzw. Image angezeigt. Durch manuelles Layouten können Modellelemente im Diagramm an gewünschten Positionen vor der freien Skizze angeordnet werden. Durch Auto-Layout-Funktionalitäten oder das Ein-/Ausblenden von Elementeigenschaften können sich die Positionen der Modellelemente im Diagramm schnell ändern.



Bild 3: Einsatz freier Skizzen als „Image Shape“ in CSM und als „Image“ in RRD (v.l.n.r.)

IM bietet eine derartige Möglichkeit zum Einfügen von freien Skizzen nicht. Eine freie Skizze kann jedoch als Hintergrund eines Diagramms verwendet werden, wie es in Bild 4 gezeigt ist. Auch hierbei ist die freie Skizze nicht im Containment-Baum gelistet und kann nicht mit Beziehungen zu anderen Modellelementen verknüpft werden. Zudem wird der eigentliche Modellrahmen des Diagramms ausgeblendet. Die Modellelemente im Diagramm werden vor der freien Skizze angezeigt.



Bild 4: Freie Skizze als Diagrammhintergrund im IM

Verknüpfung von freien Skizzen mittels Hyperlink

Die SysML-Tools bieten die Möglichkeit mittels Hyperlink beliebige Dateien im Dateisystem oder Internetadressen zu verknüpfen. Somit ist es möglich beispielsweise aus der Description eines Modellelements auf eine Bilddatei mit einer freien Skizze zu verlinken. Auch hierbei ist es nur möglich eine Zuordnung zwischen einem Modellelement und einer gesamten freien Skizze herzustellen.

Zwischenfazit

Die hier aufgeführten Möglichkeiten sind nicht ausreichend, um eine eindeutige Verknüpfung von SysML-Modellelementen zu Inhalten von freien Skizzen herzustellen.

2.2 Verknüpfungsansatz über Skizzenbereiche

MOESER et.al. haben einen Ansatz [1] vorgestellt, bei dem mit Hilfe von Skizzenbereichen (engl. sketch snippets) auf die Inhalte einer freien Skizze verwiesen wird. Hierbei ist es vorgesehen beliebig viele Skizzenbereiche in einer freien Skizze zu definieren und entsprechend beliebig viele Modellelemente zu verknüpfen. Es können freie Skizzen verwendet werden, die Inhalte nicht isoliert, sondern in einem Kontext darstellen. Die Inhalte können über den Skizzenbereich eindeutig und präzise einem Modellelement zugeordnet werden. Der Ansatz beschreibt somit Anforderungen an ein Softwaretool, welches benötigt wird um in der Praxis Inhalte von freien Skizzen mit SysML-Modellinhalten zu verknüpfen. [1]

Tabelle 1: Beispiele von Skizzenbereichen und zugehörige Modellelemente

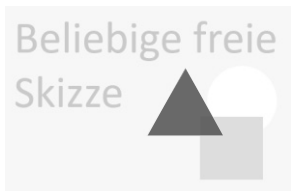
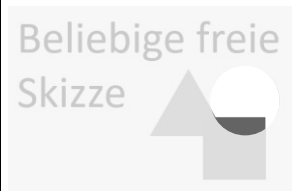
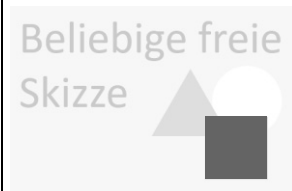
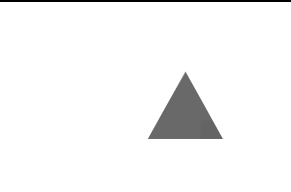


Skizzenbereich (in der freien Skizze)			
Skizzenbereich (zur Verdeutlichung isoliert)			
Modellelement	«block» Dreieck	«block» Kreis	«block» Quadrat

Tabelle 1 zeigt mögliche Skizzenbereiche der Beispielgrafik und zugehörige Modellinhalte. Zu dem Ansatz wurde ein Beispiel mit detaillierter Modellierabfolge veröffentlicht [15].

Verwendung von stereotypisierten Kommentarelementen in MechML

Das FAS4M-Vorgehen (aus dem Projekt FAS4M = Functional Architectures of Systems for Mechanical Engineers; siehe [2]) mit der Modelliersprache MechML (ein SysML-Profil, siehe [16]) greift den oben beschriebenen Ansatz auf. Auf Grund fehlender Softwareumsetzung wurde ein Workaround genutzt: Im Tool Cameo Systems Modeler (CSM) wurde eine freie Skizze als Image Shape eingefügt und Elemente des MechML-Stereotyps „sketch snippet“ (Stereotyp von Comment) in halbtransparenter Darstellung darauf angeordnet. Die sketch snippet-Elemente haben eine Eigenschaft, die auf ein anderes Modellelement verweist und die Verknüpfung realisiert. Ein Beispieldiagramm aus einer Veröffentlichung des FAS4M-Projektes ist in Bild 5 gezeigt. [2]

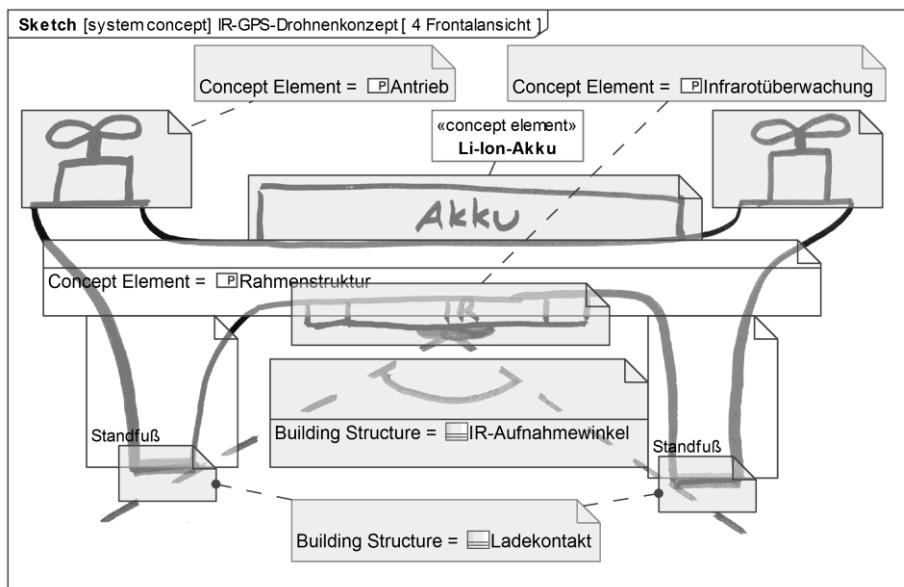


Bild 5: MechML-SketchSnippets umgesetzt mit Cameo Systems Modeler von NoMagic (nach [2])

Der Nutzen der stereotypisierten Comments zeigt jedoch einige Aspekte, die für den Einsatz in der Praxis nicht von Vorteil sind: 1) Die sketch snippets als stereotypisierter Comment können sehr leicht verschoben werden (manuell oder durch automatisches Layouting), wodurch die grafische Zuordnung geändert wird. 2) Auf Grund von Überlagerungen vieler Skizzenbereiche kommt es dazu, dass die freie Skizze an sich und einige Skizzenbereiche nicht gut erkannt werden. 3) Skizzenbereiche können nur in Form eines Rechtecks definiert werden.

3 Vorstellung der Softwareerweiterung und des Vorgehens

Basierend auf dem Ansatz von MOESER et. al. ([1], vgl. Kapitel 2.2) wurde die Softwareerweiterung (Plugin) „Image Plugin“ für den Cameo Systems Modeler (CSM) entwickelt. Anhand des Entwicklungsbeispiels „Überwachungssystem“ aus dem FAS4M-Projekt ([2], vgl. Bild 5) wird im Folgenden der Einsatz des Plugins vorgestellt. Ausgangspunkt der Beschreibung ist die erstellte Konzepte-Sicht. Konzeptuelle Elemente, sind als Properties des IR-GPS-Drohnenkonzepts modelliert und dargestellt (vgl. Abbildung 5 in [2]). Die Zeichnung aus einem Workshop in Bild 6 wird genutzt, um die konzeptuellen Elemente im Modell besser zu beschreiben.

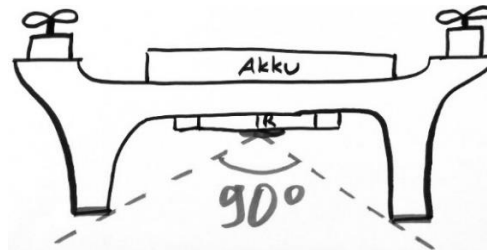


Bild 6: Zeichnung der IR-GPS-Drohne aus einem Workshop

Als Ausgangssituation ist im Containment-Baum die „Infrarotüberwachung“ als «concept property» selektiert. Über das Kontextmenü (rechte Maustaste) und den Untermenüpunkt „Image Plugin“ (Bild 7) steht die Funktion „Add Image“ zur Verfügung. Es kann eine freie Skizze (jpg- oder png-Bilddatei) geladen werden.



Bild 7: Untermenü „Image Plugin“ des Kontextmenüs

Mit der Maus kann ein rechteckiger Skizzenbereich markiert werden, welcher das Modellelement (hier: «concept property» Infrarotüberwachung) repräsentiert (Bild 8). Nach dem Speichern ist der Skizzenbereich mit dem Modellelement verknüpft.

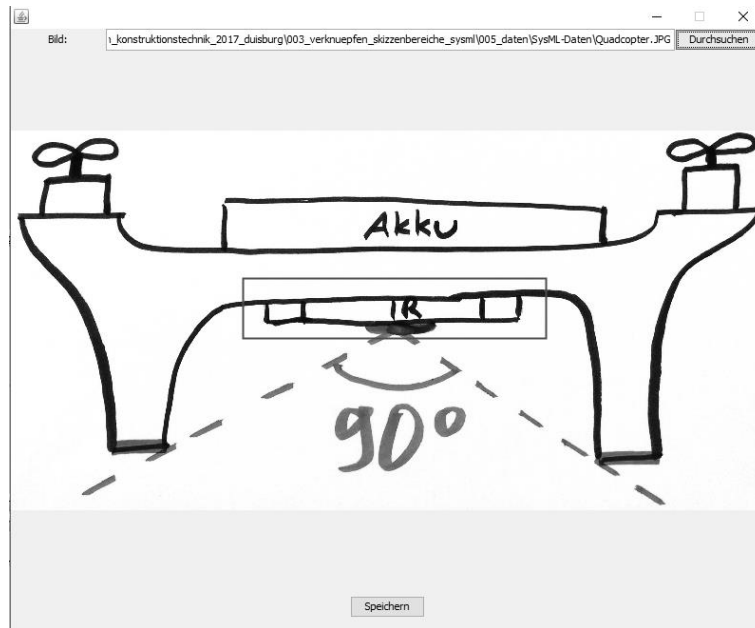


Bild 8: Markierter Skizzenbereich (Rechteck um „IR“) in der neu geladenen freien Skizze

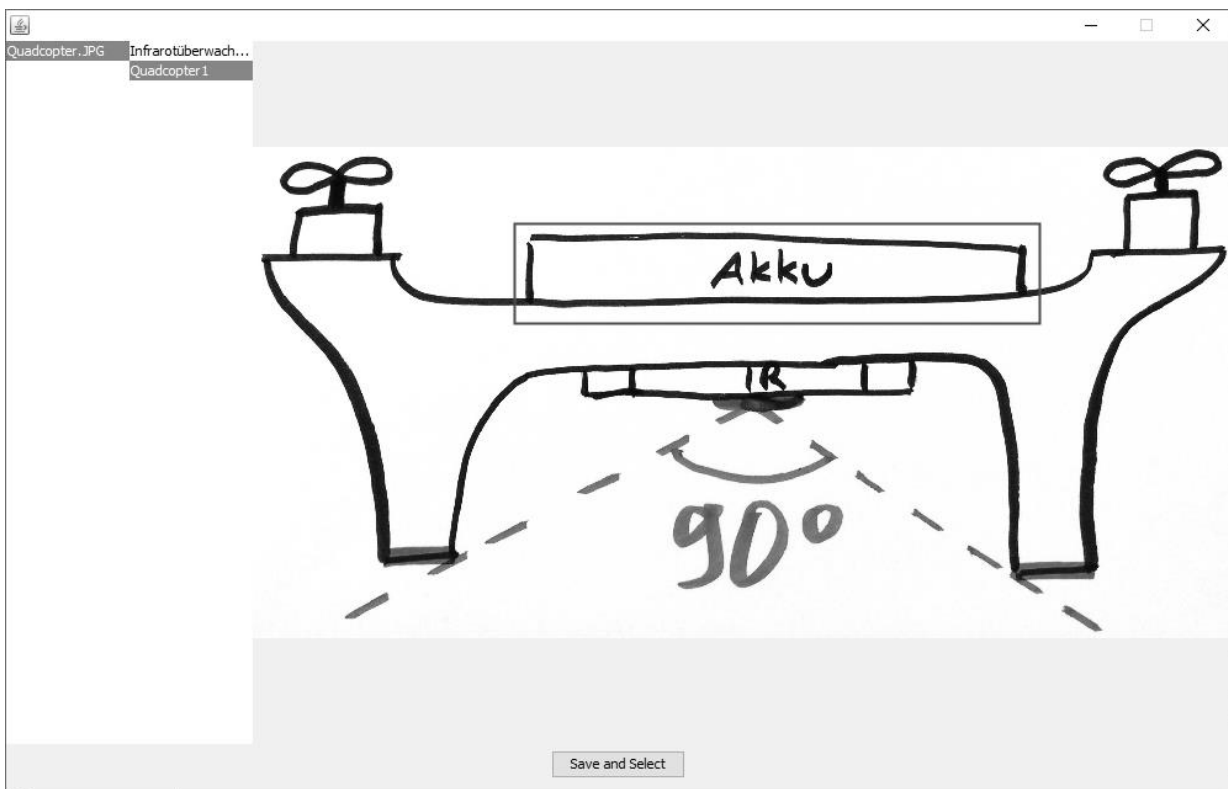


Bild 9: Neu markierter Skizzenbereich (Rechteck um „Akku“) in einer bereits vorhandenen freien Skizze

Im Beispiel wird ein weiterer Skizzenbereich, der ein anderes Modellelement («concept property» Li-Ion-Akku) in der selben freien Skizze repräsentiert, hinzugefügt. Über den Untermenüpunkt „Select Image“ (vgl. Bild 7) können vorhandene Freie Skizzen ausgewählt werden. Bislang steht nur die eine bereits geladene freie Skizze zur Verfügung (Bild 9 linke

Spalte des Fensters im Vordergrund). Erneut wird ein Skizzenbereich markiert und ist nach dem Speichern mit dem Modellelement («concept property» Li-Ion-Akku) verknüpft.

Die bereits gespeicherten Skizzenbereiche können über die Funktion „Show Image“ (vgl. Bild 7) aus dem Kontextmenü eines verknüpften Modellelements angezeigt werden. Der zum Modellelement zugehörige Skizzenbereich ist hervorgehoben. Im linken Bereich des geöffneten Fensters (ähnlich zu Bild 9) können weitere Skizzenbereiche, die in der angezeigten freien Skizze vorhanden sind, ausgewählt werden. Zudem sind weitere Skizzenbereiche mit einer dünnen grauen Umrandung in der freien Skizze angezeigt.

Durch einen Doppelklick auf einen der Skizzenbereiche in der Liste wird das zugehörige Modellelement im Containment-Baum des SysML-Modells markiert. Dadurch ist es möglich die Skizzen beim Navigieren durch das Modell zu nutzen und Zusammenhänge im abgebildeten System zu verstehen.

Durch die Überschneidungen von Skizzenbereichen liegt eine potenzielle Beziehung der zugehörigen Modellelemente vor. Bei zugehörigen Konzeptelementen und Elementen der Baustuktur liegt es nahe, dass das Element der Baustuktur entsprechend zur Umsetzung des Konzeptelementes konstruiert wurde. [1]

Mit dem Image Plugin können zu allen Modellelementen Skizzenbereiche definiert werden. Somit ist auch eine Unterstützung eigener Spracherweiterungen (eigene Stereotypen etc.) gegeben.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des vorgestellten Image Plugins ist es möglich Skizzenbereiche von freien Skizzen mit SysML-Modellelementen im SysML-Tool (hier CSM) zu verknüpfen. Somit ist es möglich auch bei modellbasierter Arbeit mit SysML freie Skizzen jeglicher Art, die bei der Produktentwicklung - insbesondere im Bereich der Konstruktion - entstehen, weiter zu nutzen und deren Inhalte über Skizzenbereiche in das Systemmodell zu integrieren. Vorläufige Gestaltdarstellungen können somit die weitere Arbeit vor der Modellierung mit CAD unterstützen und helfen die Konstruktionsabsicht zu dokumentieren, damit diese bei der Entwicklung künftiger Produktgenerationen [17] leicht eingesehen und nachvollzogen werden kann.

In weiteren Arbeiten wird das gesamte Vorgehen der modellbasierten Entwicklung von Produktgestalt unter Einbezug der vernetzten Skizzen sowie der Nutzen durch Wiederverwendung von Modellen vorheriger Produktgenerationen [18] untersucht.

Literatur

- [1] G. Moeser, A. Albers und S. Kümpel, „Usage of Free Sketches in MBSE“, in Proceedings First IEEE International Symposium on Systems Engineering, Rom, 2015.
- [2] G. Moeser, M. Grundel, T. Weilkiens, S. Kümpel und A. Albers, „Modellbasierter mechanischer Konzeptentwurf: Ergebnisse des FAS4M-Projektes“, in Tag des Systems Engineering 2016, Herzogenaurach, 2016.
- [3] Kaffenberger, S.-O. Schulze und H. Weber, Hrsg., INCOSE Systems Engineering Handbuch. München, 2012.
- [4] INCOSE Technical Operations, Hrsg., „Systems Engineering Vision 2020“. 2007.
- [5] OMG, Hrsg., „OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) - Version 1.4“. Juni-2015.
- [6] L. Delligatti, R. Steiner und R. Soley, SysML distilled: a brief guide to the systems modeling language. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2014.
- [7] OMG, Hrsg., „OMG Unified Modeling Language (OMG UML) – Version 2.5“. März-2015.
- [8] J. Holt, S. Perry und Institution of Engineering and Technology, SysML for model-based systems engineering. Hertfordshire: IET Books, 2013.
- [9] O. Alt, Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. München: Hanser, 2012.
- [10] J. P. Lemburg, „Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese“, Shaker, Aachen, 2009.
- [11] G. Moeser, A. Albers und Klingler, Simon, „Modellbasierte Funktions-Gestalt-Synthese: Unterstützung der Entwickler bei der Definition der Produktgestalt“, in DFX 2015: Proceedings of the 26th Symposium Design For X, Herrsching, 2015.
- [12] „Cameo Systems Modeler“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler>. [Zugegriffen: 02-Mai-2017].
- [13] „Integrity Modeler | PTC“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ptc.com/model-based-systems-engineering/integrity-modeler>. [Zugegriffen: 02-Mai-2017].
- [14] „IBM - Rational Rhapsody Designer for Systems Engineers“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www-03.ibm.com/software/products/de/ratirhapdesiforsystengi>. [Zugegriffen: 02-Mai-2017].
- [15] G. Moeser, Example on „Usage of Free Sketches in MBSE“. Karlsruhe, 2015.
- [16] „Mechanics Modeling Language (MechML) - Version 1.0“. Juni-2016.
- [17] A. Albers, N. Bursac und S. Rapp, „PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimas-senschwungrads“, Forschung Im Ingenieurwesen, Dez. 2016.
- [18] A. Albers und G. Moeser, „Modellbasierte Prinzip- und Gestaltvariation“, in 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2016.

Beiträge und Herausforderungen modellbasierter Systementwicklung in frühen Phasen des PEP aus Sicht der Forschung

Tim Katzwinkel, Georg Jacobs, Manuel Löwer, Christian Konrad, Daniel Moselewski, Fatmir Sulejmani

Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, RWTH Aachen University
Steinbachstr. 54, 52074 Aachen

Email: katzwinkel@ikt.rwth-aachen.de; Internet: <https://www.ikt.rwth-aachen.de>

Inhalt: Der vorliegende Beitrag zeigt eine Momentaufnahme der aktuellen Forschungsentwicklung im Bereich des Model Based Systems Engineering (MBSE) aus Sicht der Produktentwicklungs- und Konstruktionsmethodikforschung auf. Dabei werden in einem Querschnittsvergleich konkrete Lösungsansätze aber auch bestehende offene Fragestellungen gegenübergestellt. Abschließend wird aus den Rechercheergebnissen ein Handlungsbedarf für die Weiterentwicklung des MBSE-Ansatzes in der Produktentwicklung in Form einzelner Schwerpunktsthemen abgeleitet.

Abstract: This article presents a snapshot of current research topics in the field of Model Based Systems Engineering (MBSE) with focus on product development. In a cross-section comparison, approaches towards product development methodologies and toolchains as well as unanswered research questions are presented. Finally, potential future research topics in the field of MBSE are derived.

Stichwörter: MBSE, Produktentwicklung, Systementwicklung, Produktmodellierung, Konstruktionsmethodik

Keywords: MBSE, product development, System Engineering, product modeling, design methodology

1 Einleitung

Aufgrund der steigenden Komplexität von technischen Produkten und dem verstärkten zeitlichen und technologischen Innovationsdruck in industriellen Hochlohnländern ist der Bedarf einer ganzheitlichen, systemischen Produktbetrachtung deutlich geworden. Der enorme Einfluss der industriellen Digitalisierung und die damit verbundene Vielfalt an rechnergestützten Werkzeugen, Datenformaten und Datenhaltungskonzepten erfordert zudem eine systemische Produktentwicklungsstrategie zur Beherrschung dieser Vielschichtigkeit.

2 State of the art

Das International Council on Systems Engineering (INCOSE) definiert modellbasierte Systementwicklung (engl. „Model Based Systems Engineering“, kurz: MBSE) als einen interdisziplinären Ansatz zur Komplexitätsbeherrschung in der Produktentwicklung unter Einbezug der Produktarchitektur, dem Anforderungsmanagement, den Systemschnittstellen, dem Systemverhalten und Test- und Validierungsszenarien [1]. Da dieser Ansatz einen Umbruch von dokumentenbasierten, domänenverteilten Entwicklungsprozessen zu einem datenintegrierenden hochvernetzten Systemmodell impliziert, ist eine Anpassung der etablierten Konstruktionsmethoden und teilweise eine Neuentwicklung von Entwicklungsmethoden notwendig geworden [2].

2.1 Modelle, Methoden und Beschreibungssprachen

Zur Gestaltung MBSE-spezifischer Modelle zwecks methodischer Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses (PEP) wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Modellkonzepte entwickelt. Hier sind beispielsweise das erweiterte V-Modell nach Eigner [3], das W-Modell nach Anderl [4] oder das Modellierungsframework nach Albers [5] zu nennen. Die Anwendung des MBSE-Ansatzes für spezifische Fragestellungen wurde wiederum in einer Reihe von Forschungsprojekten vertieft und in Entwicklungsprozesse und Modellierungsmethoden überführt, wie beispielsweise mecPro² [6], FAS4M [7] oder CONSENS [8]. Zur formalisierten Beschreibung eines Systemmodells ist aufgrund der zentralen Modellrolle im Entwicklungsprozess und der Vielzahl an beteiligten Domänen ein einheitlicher Sprachstandard sinnvoll. Ein internationaler Zusammenschluss von Unternehmen, Endnutzern, Forschern und Regierungsbehörden, die Object Management Group (OMG), hat hierzu den SysML-Standard festgelegt, der eine Erweiterung des UML-Standards darstellt [9]. Aus dem Sprachaufbau in mehrere Diagrammtypen mit zugehörigen Symbolen und Verknüpfungslogiken resultiert in der grafischen Systemmodellierung eine inhaltlich verknüpfte Ansammlung von Diagrammen und Tabellen mit jeweils spezifischem Inhalt (Systemverhalten, Nutzerinteraktion, Produktarchitektur, uvm.). Zur produktiven Handhabung dieser Modellkomplexität sind softwaregestützte Modellierungswerkzeuge verfügbar.

2.2 Aktuelle Softwarelösungen für die Systemmodellierung

Zum gegenwärtigen Stand der Technik existiert eine Vielfalt an Unterstützungswerkzeugen, die sich anhand verschiedener Merkmale unterscheiden und Klassifizieren lassen. So sind beispielsweise kostenfreie und teilweise auch quelloffene Lösungen verfügbar, die mit Hilfe einer auf freiwilliger Mitarbeit aller Anwender (sog. Community) basierenden Weiterentwicklung eine große Anpassbarkeit und viele Möglichkeiten zur Individualisierung für spezifische Fragestellungen einer konkreten Systemmodellierungs-Aufgabe bieten [10–13]. Demgegenüber gibt es eine Reihe kommerzieller Softwarelösungen, die ihre Stärke vor allem in der Bereitstellung standardisierte Schnittstellen zu anderen Entwicklungswerkzeugen und in einem professionellen Support für den Endanwender haben. Als Beispiel für die Systemmodellierung können hier etwa die Programme „MagicDraw“ und „Cameo Systems Modeler“ der Firma NoMagic oder die Software „Rational Rhapsody“ von IBM genannt werden. Eine Stärke der kommerziellen Systemmodellierungs-Software liegt in der Bereitstellung von produktiv nutzbaren Schnittstellen zu industriell genutzten Standards anderer Entwicklungs- und Simulations-Werkzeugen.

Neben den Lösungen für die Systemmodellierung sind Werkzeuge für die datentechnische Einbettung der Systemmodelle in den PLM-Kontext verfügbar. Dabei können die Systemmodelle mit PDM-Systemen und hierdurch auch mit 3D-CAD-Systemen verknüpft werden (z.B. PTC Systems engineering solution, Siemens PLM Teamcenter Systems engineering). Ein Beispiel für die Umsetzung eines ganzheitlichen Ansatzes im Sinne des PLM-Gedankens stellt schließlich die Softwarelösung „Syndeia“ des Unternehmens intercax dar, welche verschiedene Entwicklerwerkzeuge (z.B. 3D-CAD-Systeme, PDM-Systeme, Anforderungsverwaltung, Projektmanagementsoftware, Simulationswerkzeuge, usw.) mit Hilfe einer Datenverknüpfung in Form von Dateiverweisen an ein SysML-Systemmodell anbindet. Die vorgestellten Werkzeuge stellen nur einen kleinen Ausschnitt aus der sich entwickelnden Softwarelandschaft dar.

Im folgenden Kapitel werden die aktuellen konstruktionsmethodischen Forschungsergebnisse aus dem Umfeld der modellbasierten Systementwicklung anhand ausgesuchter Beispiele diskutiert.

3 Konstruktionsmethodische Forschung im Bereich MBSE

Die nachfolgenden Beschreibungen der aktuellen Forschungsbestrebungen im Bereich der konstruktionsmethodischen Betrachtung der modellbasierten Systementwicklung be-

ruhen auf der Analyse von Veröffentlichungen ausgesuchter Fachkonferenzen aus den Jahren 2015 und 2016 sowie einzelner Zeitschriftenbeiträge. Dabei wurden gezielt Konferenzen mit konstruktionsmethodischer Ausrichtung ausgewählt, um einen Einblick in den MBSE-Ansatz aus Sicht der methodischen Produktentwicklung zu gewinnen. Die betrachteten Tagungen sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt, die Zeitschriftenbeiträge können dem Literaturverzeichnis entnommen werden.

Tabelle 1: Auflistung der analysierten Fachkonferenzen

Konferenzname	Kurzbezeichnung
Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (Jahre 2015, 2016)	KT15, KT16
Entwerfen, Entwickeln und Erleben 2016	EEE16
DfX-Symposium 2016	DfX16
Intern. Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering	TMCE16
CIRP Design Conference 2016	CIRPDESIGN16
International Conference on Engineering Design 2015	ICED15
International Design Conference 2016	DESIGN16

Insgesamt wurden 100 Beiträge aus dem Umfeld der modellbasierten Produkt- und Systementwicklung ermittelt (z.B. Modellbildung, experimentelle Anwendungsbeispiel, Fallbeispiele, Anwenderstudien, etc.), von denen 78 Beiträge eine methodische Systemmodellierung adressierten. In einem weiteren Auswahlsschritt wurden aus diesem Fundus 30 Beiträge ermittelt, die eine methodische Systemmodellierung mit Hilfe des MBSE-Ansatzes im weiteren Sinne und eine Modellierung unter Zuhilfenahme der beschriebenen Werkzeuge und Tools (z.B. UML- oder SysML-Modellierungssprache) in insgesamt 15 Schwerpunktsfeldern thematisieren. Nachfolgend werden die Erkenntnisse in Form einer tabellarischen Übersicht zusammengefasst, vgl. Tabelle 2. Als inhaltliche Orientierungshilfe wurden in der Tabelle die Beitragsthemen stichpunktartig adressiert.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

[illegible]

3.1 Diskussion der Verteilung der Forschungsschwerpunkte im MBSE

Bild 1 zeigt die Verteilung der ermittelten gegenwärtigen Forschungsschwerpunkte in Form ihrer absoluten Häufigkeit. Die Schwerpunkte wurden durch Auswertung der Einzelbeiträge und einem anschließenden Quervergleich ermittelt. Aufgrund des Untersuchungsumfangs lässt sich aus der Datenlage keine allgemeingültige Aussage zur Forschungsentwicklung im MBSE tätigen. Im eingeschränkten Themenfeld der konstruktionsmethodischen Produktentwicklung lassen sich jedoch einzelne Schwerpunktsfelder und neue Forschungstrends identifizieren.

Obwohl der MBSE-Ansatz bereits seit Jahren bekannt ist und zahlreiche Werkzeuge zur praktischen Anwendung bereitstehen (vgl. Kapitel 2) fällt auf, dass fast alle vorgestellten Forschungsergebnisse eine neuartige oder angepasste Modellentwicklung bzw. -änderung und Evaluation enthalten. Im Einzelnen bedeutet dies sehr oft eine Anpassung oder Neuentwicklung der Systematik zur Aufstellung von Systemmodellen und einer passenden Anwendungsstrategie.

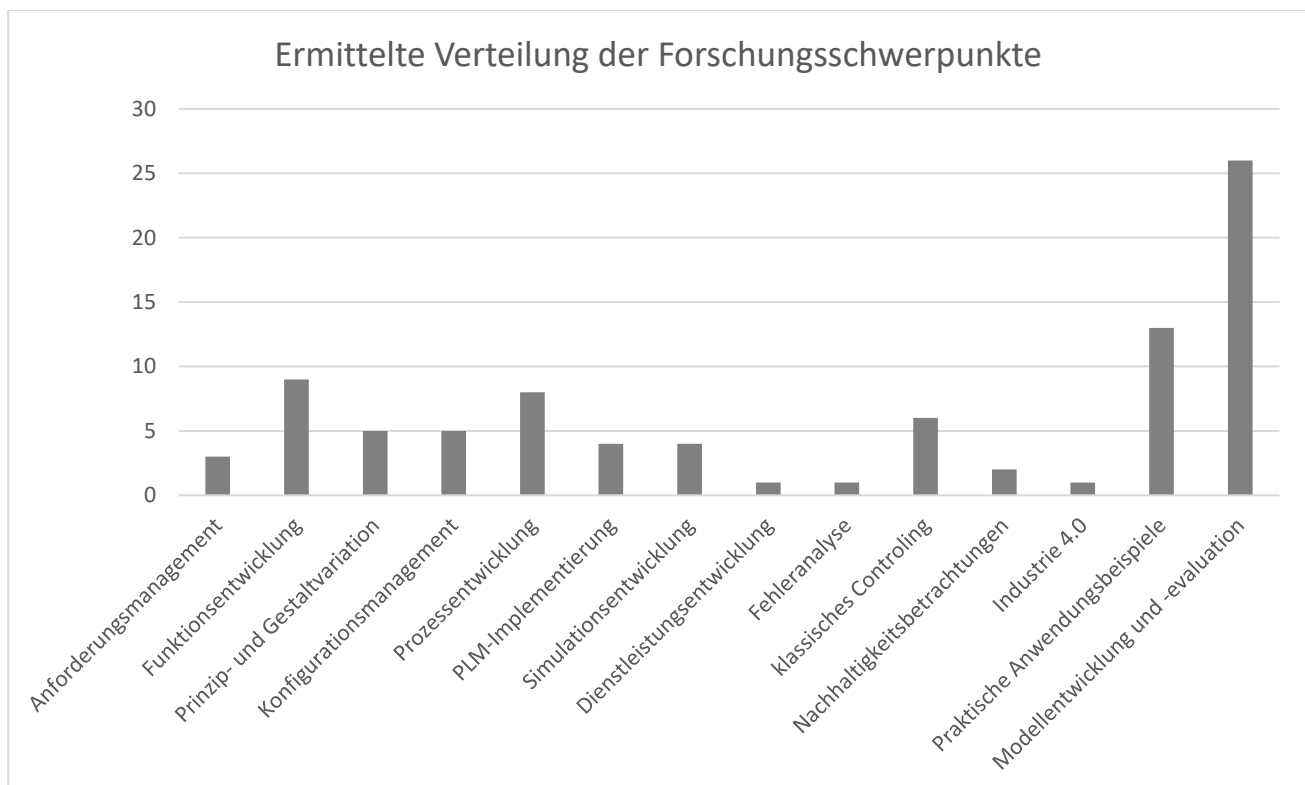


Bild 1: Absolute Verteilung der Forschungsschwerpunkte

Dieser Umstand zeigt, dass die generische Anwendung einer universellen Modellierungsstrategie im praktischen Anwendungsfall derzeit nicht erfolgt und dass die etablierten Me-

thoden und Modelle für einzelne Anwendungsgebiete einer individuellen Anpassung bedürfen.

Weiterhin zeigt sich ein Schwerpunkt in der Verwendung des MBSE-Ansatzes als Entwicklungswerkzeug für die praktische Produktentwicklung, was ebenfalls durch eine große Zahl an Anwendungsbeispielen belegt werden kann [16-19, 21-22, 24, 30, 33, 39-40, 22]. Dies unterstreicht, dass die aktuellen Entwicklungen in der MBSE Forschung eine hohe Praxisrelevanz haben.

Das Anforderungsmanagement und die Funktionsentwicklung repräsentieren gemeinsam mit der Prinzip- und Gestaltvariation die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses aus gestalterischer Sicht. Sie stellen einen weiteren Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten dar und werden in den referenzierten Beiträgen explizit adressiert, wenngleich sich in der angewandten Produktentwicklung nicht immer eine klare Trennung zwischen den drei Aspekten vollziehen lässt.

Neben der gestalterischen Entwicklung stellt die Prozessentwicklung und eine Implementierung in den PLM-Kontext einen der MBSE-Forschung konzeptionell innewohnenden Teilschwerpunkt dar [vgl. Kapitel 2.1], was sich im Rahmen der Untersuchung ebenfalls bestätigte.

Neben diesen klassischen Anwendungsbereichen aus den frühen Phasen des PEP zeichnen sich im Zusammenhang mit dem MBSE-Ansatz zunehmend weitergehende Fragestellungen aus späteren PEP-Phasen sowie dem PLM-Kontext ab. Beispiele hierfür sind das Varianten- und Konfigurationsmanagement, Nachhaltigkeitsbetrachtungen oder Controlling-Aspekte [vgl. Bild 1].

4 Fazit und Ausblick

Die in Kapitel 3 vorgestellte Übersicht verdeutlicht die Breite der Forschungstätigkeiten im Bereich der methodischen modellbasierten Systementwicklung. Anhand von ausgesuchten Beiträgen wurden Trends in der aktuellen MBSE-Forschung aufgezeigt. Dabei zeigte sich einerseits eine breite Betätigung im Bereich der Produktentwicklung, speziell in frühen PEP-Phasen, sowie eine signifikante Bestrebung nach Modellvalidierung und Evaluation von praktischen Anwendungsbeispielen. Darüber hinaus bestätigten sich die im MBSE-Ansatz adressierten Querschnittsthemenbereiche Prozessentwicklung und PLM-Implementierung als Forschungsschwerpunkte. Es konnten aber auch einige disruptive Forschungsansätze aufgezeigt werden, die einerseits Teilaspekte der frühen PEP-Phasen

abseits der eigentlichen Gestaltung adressieren (z.B. Fehleranalyse, Nachhaltigkeitsbetrachtung), andererseits auch themengebiete außerhalb der klassischen mechatronischen Produktentwicklung ansprechen (z.B. Dienstleistungsentwicklung, Industrie 4.0).

Aus Sicht der Autoren besteht in der zukünftigen MBSE-Forschung derzeit besonders der Bedarf einer praxistauglichen und anwendernahen Modellierung unterschiedlicher PEP-Varianten im Sinne eines praktikablen Handlungsleitfadens zur Gestaltung und Validierung von Systemen mittlerer Komplexität. Zum anderen wird eine einfache aber solide Strategie zur Umsetzung des MBSE-Ansatzes im industriellen Umfeld benötigt, die eine praktische Anwendung der Systemmodellierung forciert.

Am 1. Oktober der RWTH Aachen University werden diese Fragestellungen in der Forschungsgruppe „Virtuelle Produktentwicklung“ derzeit verstärkt adressiert und in enger Kooperation mit verschiedenen Industriepartnern bearbeitet.

Literaturverzeichnis

- [1] INCOSE: Systems Engineering Vision 2025. URL <http://www.incose.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf?sfvrsn=4> – Überprüfungsdatum 2017-05-19
- [2] EIGNER, Martin (Hrsg.); ROUBANOV, Daniil (Hrsg.); ZAFIROV, Radoslav (Hrsg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin : Springer Vieweg, 2014
- [3] EIGNER, Martin: Interdisziplinäre Produktentwicklung - Modellbasiertes Systems Engineering. SENDLER, Ulrich (Hrsg.). München : PLMportal, 2012
- [4] ANDERL, Reiner: Das W-Modell - Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme. SENDLER, Ulrich (Hrsg.). München : PLMportal, 2012
- [5] ALBERS, Albert et al: Model-Based Systems Engineering (MBSE) in der Karlsruher Schule : Fünf Jahre Forschung für die Anwendung. In: develop³ systems engineering (2016), S. 38–41
- [6] SCHULZE, Sven-Olaf (Hrsg.) et al: Tag des Systems Engineering, Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016. München : Hanser, 2017
- [7] SCHULZE, Sven-Olaf ; MUGGEO, Christian: Tag des Systems Engineering : Ulm, 11-13. November 2015, 2016
- [8] REYES PÉREZ, Mariana ; GAUSEMEIER, Jürgen: A specification technique for the conceptual design of manufacturing systems. @Paderborn, Univ., Diss., 2010
- [9] OMG: Systems Modeling Language : (OMG SysML 1.4). 2015
- [10] Papyrus: a modeling environment. URL <http://www.eclipse.org/papyrus/> – Überprüfungsdatum 2017-05-19
- [11] openETCS: Extended Tool Construction Set : integrated modeling, development, validation and testing framework for leveraging the cost-efficient and reliable implementation. URL <http://openetcs.org/> – Überprüfungsdatum 2017-05-19

- [12] UMLdesigner: graphical tooling to edit and visualize UML models. URL <http://www.umlDesigner.org/> – Überprüfungsdatum 2017-05-19
- [13] POLARSYS: Capella: a model-based engineering solution. URL <https://polarsys.org/capella/index.html> – Überprüfungsdatum 2017-05-19
- [14] ECKERT, C. et al: INTEGRATED PRODUCT AND PROCESS MODELS : TOWARDS AN INTEGRATED FRAMEWORK AND REVIEW. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 389–398
- [15] COSTA, D. G. et al: TOWARDS THE NEXT GENERATION OF DESIGN PROCESS MODELS : A GAP ANALYSIS OF EXISTING MODELS. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 441–450
- [16] EIGNER, M. ; DICKOPF, T. ; HUWIG, C.: AN INTERDISCIPLINARY MODEL-BASED DESIGN APPROACH FOR DEVELOPING CYBERTRONIC SYSTEMS. In: The Design Society (Hrsg.): DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. Glasgow : Design Society, 2016, S. 1647–1656
- [17] EIGNER, M. ; HUWIG, C. ; DICKOPF, T.: COST-BENEFIT ANALYSIS IN MODEL-BASED SYSTEMS ENGINEERING : STATE OF THE ART AND FUTURE POTENTIALS. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 227–236
- [18] ALBERS, A. ; MOESER, G.: Modellbasierte Prinzip- und Gestaltvariation. In: BRÖKEL, K.; FELD-HUSEN, J.; GROTE, K.-H.; RIEG, F.; STELZER, R.; KÖHLER, P.; MÜLLER, N.; SCHARR, G. (Hrsg.): Tagungsband Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik : Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion. Rostock, 2016 (14), S. 96–104
- [19] BURSAC, N. ; ALBERS, A. ; SCHMITT, T.: Model Based Systems Engineering in Modular Design : A Potential Analysis using Portal Type Scraper Reclaimers as an Example. In: Procedia CIRP (Hrsg.): 26th CIRP Design Conference. Amsterdam : Elsevier, 2016
- [20] ANDRAE, RENßE, KÖHLER, PETER: Wissensbasierte Unterstützung des Konstrukteurs an der Schnittstelle CAD-CAE. In: SCHARR, G. (Hrsg.) et al: Tagungsband Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik : Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion. Rostock, 2016 (14), S. 59–68
- [21] BUCHERT, T. et al: Model-based sustainable product development. In: The Design Society (Hrsg.): DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. Glasgow : Design Society, 2016, S. 145–154
- [22] ECKL, C. et al: A COMPARATIVE VIEW TO MODEL-BASED SYSTEMS ENGINEERING TECHNIQUE IN SPACE AND AUTOMOTIVE DEVELOPMENT. In: HORVÁTH, I.; PERNOT, J.-P.; RUSÁK, Z. (Hrsg.): Proceedings of TMCE 2016, 2016, S. 105–116
- [23] GLAUCHE, M. ; DIETRICH, U.: Modellbasiertes Systems Engineering - methodische Unterstützung durch PLM. In: SCHARR, G. (Hrsg.) et al: Tagungsband Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik : Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion. Rostock, 2016 (14), S. 128–136
- [24] GRUNDEL, M. ; ABULAWI, J.: SkiPo - Ein skizzen- und portbasiertes Modell für die Entwicklung von mechanischen Systemen. In: STELZER, Ralph (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2016 - Beiträ-

ge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik : Dresden, 30. Juni - 1. Juli 2016. Dresden : TUDpress, 2016, S. 223–238

- [25] HOLLAUER, C. ; VENKATARAMAN, S. ; OMER, M.: A MODEL TO DESCRIBE USE PHASE OF SOCIO-TECHNICAL SPHERE OF PRODUCT-SERVICE SYSTEMS. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 271–280
- [26] HOOSHMAND, Y. ; HÖNER, M. ; DANJOU, S. ; KÖHLER, P.: Ein integriertes Gesamtsystemmodell für die modellbasierte Entwicklung. In: KRAUSE, D.; PAETZOLD, K.; WARTZACK, S. (Hrsg.): Design for X : Beiträge zum 27. DfX-Symposium. Hamburg : Tutech Verlag, 2016, S. 243–254
- [27] ISAKSSON, O. ; BERTONI, M. ; HALLSTEDT, S. ; LAVESSON, N.: MODEL BASED DECISION SUPPORT FOR VALUE AND SUSTAINABILITY IN PRODUCT DEVELOPMENT. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 21–30
- [28] KÖßLER, J. ; PAETZOLD, K.: SUPPORT OF THE SYSTEM INTEGRATION WITH AUTOMATICALLY GENERATED BEHAVIOUR MODELS. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 21–30
- [29] KÖßLER, J. ; PAETZOLD, K.: Organisatorische Unterstützung der Produktentwicklung mit SysML-Modellen. In: STELZER, Ralph (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2016 - Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik : Dresden, 30. Juni - 1. Juli 2016. Dresden : TUDpress, 2016, S. 199–211
- [30] KRUSE, B. ; SHEA, K.: Design Library Solution Patterns in SysML for Concept Design and Simulation. In: Procedia CIRP (Hrsg.): 26th CIRP Design Conference. Amsterdam : Elsevier, 2016
- [31] MAUSER, K. ; BREITSPRECHER, T. ; HASSE, A. ; WARTZACK, S.: TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGE OF GEOMETRY IN SYSTEM SIMULATION PROCESSES. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 153–162
- [32] PINQUIÉ, R. ; MICOUIN, P. ; VÉRON, P. ; SEGONDS, F.: PROPERTY MODEL METHODOLOGY: A CASE STUDY WITH MODELICA. In: HORVÁTH, I.; PERNOT, J.-P.; RUSÁK, Z. (Hrsg.): Proceedings of TMCE 2016, 2016, S. 79–92
- [33] QIN, H. ; WANG, H. ; LIU, Y.: AN INTEGRATED RFBSE MODEL FOR MANAGING AND REUSING ENGINEERING DESIGN KNOWLEDGE. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 231–240
- [34] RAJABALINEJAD, M.: AN ARCHITECTURE MODEL FOR COMMUNICATION OF SAFETY IN PUBLIC TRANSPORTATION. In: HORVÁTH, I.; PERNOT, J.-P.; RUSÁK, Z. (Hrsg.): Proceedings of TMCE 2016, 2016, S. 257–264
- [35] RICHTER, C. et al: MODEL-BASED DEVELOPMENT AND VIRTUAL COMMISSIONING IN PRACTICE: A NOVEL APPROACH TO ESTABLISH INNOVATIVE DEVELOPMENT METHODS IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS. In: HORVÁTH, I.; PERNOT, J.-P.; RUSÁK, Z. (Hrsg.): Proceedings of TMCE 2016, 2016, S. 93–104
- [36] SHORT, A. R. ; VAN BOSSUYT, D. L.: REROUTING FAILURE FLOWS USING LOGIC BLOCKS IN FUNCTIONAL MODELS FOR IMPROVED SYSTEM ROBUSTNESS: FAILURE FLOW DECISION

- FUNCTIONS. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 31–40
- [37] TAHERA, K. ; ECKERT, C. ; EARL, C.: HIGHLIGHTING THE IMPORTANCE OF TESTING IN THE PRODUCT DEVELOPMENT PROCESS. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 21–30
- [38] TAVCAR, J. ; DUHOVNIK, J.: REFERENCE MODELS FOR CONCURRENT ENGINEERING IMPLEMENTATION ASSESSMENT IN INDIVIDUAL, SERIAL AND MASS PRODUCTION. In: HORVÁTH, I.; PERNOT, J.-P.; RUSÁK, Z. (Hrsg.): Proceedings of TMCE 2016, 2016, S. 623–636
- [39] TORRY-SMITH, J. M. et al: INDUSTRIAL APPLICATION OF A MECHATRONIC FRAMEWORK. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 247–258
- [40] WEBER, C. et al: Benutzer- und aufgabenorientiertes virtuelles Modell für die Produktentwicklung. In: STELZER, Ralph (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2016 - Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik : Dresden, 30. Juni - 1. Juli 2016. Dresden : TUDpress, 2016, S. 239–251
- [41] WESTERMANN, T. ; ANACKER, H. ; DUMITRESCU, R.: IMPROVING ORDER FULFILLMENT PROCESSES WITH MBSE. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow : Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,4), S. 237–246
- [42] YUSUF, Y. ; MA, Y.: DESIGN OF A SIMULATION TOOL FOR STEAM ASSISTED GRAVITY DRAINAGE: BASED ON THE CONCEPT OF UNIFIED FEATURE MODELING SCHEME. In: HORVÁTH, I.; PERNOT, J.-P.; RUSÁK, Z. (Hrsg.): Proceedings of TMCE 2016, 2016, S. 647–658

Wissen in Produktentwicklungsprozessen – ein Aktivitäten-basierter Analyseansatz

Wei Min Wang, Pascal Lünnemann*, Maurice Preidel, Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark*

Fachgebiet Industrielle Informationstechnik, Technische Universität Berlin

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Email: w.wang@tu-berlin.de; Internet: <http://iit.tu-berlin.de>

* Virtuelle Produktentstehung, Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik

Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Email: pascal.luenemann@ipk.fraunhofer.de; Internet: <https://ipk.fraunhofer.de>

Inhalt: *Durch die Anreicherung der klassischen, rein physischen Produkte um digitale Anteile und Services, verteilt sich die Produktentwicklung auf unterschiedliche Unternehmen und Branchen. Dadurch gewinnt neben der Vernetzung von Daten und Informationen insbesondere auch die Vernetzung des Wissens zunehmend an Bedeutung. In der industriellen Praxis beschränkt sich der Fokus häufig auf Prozesse, Daten und Informationen, während das Wissen, welches im Laufe eines Produktentwicklungsprozesses (PEP) entsteht, zirkuliert und reift nicht explizit betrachtet wird. In diesem Artikel wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem der PEP anhand der darin beteiligten Akteure, der von diesen ausgeführten Aktivitäten und den damit in Verbindung stehenden Artefakte analysiert wird. Aus den Ergebnissen des Experiments wird ein erstes „Funktionsmodell“ der Wissensdynamik im meilensteingetriebenen PEP abgeleitet, welches die Zusammenhänge zwischen den Akteuren, ihren Aufgabenstellungen, ihren Aktivitäten und den dabei involvierten Artefakten darstellt.*

Abstract: *Due to the increasing integration of digital components and services with classic, purely physical products oriented components, product development becomes commonly spread over different companies and industries. Hence, not only the cross-linking of data and information but also the networking of knowledge is gaining in importance. In industrial practice, the focus is often on processes, data and information, while the knowledge is generated implicitly during the product development process (PDP), hence its circulation and maturing is not explicitly considered. This paper presents an approach in which the PDP is analyzed by the actors involved, the activities carried out by those, and the related artifacts. From the results of the experiment a first "function model" of the milestone-driven PDP is derived, which depicts the connections between the actors, their tasks, their activities and the artifacts involved.*

Stichwörter: *Wissen in Produktentstehungsprozessen, Entwicklungsaktivitäten, Wissensanalyse*

Keywords: *Knowledge in Product Development Processes, Engineering Activities, Knowledge Analysis*

1 Einleitung

Durch zunehmende Anreicherung klassischer, rein physischer Produkte um digitale Anteile und Services, erfordert die Entwicklung moderner Produkte die Zusammenarbeit von Akteuren aus unterschiedlichsten Disziplinen [3]. In diesem Zusammenhang können Produktentwicklungsprozesse (PEP) als Problemlösungsprozesse betrachtet werden, bei denen zunächst ein komplexes Problem in Teilprobleme zerlegt wird, welche anschließend auf spezialisierte Akteure verteilt, durch diese gelöst und wieder zu einer Gesamtlösung verknüpft werden [7]. Zur Steuerung derartig verteilter PEPs haben sich in der industriellen Praxis meilensteingetriebene Prozesse etabliert. Im Laufe des PEPs stimmen sich die beteiligten Akteure in der Regel anhand definierter Arbeitsprozesse und zu bestimmten Zeitpunkten untereinander ab, erarbeiten individuell und in der Gruppe iterativ Lösungsoptionen und gleichen diese mit einem geplanten Zielzustand ab, bis sie aus ihrer Sicht diesen erreicht haben. Dabei manifestieren sich Zwischenstände des Produktes anhand digitaler und technischer Artefakte (z.B. CAD-Modelle, Prototypen), die sich inkrementell weiterentwickeln. Durch die Integration aller finalen Teillösungen entsteht schließlich das geplante Produkt als Gesamtlösung [13]. Die Erschaffung dieser Artefakte und deren Integration zu Teil- und Gesamtlösung erfordert ein Zusammenspiel verschiedener Akteure, die Träger von unterschiedlichen Wissensarten sind. Somit gewinnt neben der Vernetzung von Daten und Informationen insbesondere auch die Vernetzung des Wissens zunehmend an Bedeutung. In der industriellen Praxis wird jedoch häufig der Fokus auf die Datendurchgängigkeit gelegt, während das Wissen, das im Laufe des PEPs entsteht, zirkuliert und reift nicht explizit betrachtet wird. Individuelles und organisatorisches Wissen wird zwar intensiv genutzt, doch findet deren Anwendung häufig nur implizit statt. Sichtbar sind nur die explizierbaren Ergebnisse der wissensverarbeitenden Prozesse sowie externalisierbare Wissensbestandteile, welche zu diesen Ergebnissen geführt haben. Das implizit angewandte Wissen (Erfahrungen, Kompetenzen etc.), welches einen wesentlich Einfluss auf das Ergebnis und dessen Weiterverwendung haben kann, bleibt hingegen verborgen [8]. Dadurch kommt es gerade an Schnittstellen zwischen disziplinär sehr unterschiedlichen Akteuren (z.B. Mechanik und Software) zu Missverständnissen und Informationsverlusten, weil die kognitive Transferleistung zur Überwindung der disziplinären Sichtweise auf das gemeinsame Problem sehr hoch ist [10]. Daraus können wiederum Fehlentscheidungen in Meilensteinsituationen resultieren, die zu Projektverzögerungen und nachträglichen Korrekturkosten führen. Ein wesentliches Problem im Umgang mit Wissen liegt darin, dass die

Erfassung der Wissensarten, die in die wissensverarbeitenden Prozesse der Wissensträger einfließen, nur bedingt möglich ist, da sich dazugehörigen Selektions- und Integrationsprozesse in den Köpfen von Individuen abspielen [4]. Es fehlt daher ein klares Bild darüber, welche Wissensträger mit welchem Wissen an entscheidenden Meilensteinen des PEPs beitragen, um einen gewünschten Fortschritt bei der Entwicklung des Produktes zu erreichen.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Analyse der Wissensdynamik in meilensteingetriebenen PEPs vorgestellt. Das Ziel ist es die Entstehung, Veränderung und Diffusion von Wissen sichtbar zu machen, in dem das Zusammenspiel der im Prozess beteiligten Akteure mit den von ihnen ausgeführten Aktivitäten und der dabei involvierten Artefakte tiefergehend analysiert wird. Durch die Einbettung des Ansatzes in ein ganzheitliches Modell zur Beschreibung des Entwicklungsumfeldes, dem sogenannten Engineering Operating System (EOS), können ferner Wechselwirkungen und Zusammenhänge zu den unternehmensspezifischen Gegebenheiten hinsichtlich „Prozesse und Organisation“, „Informations- und Datenmodelle“ und „Werkzeuge und IT-Systemen“ hergestellt werden. Den Kern des Ansatzes stellt ein Funktionsmodell des meilensteingetriebenen PEPs dar, welches die Zusammenhänge zwischen den Akteuren, ihren Aufgabenstellungen, ihren Aktivitäten und den dabei involvierten Artefakten darstellt. Auf Basis des Funktionsmodells wird es möglich sein im PEP eingebrachtes und entstehendes Wissen sowie deren Veränderungen und Diffusion zu erfassen. Bei der Entwicklung des Modells wurden Ergebnisse aus einem Experiment mit Studierenden-Gruppen verwendet, welche jeweils die Entwicklung eines Produkt-Service System (PSS) durchgeführt haben.

2 Wissen in Produktentwicklungsprozessen

Der Wissensbegriff ist nicht einheitlich definiert und wird je nach Disziplin unterschiedlich interpretiert [2]. In der Erkenntnistheorie gilt Wissen als „wahre, gerechtfertigte Überzeugung“ [5]. Diesem streng kategorischen Verständnis stehen wiederum eher anwendungsorientierte Definitionen gegenüber, wie z.B. die VDI5610, in dem Wissen definiert wird als „vernetzte Information, die in die Lage versetzt, Vergleiche anzustellen, Verknüpfungen herzustellen und Entscheidungen zu treffen“ [14]. Bei näherer Betrachtung der unterschiedlichen Definitionen ist jedoch zu erkennen, dass Wissen einheitlich als ein Konstrukt beschrieben wird, dessen Entstehung und Verarbeitung sehr eng in Zusammenhang mit der Verarbeitung von Daten und Informationen mit einem Individuum [6], einer Person [15]

bzw. einem Bewusstsein [1] betrachtet werden muss. Im vorliegenden Beitrag wird Wissen daher als das Ergebnis verstanden, welches aus der Reflektion einer Information mittels eines Individuums hervorgeht. Dabei kann das Individuum auf interne (z.B. Erfahrung, Werte) sowie externe Wissensbestände (z.B. Normen, Richtlinien) zurückgreifen, die jeweils das Ergebnis beeinflussen können. Die Diffusion und Verbreitung von Wissen über das Individuum hinaus erfolgt anschließend über soziale Prozesse zwischen Individuen und Gruppen [9]. Welche Wissensarten im PEP zum Einsatz kommen ist ebenfalls nicht einheitlich zu benennen. Auch hierfür existieren unterschiedliche Kategorisierungsansätze je nach Verwendungszusammenhang. Nachfolgend seien daher nur einige gängige Beispiele genannt für den Bereich der Produktentwicklung. Die VDI5610 unterscheidet z.B. grundsätzlich nur zwischen implizitem Wissen, das personengebunden, schwer kommunizierbar und externalisierbar ist und explizitem Wissen, das externalisierbar und somit kommunizierbar und speicherbar ist [14]. Innerhalb des Kontinuums zwischen diesen beiden Wissensarten können weitere Kategorisierungsansätze verortet werden, wie z.B. das HANSE-Modell (Heuristiken, Artefakte, Natürliche Begabung, Skills, Erfahrung) [11, 14]. Hinsichtlich der informationstechnischen Unterstützung von Konstruktionstätigkeiten unterscheiden Stark und Weber zwischen Faktenwissen, Objektwissen und Problemlösungswissen [12]. Um die Entstehung, Diffusion und Entwicklung von Wissen in PEPs zu erfassen und zu verstehen, müssen daher individuelle Aspekte (z.B. Fachlicher Hintergrund, Rolle) und soziale Ebenen (z.B. Individuum, Gruppe, Organisation) berücksichtigt werden. Relevante Wissensarten müssen je nach Betrachtungsfall identifiziert und kategorisiert werden.

3 Das „Funktionsmodell“ der Produktentwicklung

Entsprechend der Interpretation des PEP als Problemlösungsprozess, bedarf es zunächst einer Problemstellung, deren Aufteilung in Teilprobleme und einer Zuteilung zu einem Individuum. Das Individuum bearbeitet das Teilproblem durch die Ausführung einer bestimmten Aktivität unter Verwendung seines Wissens und der Zuhilfenahme weiterer verfügbarer Hilfsmittel (Daten, Informationen, Werkzeuge etc.). Durch iterative Abstimmungsprozesse auf individueller Ebene und Gruppenebene setzen sich entstehende Teillösungen kontinuierlich zusammen und erfüllen somit nach und nach die Problemstellung [7]. Entsprechend dieses Verständnisses und in Anlehnung an die VDI2221 lässt sich ein vereinfachtes Modell der funktionalen Bestandteile und der dazugehörige Beziehungen im

PEP ableiten (Bild 1). Dieses Modell wird hierbei in Anlehnung an die Darstellungsform einer Funktionsstruktur als „Funktionsmodell“ der Produktentwicklung bezeichnet.

3.1 Teilmodelle

Das Funktionsmodell lässt sich in drei Teilmodelle unterteilen, die jeweils einen Aspekt des Problemlösungsprozesses beschreiben (Bild 1). Der PEP, als eingebetteter Geschäftsprozess in einer Organisation, mit seinen Phasen und Meilensteinen stellen das „Auslösermodell“ dar. Es beschreibt, wie der Entwicklungsauftrag als initiiierendes Ereignis aus der organisatorischen Tätigkeit heraus den Problemlösungsprozess anstößt. Die Ableitung der Aufgaben aus den Meilensteinzielen der jeweiligen PEP Phase stellen den Ausgangspunkt für die konkrete Aufgabenbearbeitung dar. Das „Individualmodell“ beschreibt die konkrete Aufgabenbearbeitung durch einen spezifischen Akteur. Es erstreckt sich von der Annahme der Aufgaben aus dem Auslösermodell, über deren Bearbeitung, den dabei ausgeführten Aktivitäten, der involvierten Artefakte bis hin zu den Arbeitsergebnissen, deren Integration zur Aufgabenerfüllung beitragen. Durch die Betrachtung des einzelnen Akteurs stellt es zugleich das zentrale Modell zur Analyse des Wissens in PEP dar. Das „Sozialmodell“ ist eine Überlagerung mehrerer Individualmodell und beschreibt, wie durch deren Interaktion Arbeitsergebnisse ausgetauscht und integriert werden, um Aufgaben, Meilensteine und PEP Phasen abzuschließen. Ähnlich wie beim SECI-Modell der organisatorischen Wissensgenerierung [9], wird hierbei die Generierung der Arbeitsergebnisse als ein Prozess gesehen, bei dem Individuen ihre Teilergebnisse zunächst externalisieren und einer Gruppe zur Verfügung stellen. Über soziale Prozesse (z.B. Kommunikation, Entscheidungsfindung etc.) diffundieren die Teilergebnisse in der Gruppe und werden ganz oder teilweise zu einer gemeinsamen Lösung integriert. Als Input aus den Gruppenaktivitäten können u.a. Änderungsaufträge oder fremde Ergebnisse resultieren, die wiederum als Aufgabe in das Individualmodell einfließen bzw. internalisiert werden. Diese Prozesse laufen solange ab, bis die integrierten Teilergebnisse die Meilensteinaufgaben erfüllen und eine neue PEP Phase betreten werden kann.

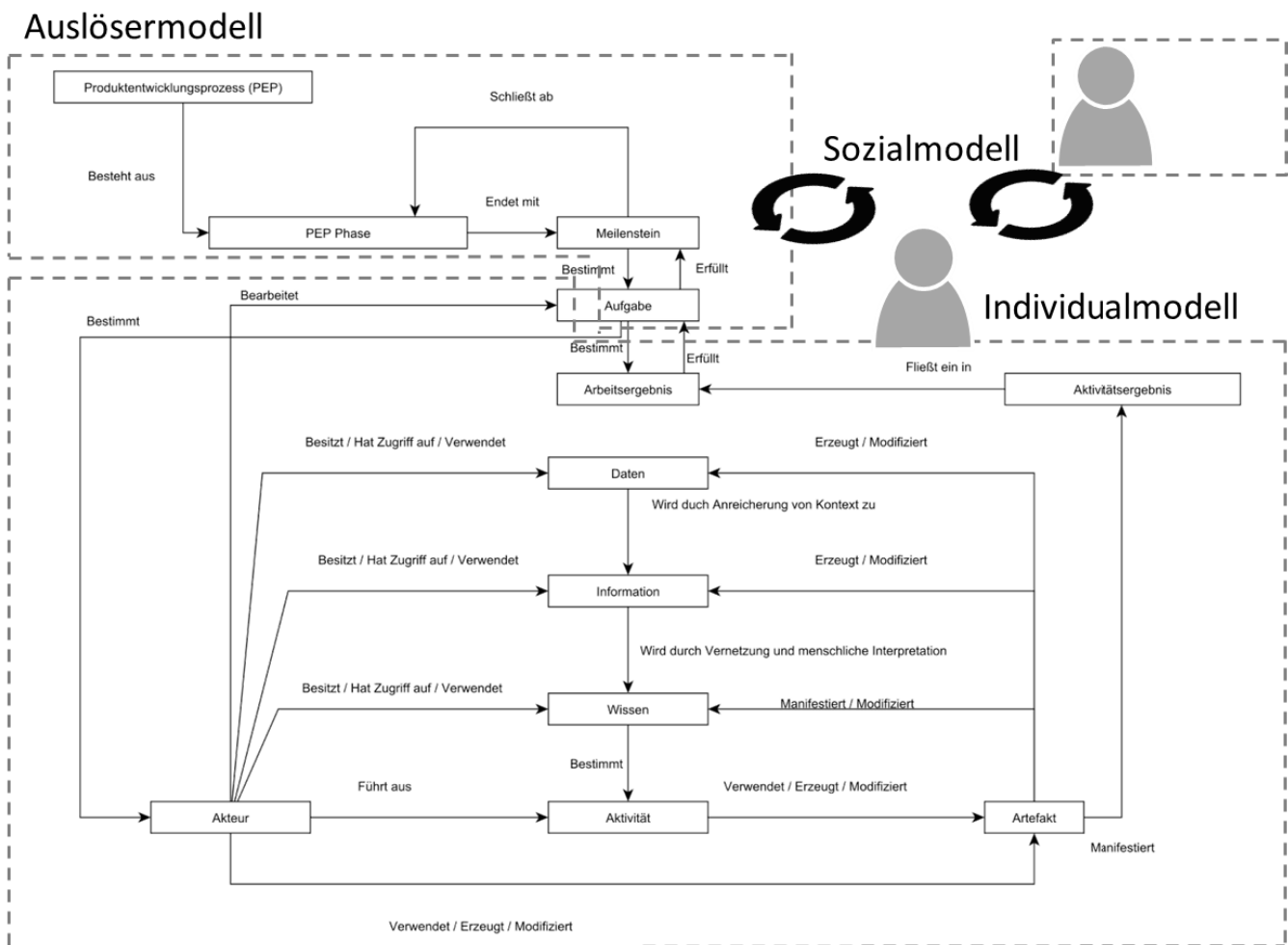


Bild 1: „Funktionsmodell“ der Produktentwicklung und ihre Teilmodelle

3.2 Wissensanalyse anhand von Akteuren, Aktivitäten, Artefakten

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt, stellt das Individualmodell durch seine Betrachtung des Zusammenspiels von Akteuren, Aktivitäten und Artefakten das zentrale Modell für den hier angestrebten aktivitätenbasierten Ansatz der Wissensanalyse dar. Hierzu wird angenommen, dass durch hinreichende Kenntnis des Akteurs (fachlicher Hintergrund, Erfahrungsschatz, Ausbildung etc.), sowie die Anforderungen der ihm zugeteilten Aufgabe und den von ihm verwendeten und erzeugten Artefakten, es möglich ist auf Teile des Wissens zu schließen, das der Akteur bei der Ausführung seiner Aktivität zur Bewältigung seiner Aufgabe verwendet hat. Für eine erste Erprobung dieses Ansatzes wurden Entwicklungsprojekte von Studierendengruppen begleitet, bei denen jeweils ein Produkt-Service System rund um einen Einachstraktor entwickelt werden sollte. In jeder Gruppe wurden die Teilnehmer in unterschiedliche Rollen mit entsprechenden Aufgaben eingeteilt, um ein reales Entwicklungsteam zu simulieren. Während des Entwicklungsprozesses wurden die Stu-

dentem zu drei Zeitpunkten, jeweils im Anflug auf einen Meilenstein, interviewt. Zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse wurde eine Matrixdarstellung entwickelt, die sogenannte A-A-A Matrix, in der die Akteure, Aktivitäten und Artefakte simultan erfasst und deren Wirkzusammenhang (erzeugen, modifizieren, verwenden, beeinflussen) dargestellt werden können (Bild 2).

Akteur	Projektmanager Aktivitäten					Produktmanager Aktivitäten					NH-Experte Aktivitäten	Entwickler ID 4 Aktivitäten																
<u>Legende:</u> e=erzeugen m=modifizieren v=verwenden b=beeinflussen	Projektplanung	Meetings Organisieren	Kostenschätzung	Business Canvas erstellen	Marktrecherche	An Meetings teilnehmen	Anwendersicht recherchieren	Aufgaben in Koordinationstool einpflegen	PSS Konzept dokumentieren	Einachstraktor Modelle Recherchieren	Ergebnisse Dokumentieren	Deliverables für DR 1 zusammenfassen	An Meetings teilnehmen	Anforderungsliste erstellen	An Meetings teilnehmen	Auswahlliste erstellen	10 Golden Rules einarbeiten	Kundenbedürfnisse recherchieren: Winterdienst	An Meetings teilnehmen	Protokoll überarbeiten	Marktanalyse zu Konzept 1 und 2	Auswahlliste erstellt und für Konzept 2 ausgefüllt	Erstellung einer Vergleichstabelle der Agria Einachser	Überarbeitung Anforderungsliste	Überarbeitung des Berichtes	Zusammenfassung meiner Wochenergebnisse KW4/5 für das Treffen		
Artefakte																												
Projektplan	e	m						v																				
Projektdokumentation / Abschlussbericht	e		m		n		e	v	m	m	e	m		m											m			
Meeting-Protokolle						b		v		m		e		m						m	v							
Business Canvas				e																								
Präsentation zu Rechercheergebnissen				e			e		e	e							e				e				e			
Anforderungsliste													e					e						m				
Präsentation DR1																												
Arbeitspläne auf Trello	b							e																				
Aufgabenstellung: gesamt	v				b						b		v				v				b							
Aufgabenstellung: DR1	v											b									b							
Aufgabenstellung: DR2	v																											
Aufgabenstellung: DR3	v																											
Infomaterial: 10 Golden Rules																												
Infomaterial: PSS									v																			
Infomaterial: Nachhaltigkeit																												
Auswahlliste für PSS Konzepte																e						e				b		
Vergleichstabelle: Agria Modelle																							e			b		

Bild 2 : Auszug - Erfassung der Entwicklungsaktivitäten im Studentenexperiment mittels der A-A-A Matrix

Diese Darstellungsform ermöglicht es zum einen explizite Wissensbestandteile direkt zu identifizieren. So ist z.B. zu erkennen, dass der Projektmanager, das „Marktwissen“, welches er durch die Aktivität „Marktrecherche“ erworben hat im Artefakt „Präsentation zu Rechercheergebnissen“ manifestiert hat. Zum anderen können daraus implizite Rückschlüsse auf Wissen gezogen werden. So weist die Verwendung der Artefakte „Infomaterial zu Nachhaltigkeit“ und „Infomaterial zu 10 Golden Rules“ durch den Akteur „NH-Experte“ im Zuge der Aktivität „in 10 Golden Rules einarbeiten“ darauf hin, dass dieses Wissen gefehlt hat und externes Wissen akquiriert werden musste. Daher birgt diese Art der Darstellung ein hohes Potenzial zur direkten und indirekten Identifikation von Wissen im Entwicklungsprozess. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass keine ausschließenden Rückschlüsse aus der A-A-A Matrix gezogen werden können. Nur weil der Projektmana-

ger den Projektplan erstellt hat, ohne zuvor Informationsmaterialien konsultiert zu haben, heißt es nicht automatisch, dass er über das notwendige Wissen verfügt hat. Um derartige Rückschlüsse ziehen zu können, müssen weitere Informationen erhoben und hinzugezogen werden, wie z.B. der fachliche Hintergrund, bisherige Berufserfahrung etc..

3.3 Zusammenwirken im Produktentstehungsprozess

Die Wechselwirkungen mit dem Produktentstehungsprozess beschreibend wurde das Funktionsmodell in einer Mengenanalytik dem „Betriebssystem der Entwicklung“ (Engl.: Engineering Operating System (EOS)) gegenübergestellt. Ziel ist es dabei, die Wissensdynamik auf die Gestalt des Umfeldes des entwickelnden Ingenieurs rückzuführen. In Folge entsteht eine Analysierbarkeit und langfristig eine optimierte Planbarkeit der Wissensverarbeitenden Vorgänge der Entwicklung. Das EOS basiert auf den drei Grundmengen: „Prozesse und Organisation“, „Informations- und Datenmodelle“ und „Werkzeuge und IT-Systemen“. Diese drei Grundmengen beschreiben für sich und in ihren Wechselwirkungen die Entwicklungsumgebung der Beteiligten. Auf Basis dieser erfolgen die Entwicklungsaktivitäten, welche in ihrer Gesamtheit die Produktentwicklung darstellen. Im Abgleich mit dem Funktionsmodell lassen sich Überschneidungen mit dem Beschreibungsmodell identifizieren. Alle Grundmengen sind im Funktionsmodell enthalten. Prozesse als die Aufgabenstellenden Elemente, Werkzeuge zur Manipulation und Erschaffung der Artefakte und die Artefakte selbst in Form verwendeter, erzeugter oder manipulierter Informationen und Daten. Die Wissensanwendung erfolgt im Rahmen der, auch im EOS, zentralen Aktivitäten. Im Rückschluss beeinflusst die Gestaltung des Entwicklungsumfelds die Wissensverarbeitung der Akteure und folglich auch das Produkt.

Das Funktionsmodell detailliert das EOS um die Beschreibung des in individuellen Aktivitäten verwendeten Wissens. Deutlich wird dabei, dass mit dem EOS lediglich explizite Artefakte und mit diesen verbundenes Wissens abgebildet und somit (ein-)geplant werden kann. Nicht explizites Wissen, welches durch die Akteure in die Entwicklung eingebracht wird, ist auf Basis der A-A-A-Matrix zwar in Grenzen ermittelbar, jedoch nicht eindeutig vorhersagbar. Gleichzeitig vernachlässigt das EOS die Abbildung der vermittelten Information durch direkte Kommunikation (in Gesprächen und Besprechungen), da diese nicht Artefakt-gebunden und somit in keiner Menge abgebildet werden. Das EOS sollte entsprechend angepasst werden um alle expliziten Einflussfaktoren berücksichtigen zu können.

4 Diskussion

Beide Modelle, das Funktionsmodell und das EOS, stellen mit unterschiedlichen Zielstellungen, Möglichkeiten dar, die Produktentwicklung zu beschreiben. Das Funktionsmodell fokussiert dabei die Analyse und Abbildung der Wissensdynamik in der Produktentwicklung. Das EOS fokussiert das Entwicklungsumfeld und die darin erfolgenden, wertschöpfenden Aktivitäten. In Kombination der Modelle sollte es möglich sein, die Wechselwirkungen des Entwicklungsumfelds auf die Wissensdynamik der Produktentwicklung darzustellen. In der Verwendung der Modelle zur Planung und Gestaltung eines Entwicklungsumfeldes und einer darin erfolgenden Produktentwicklung wird deutlich, dass eine kritische Einflussgröße nicht steuerbar ist. Das den beteiligten Individuen implizite Wissen kann, wie gezeigt, durch die A-A-A-Matrix zwar in Teilen ermittelt werden, jedoch nicht mit Sicherheit vorherbestimmt werden. Durch die Gestaltung eines Arbeitsumfeldes, welches dynamisch auf die Erwartungshaltung der Individuen reagiert, die notwendigen Artefakte in den richtigen Momenten bereithält wird jedoch die Wahrscheinlichkeit gesteigert, dass das notwendige Wissen verfügbar ist und Entscheidungen auf Basis einer guten Informationsversorgung getroffen werden können.

5 Fazit und Ausblick

Der Analyseansatz mittels des Funktionsmodells kann in der jetzigen Form nur explizite Wissensbestandteile bzw. Indizien auf implizite Wissensbestandteile aufzeigen. Durch die Einbindung weiterer Untersuchungsergebnisse, wie z.B. aus Tiefeninterviews mit beteiligten Akteuren und Auswertung von IT-Nutzungsprofilen, können Indizien weiter erhärtet und weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Wissens gewonnen werden. Das Funktionsmodell bedarf daher einer Erweiterung um kognitive Modelle der Wissensverarbeitung für eine bessere Berücksichtigung der individuellen Einflussfaktoren auf die Wissensdynamik in PEPs. Dadurch können Möglichkeiten abgeleitet werden, um z.B. lernende IT-Systeme zu entwickeln, welche durch die kontinuierlich Analyse der Aktivitäten im Zusammenhang mit seinem Benutzer und der mit ihm interagierenden Artefakte, in der Lage sind die Wissenswartungen zu adaptieren und zu prognostizieren. Damit wird es wiederum möglich kritisches und fehlendes Wissen zu identifizieren und dem Entwickler proaktiv bereitzustellen.

Literatur

- [1] Albrecht, F. 1993. Strategisches Management der Unternehmensressource Wissen. Inhaltliche Ansatzpunkte und Überlegungen zu einem konzeptionellen Gestaltungsrahmen. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1992. Europäische Hochschulschriften Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft 1367. Lang, Frankfurt am Main, Berlin.
- [2] Bischoff, I. M. 2013. Umweltbildung in der Grundschule: Eine Perspektivenerweiterung.
- [3] Cooper, L. P. 2003. A research agenda to reduce risk in new product development through knowledge management. A practitioner perspective. *Journal of Engineering and Technology Management* 20, 1-2, 117–140.
- [4] Davenport, T. H., Prusak, L., and Höhlein, H. 1999. Wenn Ihr Unternehmen wüßte, was es alles weiß. Das Praxishandbuch zum Wissensmanagement. Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech.
- [5] Kutschera, F. v. 1982. Grundfragen der Erkenntnistheorie. De Gruyter Studienbuch.
- [6] Luggner, K.-M. and Kraus, H. 2001. Mastering the human barriers in knowledge management. *Journal of Universal Computer Science* 7, 6, 488–497.
- [7] Neumann, F., Ed. 2015. Analyzing and Modeling Interdisciplinary Product Development. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [8] Nonaka, I. and Takeuchi, H. 2012. Die Organisation des Wissens. Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen. Management. Campus-Verl., Frankfurt am Main u.a.
- [9] Nonaka, I., Toyama, R., and Konno, N. 2005. SECI, ba and leadership: a unified model of dynamic knowledge creation. *Managing knowledge : an essential reader*, 23–49.
- [10] Pennington, D. 2016. A conceptual model for knowledge integration in interdisciplinary teams. Orchestrating individual learning and group processes. *J Environ Stud Sci* 6, 2, 300–312.
- [11] Snowden, D. 2000. Organic knowledge management: Part I The ASHEN model: An enabler of action. *Knowledge Management* 3, 7, 14–17.
- [12] Stark, R. and Weber, C. 1991. Wissensbasierte Systeme für ide Konstruktion - Grundlage aus konstruktionsmethodischer Sicht. In WDK - Workshop Design-Konstruktion. Proceedings zur International Conference on Engineering Design (ICED'91) 2. Heurista, Zürich, 1151–1162.
- [13] Ullman, D. G. 2010. The mechanical design process. McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill, Boston.
- [14] VDI. 2008. Wissensmanagement im Engineering - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Beuth Verlag, Berlin, 5610.
- [15] Wiater, W. 2007. Wissensmanagement. Eine Einführung für Pädagogen. VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.

Optimierung generativer Fertigungsverfahren durch konstruktives Teilen und Fügen von Bauteilen

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: *Durch die immer mehr in den Focus der Ingenieure rückenden modernen generativen Fertigungsverfahren, sind Möglichkeiten geboten, die auch neue Herangehensweisen in der Produktentwicklung erfordern. Zwar gibt es durch die werkzeuglose Fertigung eine schnelle und individualisierte Produktentwicklung, aber die Wirtschaftlichkeit ist oft noch verbesserungswürdig. Deshalb müssen die Potentiale der generativen Fertigung besser ausgenutzt werden. So ist es nicht zielführend bestehende Bauteile einfach nachzubauen. Die Bauteile müssen schon in der frühen Phase der Produktentwicklung auf die speziellen Stärken und die auch vorhandenen Schwächen einer generativen Fertigung angepasst werden. Deshalb ist es besonders bei kunststoffverarbeitenden Verfahren nötig, den Schichtverlauf der Belastung anzupassen, Stützen zu vermeiden und die Bearbeitungszeit zu minimieren.*

Als Lösung wird eine Methode vorgestellt, bei der durch geschicktes Teilen von Bauteilen die Stärken generativer Fertigungsverfahren besonders hervor treten. Das anschließende Fügen der Substrukturen und die konstruktive Sicherung der Position zueinander soll im Folgenden auch beleuchtet werden.

Abstract: *The modern generative manufacturing methods, which are in the focus of the engineers, offer opportunities and require new approaches in product development. It is true that the tool-free production offers a fast and individualized product development, but the effectiveness is often still to be improved. Therefore, the potentials of generative production have to be exploited better. It is not easy to build existing components easily. The components must be adapted to the special strengths and the existing weaknesses of a generative production already in the early phase of the product development. Therefore, it is necessary to adjust the layering of the load, to avoid supports and to minimize the machining time, especially in the case of plastic processing methods.*

A method is presented as a solution in which the strengths of generative production processes are particularly pronounced by cleverly dividing components. The subsequent joining of the substructures and the structural securing of the position to one another is also to be illuminated in the following.

Stichwörter: generative Fertigung, Rapid Prototyping

Keywords: additive Manufacturing, Rapid Prototyping

1 Einleitung

Die generativen Fertigungsverfahren zeichnen sich durch kurze Produktentwicklungszeiten und große Freiheit in der Gestaltung von Formelementen besonders bei Freiformflächen und Innenkonturen aus. Diesen Vorteilen stehen aber immer noch Nachteile gegenüber, auch wenn diese durch die fortschreitende Weiterentwicklung der Technologien kleiner werden.

Prozessbedingt treten Schichten auf, die bei höher belasteten Bauteilen zum Versagen führen können. Die Bauteile sind durch hohe Material- und Maschinenkosten immer noch relativ teuer. Die Kosten können durch kürzere Bauzeiten und geringeren Materialverbrauch reduziert werden.

2 Ausrichtung

Als Beispiel wird ein Kleiderhaken gewählt, der aus einer Grundplatte, dem Haken und einem verstärkten Schaft besteht.

Nachdem das Bauteil im CAD erstellt wurde, wird eine stl-Datei abgeleitet, die an die Software der generativen Fertigungsanlage übergeben wird. In dieser Software ist die Bauplattform zu sehen und wie das Bauteil darin liegen wird.

Die Funktion zur automatischen Ausrichtung legte das Bauteil mit dem Haken und Schaft waagrecht zur Bauplattform (Bild 1/a). Dieser muss komplett unterstützt werden. Da die Grundplatte schräg ist, muss auch hier die Schräge der Grundplatte unterstützt werden. Dies verbraucht zusätzlich zum Modellmaterial Stützmaterial, wodurch die Kosten für das Bauteil steigen.

Unter der Voraussetzung, dass die Belastungen klein sind, wurden die Position und die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum verändert, um eine Verringerung des für zusätzliche Stützstrukturen verwendeten Materials zu erreichen.

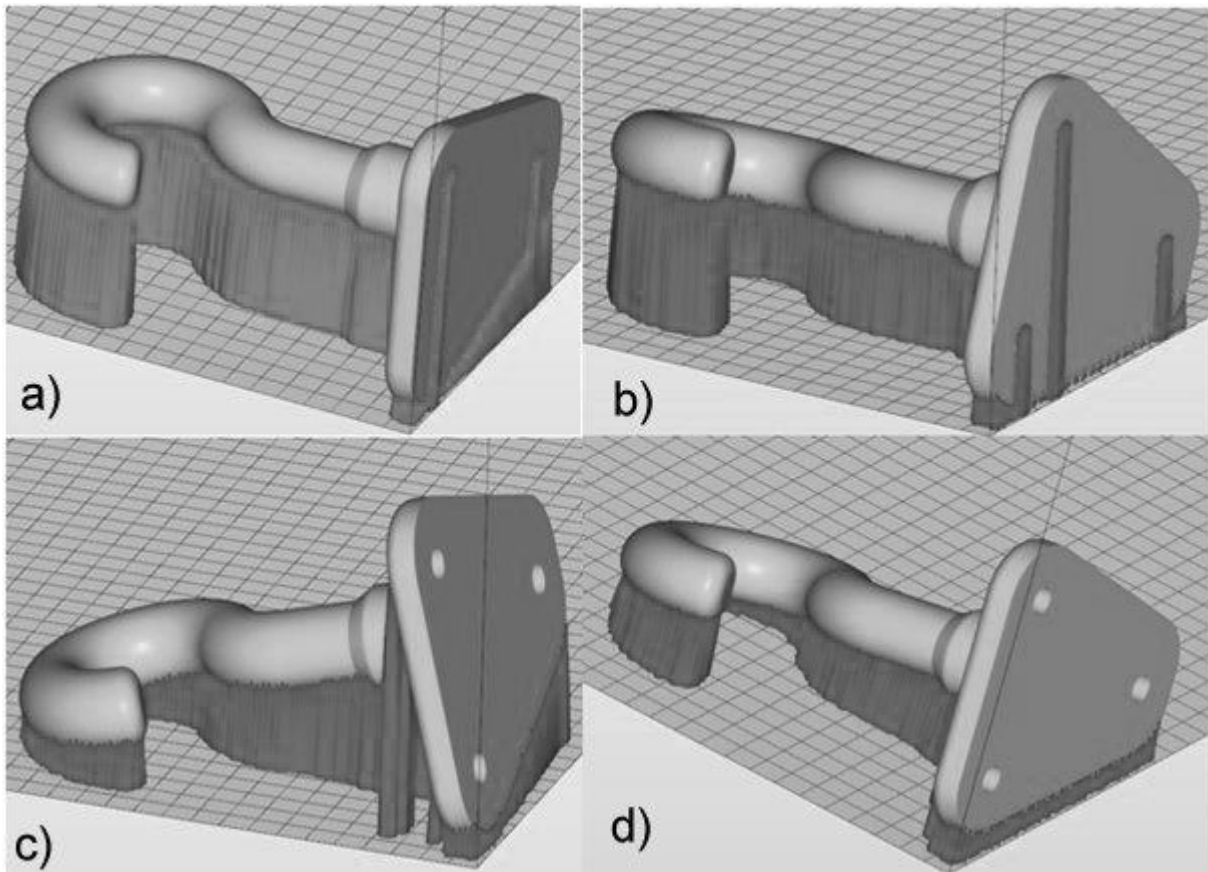


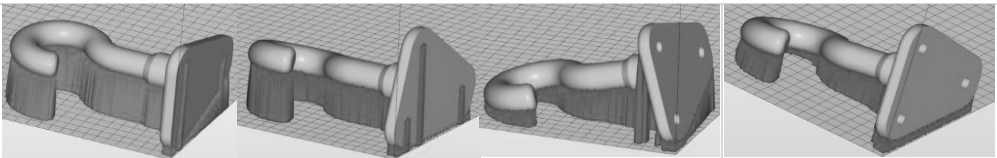
Bild 1: mögliche Ausrichtungen des Kleiderhakens im Bauraum

Dabei wurde das Bauteil um die Achse des Schafts gedreht, bis die Grundplatte parallel zur Bauplattform liegt (Bild 1/b). Nun musste an dieser Stelle nur noch das Stützmaterial verbaut werden, dass nötig ist, um das Bauteil von der Plattform zu lösen.

Im zweiten Versuch wurde das Bauteil auf den Haken gekippt, um die Stützen an der Stelle des Bauteils zu minimieren. Hierbei mussten aber Teilbereiche der Grundplatte unterstützt werden (obere Ecke der Grundplatte siehe Bild 1/c). Im letzten Schritt wurden beide Drehungen kombiniert, so dass das Bauteil auf der Seite der Grundplatte lag und der Haken den minimalen Abstand zur Bauplattform hatte (Bild 1/d).

Für alle vier möglichen Ausrichtungen wurde der Bau-Job virtuell gestartet, um Materialverbrauch und Bauzeit berechnen zu können.

Tabelle 1: Vergleich der Positionen im Bauraum

				
	KL_Haken_waagrecht	KL_auf_SF_liegend	KL_auf Haken_liegend	KL_auf_Haken+SF_liegend
Anzahl Slices (0,025mm)	2124	2071	2088	2140
Höhe total (mm)	53,1	51,77	52,2	53,5
Bearbeitungszeit	6h 43min	6h 33min	6h 37min	6h 46min
Volumen gesamt (cm ³)	115,55	68,96	58,09	48,99

Der Vergleich zeigt, dass die Bauzeit kaum verringert werden konnte, da diese hauptsächlich von der Anzahl der zu fertigenden Schichten abhängt. Der Unterschied beträgt nur 13 min bei einer Gesamtbauzeit von über 6,5 Stunden.

Aber das Stützmaterial konnte durch diese Veränderung drastisch reduziert werden. Das für den eigentlichen Kleiderhaken verwendete Modellmaterial hatte ein Volumen von 27,03 cm³ und kann nicht verringert werden.

Bei der automatischen Ausrichtung wurden insgesamt 115,55 cm³ Material verbaut. Das entspricht einem Materialeinsatz von 88cm³ für die Stützen.

Durch die Drehung auf die Seitenfläche, musste diese nicht mehr unterstützt werden und die Stützen für den Haken konnten kürzer ausgeführt werden. Das eingesetzte Material verringerte sich auf ca. 69 cm³. Davon wurden ca. 42cm³ für die Stützen gebraucht. Die Ersparnis ist 52% für Stützmaterial. Das Kippen auf den Haken reduzierte die Stützen auf ein Volumen von 31 cm³, was einer Reduzierung um 65% entspricht. Durch die Kombination beider Drehungen wurde beide Reduzierungen vereinigt und das Stützmaterial auf 22 cm³ verringert. Die Einsparung liegt damit bei 75% des Stützmaterials.

		
	Modellvolumen= 27,03 cm ³	
	KL_auf_Platte_stehend	
Anzahl Slices (0,025mm)	3368	
Höhe total (mm)	84,2	
Bearbeitungszeit	10 h 40min	
Volumen gesamt (cm ³)	79,62	

Bild 2: aufrecht stehender Kleiderhaken

Eine andere Ausrichtung im Bauraum hat sich als noch ungünstiger ergeben, da sowohl Bauzeit als auch Materialeinsatz deutlich anstiegen. Wird der Kleiderhaken einfach auf die Grundplatte gestellt und gefertigt, müssen relativ lange Stützen unter dem Bogen generiert werden und die verwendete Materialmenge steigt an (Bild 2). Durch die große Anzahl an Schichten bei dieser Ausrichtung in Z-Richtung erhöht sich auch die Bauzeit beträchtlich. Deshalb wurde bei den Untersuchungen nach anderen Wegen gesucht, die kostentreibenden Faktoren zu senken.

3 Teilen der Bauteile

Besonders beim Bauteil Kleiderhaken wird schnell klar, dass eine Teilung des Bauteils dazu führen kann, die Stützen zu minimieren. Außerdem können die dann zu fertigenden Teilstücke flach und dicht im Bauraum angeordnet werden, um die Anzahl der Schichten und damit die Bauzeit gering zu halten.

Dieses Teilen der Bauteile bedingt aber eine konstruktive Anpassung. Dazu wird im CAD-System das Bauteil gesplittet und zwei stl-Files an den Rechner der generativen Fertigungsanlage übergeben.

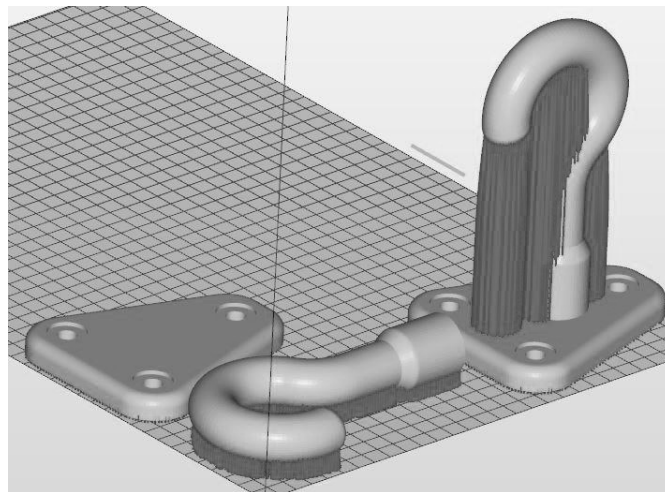


Bild 3: geteilter Haken

Wenn die Entscheidung, das Bauteil mittels generativer Fertigung herzustellen, getroffen wurde und das Bauteil nach den Anforderungen der Funktionserfüllung konstruiert wurde, sollte der Konstrukteur also über fertigungsgerechte Anpassungen nachdenken.

Im Bild 4 ist der als Beispiel dienenden Kleiderhaken zu sehen. Wenn dieser aufgeteilt werden soll, sind folgende Teilebilden denkbar.



Bild 4: Teilebenen am Kleiderhaken

Bei der Teilung in der Ebene 1, wird das Bauteil unter dem Bogen des Hakens geteilt. Dadurch verbleibt der Schaft mit Verstärkung an der Grundplatte. Der Vorteil ist, dass der verbleibende Teil keine Überhänge mehr aufweist und deshalb ohne Stützen gefertigt werden kann. (Die Stützen unter den Bauteilen, die zur Abtrennung der Bauteile von der Bauplattform dienen, werden im weiteren nicht betrachtet, da sie immer vorkommen und nur geringfügig beeinflusst werden können.)

Der abgeteilte Bogen kann nun flach auf die Bauplattform gelegt werden und benötigt nur geringfügig längere Stützen, dort wo der Kreis seitlich abgestützt werden muss.

Tabelle 2: Teilung Kleiderhaken

A	B	C	D
Modellvolumen 27,03 cm ³	Teilebene 1	Teilebene 2	Teilebene 3
Slices (0,025mm)	1514	834	674
Total High (mm)	37,85	20,85	16,85
Bauzeit	4h 48min	2h 38min	2h 8min
Total Volume (cm ³)	29,03	29,93	30, 12

Wird der Kleiderhaken in der Teilebene 2 (siehe Bild 4) geteilt, verbleibt der Schaft am Haken und nur die Verstärkung wird mit der Grundplatte gefertigt. Der Bogen mit Schaft ist damit etwas länger und die Unterstützung verbraucht mehr Material. Dieser Mehrver-

brauch ist aber sehr gering. Das gefertigte Gesamtvolumen steigt von $29,03 \text{ cm}^3$ auf $29,93 \text{ cm}^3$, also um $0,9 \text{ cm}^3$. Dafür verringert sich die Bauzeit von 4h 48min auf 2h 38 min. Dies ist auf die geringere Fertigungshöhe und damit der verminderten Anzahl zu generierender Schichten (von 1514 auf 834 Schichten) zurückzuführen. Damit geht die Bauzeit um 45 % zurück und der Materialverbrauch steigt nur um 3%. Dieser Effekt kann noch vergrößert werden, wenn die Teilungsebene noch weiter nach unten gelegt wird. Werden Haken (mit Schaft und Verstärkung) und Grundplatte komplett voneinander getrennt (Teilungsebene 3) kann der komplette Haken flach auf die Bauplattform gelegt werden. Damit ist die Grundplatte des Kleiderhakens sogar flacher als der Haken selbst und es müssen nur noch 674 Schichten gefertigt werden. In der Folge reduziert sich die Bauzeit auf 2h 8 min und der Materialverbrauch steigt nur um $0,19 \text{ cm}^3$ durch die vergrößerte zu unterstützende Fläche. Die Zeitersparnis im Vergleich zur Teilung in der Ebene 1 beträgt demnach 56%. Beim Aufteilen gibt es auch hier eine Möglichkeit, die nicht sofort ins Auge fällt, aber trotzdem betrachtet werden sollte. Die Alternative ist eine komplette Längsteilung des Bauteils (Bild 5) in zwei symmetrische Hälften. Die Hälften können auf die Teilungsebene gelegt werden und dann ohne Stützen für den Haken gefertigt werden. Nur in den Löchern muss etwas Stützmaterial verbaut werden.

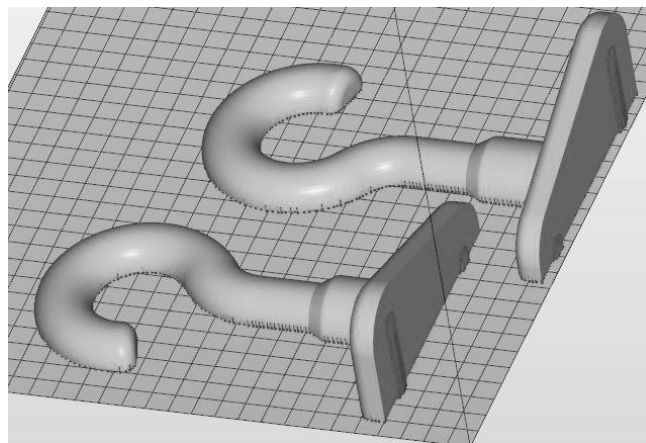


Bild 5: Längsteilung des Kleiderhakens

Dabei ist ein Vorteil, dass die Flächen, auf denen die Stützen enden, nach innen gelegt werden können. Durch die mechanische Abtrennung der Stützen kommt es häufig zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit. Da dies auf den sichtbaren oder funktionellen Flächen nicht gewollt ist, führt der Effekt zu einem Nachbearbeitungsaufwand.

Werden die Flächen wie im Fall, der im Bild 5 zu sehen ist, aufeinander gelegt und verklebt, sind die Rauheiten innenliegend und die Nachbearbeitung kann entfallen. Dabei soll-

te ein Klebstoff gewählt werden, der nicht nur die mechanischen Belastungen erträgt, sondern auch spaltfüllend ist und die Unebenheiten ausgleicht.

4 Fügen

Nach dem Fertigen der Substrukturen müssen diese wieder gefügt werden. Dabei ist die Position der Teile zueinander konstruktiv sicher zu stellen.

Im Fall des längsgeteilten Kleiderhakens wurden je drei gegenüberliegende Bohrungen gleich in die Fuge gefertigt, die mit Stiften verbunden wurden. Das Prinzip ist aus dem Zusammenbau von Holzteilen bekannt und erfordert zusätzliche Elemente, die die Position sichern. Diese Stifte könne auch an eine Bauteilhälfte heran konstruiert werden, führen dann aber zu einer Materialerhöhung, da die Stützen sich verlängern.

Wenn der Kleiderhaken an der Teilebene 3 (Bild 4) abgetrennt wird, ist eine genaue Positionierung auf der Grundplatte schwierig. Außerdem muss eine Verdrehung des Hakens um die Achse des Schafts verhindert werden.

Deshalb wurde für diesen Fall im Bild 6 eine etwas aufwendigere konstruktive Trennung demonstriert.

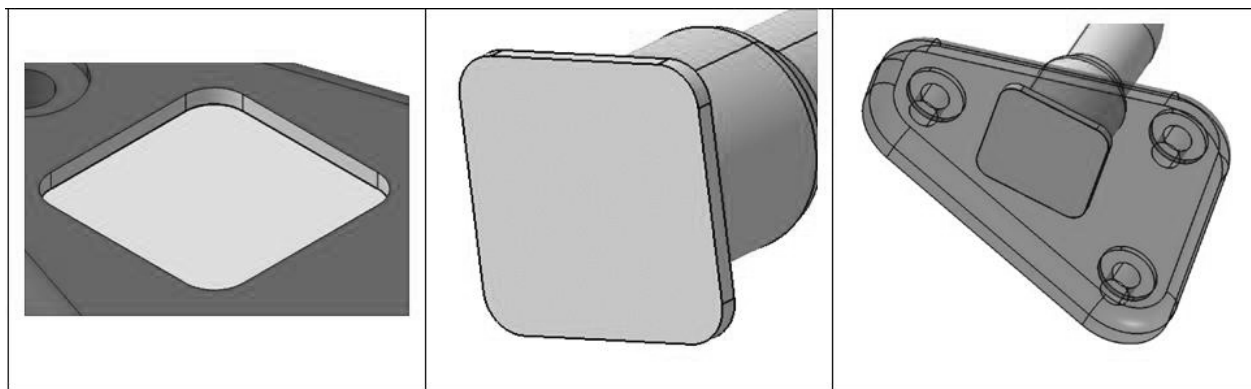


Bild 6: Platte unter dem Schaft

Da die Platte am Schaft gefertigt wird, passt sie genau in die Aussparung der Grundplatte. Damit ist sowohl die Lage auf der Platte definiert, aber auch die Verdrehung des Hakens ausgeschlossen. Zusätzlich wird die Klebefläche quer zur Lastrichtung vergrößert, so dass die Kräfte sicher abgeleitet werden können. Nachteilig wirkt sich die Vergrößerung der Schaftfläche auf die zu verbauenden Stützen aus, da der Schaft und der Haken mit längeren Stützen gefertigt werden müssen.

Eine weitere Möglichkeit ist in Bild 7 zu sehen, bei dem die Substrukturen mit einem Schwalbenschwanz verbunden werden.

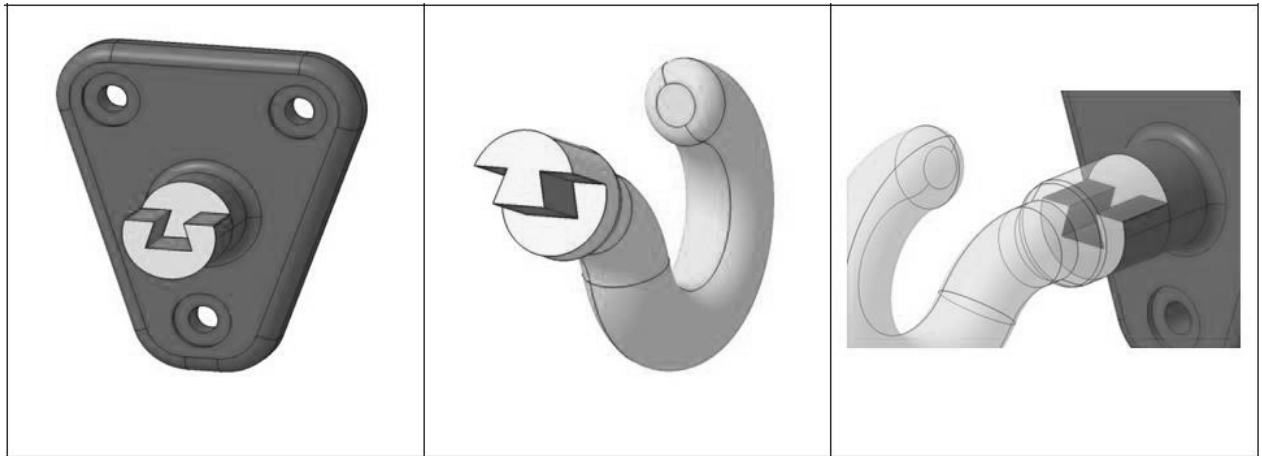


Bild 7: Kleiderhaken mit Schwalbenschwanz

Dabei ist die Positionierung der Teile zueinander sehr gut und eine Verdrehung wird form-schlüssig verhindert. Eine große Klebefläche und sicher Kraftleitung stellen die Funktion sicher.

Die erhöhte geometrische Komplexität führt kaum zur Erhöhung der Kosten, stellt aber einen prägenden Unterschied zu spanenden Verfahren dar.

Literatur

- [1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: Konstruktions-lehre : 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

Konstruktionswerkzeug für die Kostenplanung und normgerechte Gestaltung von drehenden elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung

Ralf Hinzelmann, Sergey Perekopskiy, Andreas Zörnig*, 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: *Aufbauend auf dem parametrischen Konstruktionswerkzeug welches 2016 in Rostock vorgestellt wurde, wird eine Kostenplanungsebene vorgestellt. Dazu wurde eine umfangreiche Sachnorm- sowie Halbzeugnorm-Datenbank aufgebaut. Die Halbzeugnormen wurden mit aktuellen Preistabellen von verschiedenen Herstellern hinterlegt. Desweiteren wurden Algorithmen in das Werkzeug implementiert, welche beim Auslegungsprozess die Geometrie der einzelnen Elemente auf Umsetzbarkeit durch Normprofile prüfen. So wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, schon frühzeitig im Auslegungsprozess die Kosten für das Endprodukt zu reduzieren, indem passende und günstige Auslegungsvarianten bevorzugt werden können. Es entstehen weniger Kosten bei der Materialbeschaffung und außerdem kann das Zerspanungsvolumen reduziert werden. Beispielhaft wird eine Kostenrechnung für einen Generator (FSP-Generator) vorgestellt, welcher für das „Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom“ entwickelt wurde. Dieser Generator soll in einem Staudruckwasserrad der Firma HESSELAND Wasserradmanufaktur zum Einsatz kommen.*

Abstract: *Based on the parametric design tool which was presented 2016 in Rostock a budgeting calculation will be shown. For this Purpose, a large standard data base of semi-manufactured products and their dedicated prices and material properties are created. Furthermore, algorithms were implemented which check the use of the semi-manufactured product in the dimensioning process. So, the user has the possibility to reduce the costs by choosing suitable dimensioned variants. As a result, lower costs are generated at procurement of materials and the volume of metal removed by cutting is decreased. Exemplary a cost calculation for an alternator (FSP-Generator) is presented, which was developed for the “Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom”. This electric generator will be used in the dynamic pressure water wheel of the „HESSELAND Wasserradmanufaktur“ company.*

Sichtwörter: *Parametrische Konstruktion, Datenbanken, Kostenplanung, Produktentwicklung, elektrische Maschinen, Generator, Luftspaltwicklung*

Keywords: *parametric design, data bank, budgeting, product design, electrical machines, electric generator, air gap winding*

1 Einleitung

Mit der Auslegung einer drehenden elektrischen Maschine werden deren Eigenschaften und geometrische Form zum großen Teil am Anfang eines Forschungsprojektes oder eines kundenspezifischen Entwicklungsauftrags fixiert. Nachträgliche Änderungen sind sehr zeitaufwendig und damit auch kostenintensiv [1],[5]. Deshalb ist es wichtig möglichst viele Informationen und Anforderungen möglichst schon bei der Auslegung der Maschine zu berücksichtigen. Außerdem ist es wichtig einen strukturierten und beschleunigten Entwicklungsprozess zu realisieren, um angesichts globaler Märkte konkurrenzfähig zu bleiben. Aus diesem Grund wurde ein Berechnungs- und Gestaltungswerkzeug entwickelt, welches mit der Hilfe von Datenbanken und verschiedenen Parameterbeziehungen die Maschine komplett abbildet [3]. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem entwicklungsbegleitendem Digital Mock-Up (DMU) [5],[10],[17]. Das Konstruktionswerkzeug stellt dabei die Bedienoberfläche des DMU's dar.

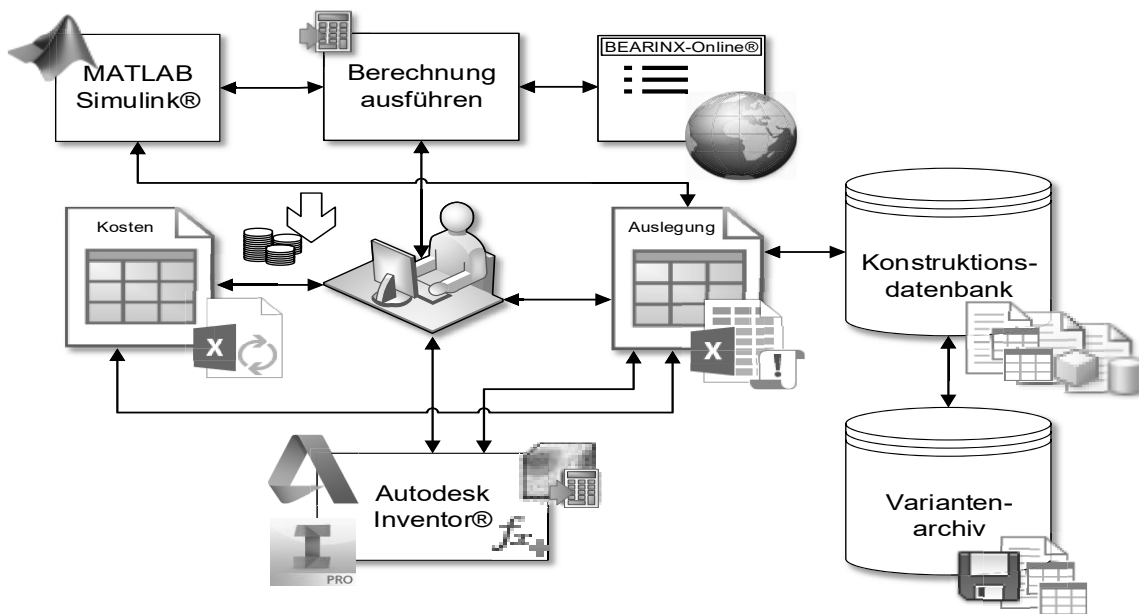


Bild 1: Datenflussdiagramm (DFD) des Konstruktionswerkzeugs

Das Modell berücksichtigt die elektrischen, thermischen, mechanischen sowie kinematischen Eigenschaftenklassen der Maschine. Besonders interessant ist die Betrachtung des thermischen Verhaltens der Maschine, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften. So konnte gezeigt werden, dass ein dünnwandiger verrippter Stator vorteilhafte thermische Eigenschaften ausweist. Das Gewicht des Stators konnte reduziert werden und gleichzeitig die strukturbedingte Wärmeabfuhr gesteigert werden [3]. Während

der Arbeit mit dem Werkzeug kann der Bediener alle Eingaben und Berechnungen über Eingabemasken steuern. Jeder Eigenschaftenklasse ist eine Eingabemaske zugeordnet. Das zugrundeliegende Modell ermöglicht eine beschleunigte normgerechte mechanische und thermische Auslegung einer elektrischen Maschine mit klassischer Bauform [3]. Die klassische Bauform ist durch eine beidseitige Lagerung des Rotors mit Radialrillenkugellagern charakterisiert. Die Maschine ist als Außenläufer ausgeführt. Als Eingangsparameter wird eine optimale magnetische Auslegung für einen elektrischen Nennbetriebspunkt verwendet. Diese wird über ein Maple-Skript generiert und einmalig manuell in die Maske für die elektrische Auslegung eingetragen. Die Zielgrößen dieser optimalen Auslegung variieren nach Anwendungsfall zwischen maximalem Drehmoment und maximalem Wirkungsgrad [8]. Die Daten werden dann an die domänenspezifischen Berechnungsprogramme übergeben (siehe Bild 1). Für die mechanische Analyse wird Autodesk Inventor Professional® und dessen FE-Add-In genutzt. Für die thermische Analyse wird MATLAB Simulink® verwendet. Dazu wurde ein thermisches Modell aufgebaut und durch Messungen an realen Prototypen aus bestehenden Radnabenmotor- und Generatorprojekten validiert. Die Lagerauslegung geschieht erst grob nach den Formelsätzen aus dem Lagerkatalog der SKF GmbH. Dann wird sie mit dem Tool BEARINX-Online® der Firma Schäffler nachgerechnet. Die Konstruktionsvarianten können auf einem Spreadsheet komprimiert archiviert werden. Zusätzlich ist es sinnvoll den Einfluss der Eigenschaften des Modells auf die Kosten der Maschine abschätzen zu können. Deshalb wurde das Modell um eine Kostenebene erweitert. Der offensichtliche Nutzen einer solchen Ebene ist die Dokumentation sowie der Vergleich der anfallenden Kosten. Große Kostenstellen werden aufgedeckt. So können Schwerpunkte für die zukünftigen Entwicklungen definiert werden. Im Speziellen soll das Kosteneinsparungspotential, welches sich aus dem Einsatz von verbesserten Halbzeugen ergibt, aufgezeigt werden. Die Auslegung der Maschine soll bezogen auf dem wirksamen Hebelarm (ca. 250 mm) und die Tiefe (ca. 200 mm) des magnetischen Kreises so variiert werden, dass eine optimale Nutzung von Halbzeugen möglich wird. Außerdem soll ein quantitativer Vergleich zwischen verschiedenen Fertigungsvarianten des Stators der Maschine angestellt werden. Die Kostenebene wird als Hilfsmittel für die Generatorauslegung erstellt und soll nicht als betriebswirtschaftlich genaue Kostenrechnung verstanden werden.

2 Grundlagen

Beim Konstruieren von Maschinen, Anlagen und Geräten ist die Forderung nach Wirtschaftlichkeit eine Schlüsselfrage. Deswegen gehört die Ermittlung der Herstellkosten zum Grundwissen eines Konstrukteurs, um kostenbewusst zu arbeiten. Die Herstellkosten spielen eine wichtige Rolle bei der Berechnung des Verkaufspreises. Herstellkosten sind die Kosten, die für die Herstellung eines Produktes notwendig sind. Sie setzen sich aus den Materialkosten und den Fertigungskosten zusammen, mit den dazugehörigen Sondereinzelkosten der Fertigung [2] und betragen bis zu 68,6% der Selbstkosten (SK) des fertigen Produktes.

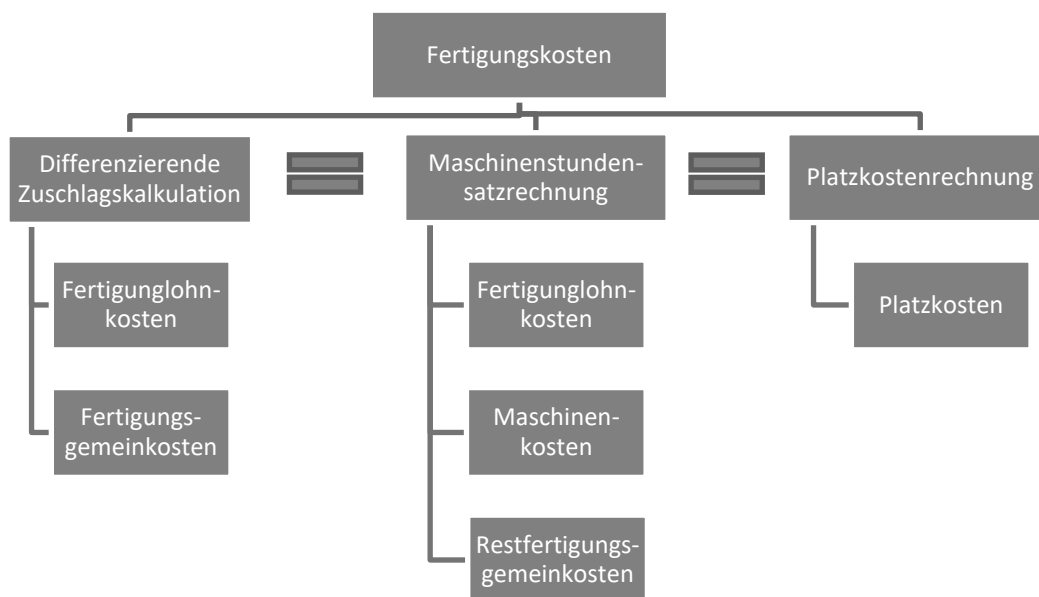


Bild 2: Konventionelle Vorkalkulationsvarianten nach Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann

Die Fertigungskosten stellen eine Kostenstelle dar, die man als einen zu optimierenden Wert schon im Vorfeld berechnen kann. Der Einsatz von Rechnern zur Unterstützung der Konstruktionsvorgehen wird mit der schnellen Entwicklung im Bereich der Informationstechnik zu einem wesentlichen Faktor für die Produktentwicklung. Zum Beispiel hat der Kalkulationsprozess von Fertigungskosten hat eine große Bedeutung im Angebotswesen für alle Produktionstypen. Im Bereich des Prototypenbaus und der Kleinserienfertigung sind die Ergebnisse einer solchen Kalkulation besonders wichtig, da die Kosten der mechanischen Bearbeitung frühzeitig geschätzt werden können und entsprechend die Größe und die Verteilung des Budgets effizienter organisiert werden kann. Eine Automatisierung der Berechnung des Kalkulationsprozesses ermöglicht die sehr schnelle Erfassung notwendiger Res-

sources und sichert eine solide Basis der Wettbewerbsfähigkeit des Produktes in der Zukunft. Die Kalkulationsverfahren nach Ehrlenspiel, Kiewert und Lindemann für die Konstruktion bieten ausführliche Verfahren für die Ermittlung der Herstellkosten und auch der Fertigungskosten. Eine Vorkalkulation zur Ermittlung von Fertigungskosten lässt sich aus den Kostenarten für die differenzierende Zuschlagkalkulation, den Maschinenstundensatz und die Platzkostenrechnung bestimmen. Bild 2 stellt die Varianten der konventionellen Vorkalkulationen dar. Die Methode der Zuschlagskalkulation ist durch den Gemeinkostenzuschlag gekennzeichnet. Die differenzierende Zuschlagkalkulation bietet die Möglichkeit direkt oder indirekt zurechenbare Kosten zu ermitteln und berechnet individuelle Gemeinkostenzuschläge für unterschiedliche Kostenstellen. Die Fertigungskosten bei der Zuschlagskalkulation ermittelt man aus der Summe der Fertigungslohnkosten (8,5% SK) und Fertigungsgemeinkosten (18,5% SK) [4]. Mit Hilfe der Maschinenstundensatzrechnung bestimmt man die Fertigungskosten durch die Berücksichtigung von Fertigungslohnkosten, Maschinenkosten und den Restfertigungsgemeinkosten für Maschineneinstellung, Fertigungssteuerung und Qualitätskontrolle. Bei der Vorkalkulation mit Maschinenstundensatz ermittelt man die Kosten einer Maschine auf einer Zeitbasis. Durch die Platzkostenrechnung erfasst man die Fertigungskosten aus den Kosten für einen Arbeitsplatz und berücksichtigt Parameter wie Dauer und Nutzung eines Arbeitsplatzes. Der Vorteil der Platzkostenrechnungsmethode besteht darin, dass bestimmte Maschinen oder Anlagen eigene Kostenstellen sind, d.h. sie sind separat in der Kalkulation einsetzbar und so können entsprechend genauere Kostenermittlungen durchgeführt werden.

3 Implementierung im Modell

Im Folgenden wird eine Kalkulation basierend auf dem Maschinenstundensatz aufgebaut [6]. Für die Kalkulation der Kosten werden umfangreiche Daten von relevanten Halbzeugen, Werkstoffen und Fertigungsverfahren benötigt. Deshalb wurden die Daten verschiedener Produzenten ermittelt und durch den Quervergleich verschiedener Produktionsprogramme und Normen validiert (Salzgitter Mannesmann Stahlhandel GmbH; AGT Deutschland GmbH; MEWA GmbH, Weinmann Aach AG, AALCO Metall / AMARI Metall GmbH) [11], [13],[16]. Bei der Werkstoffauswahl wurden Baustähle nach Norm DIN EN 10027-2 ausgewählt [12]. Für die Aluminiumteile wurde die Legierung AlMgSi1 präferiert [14],[15]. Dies sind sehr gebräuchliche Werkstoffe im Maschinenbau. Es wurde zusätzlich eine Bibliothek

weiterer Werkstoffklassen erstellt. Diese enthält unter anderem auch Daten zu Magnetwerkstoffen, Kupferwerkstoffen und Elektroblechen. Diesen Werkstoffen wurden keine Halbzeugdaten hinterlegt, da die spezielle Geometrie, welche aus der Verwendung der Luftspaltwicklung resultiert eine Spezialanfertigung bedingt. Für die Kalkulation konnten aber Erfahrungswerte aus vorherigen Bestellungen und Studien genutzt werden [9]. Um die stückzahlabhängigen Kosten von Normteilen zu bestimmen, können online Angebote auf den Webseiten diverser Firmen erstellt werden. Für die Kugellagerkosten müssen jeweils die lokalen Vertriebspartner der Lagerhersteller kontaktiert werden. Da hier eine normgerechte mechanische Auslegung angestrebt wird und die Kosten geringgehalten werden sollen, wird angenommen, dass spezielle Werkstoffe sowie hochtechnologische Fertigungsprozesse die Kosten erhöhen. Deshalb sollen diese hier nicht betrachtet werden. Es handelt sich hier um Sondermaschinenbau für einen Nischenmarkt. Die Kleinwasserkraftanlagen, welche im Fluss-Strom-Netzwerk projektiert werden, begrenzen die maximale Stückzahl der zu produzierenden Generatoren da die Standortzahl an den Flüssen begrenzt ist. Die Kosten werden daher für Prototypen- und Kleinserienfertigung berechnet. Es wurden acht Rohteilklassen definiert. Außerdem wurden elf Bearbeitungsverfahren klassifiziert. Jede dieser Klasse enthält dabei Daten zu Maschinenstundensätzen, Rüstzeiten, Lohnkosten des ausführenden Personals und einen relativen Wert für das Zeitspanvolumen. Der relativer Wert meint in diesem Zusammenhang einen Richtwert, der benötigt wird, um die Qualität der Halbzeugauswahl zu bestimmen. Ein korrekter Wert kann nicht bestimmt werden, da dafür diverse Fertigungsparameter bekannt sein müssen, die in der Planungsphase einer neuen Maschine noch nicht bekannt sind. Werden in Zukunft Projekte mit Fertigungsunternehmen realisiert, können diese Parametern genauer definiert werden. Nachdem die Daten in das Modell eingelesen, konsolidiert sowie in Datenklassen strukturiert wurden, konnten Auswahlalgorithmen geschrieben werden. Diese durchsuchen die Halbzeugtabellen auf Basis der vorherigen Auswahl einer Rohstoff- und Halbzeugklasse. Ein passendes Halbzeug wird nun vorgeschlagen oder ausgegeben, welcher Parameter nicht mit den jeweiligen Normreihen vereinbar ist. Nun kann ein passendes Bearbeitungsverfahren ausgewählt werden. Dann werden aus dem Volumen des Rohteils (V_{roh}) die Materialkosten (k_{mat}) berechnet. Aus der Volumendifferenz von Rohteil und Bauteil kann mit dem Zeitspanvolumen (Q) und dem Maschinenstundensatz (M_{sts}) die Maschinenkosten berechnet werden. Aus der Summe von Maschinenkosten, Materialkosten und den stückzahlbezogenen Rüst- sowie Werkzeugkosten (k_{wf}), können die Stückkosten (k) kalkuliert werden. Dazu werden die Lohnkosten (k_L), die Rüstzeit (t_R) und die geplante Stückzahl (n) des Bauteils benötigt.

$$k(n) = V_{\text{roh}} \cdot k_{\text{mat}} + \frac{(V_{\text{roh}} - V_{\text{BT}})}{Q} \cdot M_{\text{sts}} + \frac{t_R}{n} \cdot k_L + \frac{k_{\text{wf}}}{n} \quad (1)$$

Die Kosten werden so für jedes Bauteil bestimmt. Die Summe aus Stückkosten (k_n), Montagekosten (k_M) und den stückzahlabhängigen Montagewerkzeugkosten (k_{wm}) ergibt die Gesamtkosten (k_g).

$$k_g(n) = \sum k(n) + \sum k_M + \sum \frac{k_{wm}}{n} \quad (2)$$

Für die Bewertung der unterschiedlichen Herstellungsverfahren des Stators wurden Referenzangebote aus vorherigen Projekten von der ACTech GmbH und der citim GmbH in die Datenbank eingetragen. Es wurde eine Eingabemaske erstellt (Rohteilkonfigurator), in der alle Bauteile aufgelistet sind. Innerhalb dieser Maske können alle zuvor erläuterten Einstellungen vorgenommen werden. Des Weiteren wurde eine Kostenübersichtstabelle angelegt, in der die Normteil-, Montage- und Montagewerkzeugkosten eingetragen werden können (siehe Tabelle 1).

4 Beispielrechnung für FSP-Generator

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Fertigung eines Prototyps, wie er im Projekt „Fluss-Strom-Plus“ realisiert wird. Die Stückzahl (n) in der Berechnung ist also eins. Mit dem Rohteilkonfigurator wurde jedem Bauteil ein passendes Rohteil zugeordnet. Zur Kostenkalkulation des Generators wurden alle benötigten Daten aus den Projektunterlagen in die Kostentabelle eingetragen (**Tabelle 1**). Die Generatorgesamtkosten betragen hier nach 24890,28 €. Der Anteil der Materialkosten an den Gesamtkosten ist sehr gering. Er beträgt 3,17 Prozent. Der Anteil der Bauteilkosten beträgt jedoch 18,23 Prozent. Somit ist der Einfluss der Fertigungsverfahren und deren Parameter dominant. Wie zuvor erläutert, konnten diese Parameter jedoch nur abgeschätzt werden. Deshalb ist eine genauere Betrachtung der Einflüsse der Halbzeuge nicht möglich. Es zeigte sich aber, dass die geplante Ausführung des Stators als Aluminiumschweißkonstruktion im Vergleich mit einer gegossen und aus dem Vollem gefrästen Variante kostengünstiger ist (Tabelle 1-blau unterlegt). Das äußere Rohr (Statorrohr) ist nicht in den Fertigungsprogrammen der betrachtete Hersteller enthalten. Deshalb muss das Rohr separat hergestellt werden, was einen zusätzlichen Fertigungsschritt darstellt. Deshalb ist dieses Rohr im Vergleich mit den anderen Halbzeugen des Stators am teuersten. Alle auf gelisteten Halbzeuge des Stators müssen durch Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) verbunden werden. Danach muss der Lauf zwischen Wellen- und

Blechkaketsitz durch Drehen in einer Aufspannung hergestellt werden. Die Kosten des Stators nehmen dann einen Anteil von 9,44 Prozent bezogen auf die Generatortgesamtkosten ein.

Tabelle 1: Rohteilkonfigurator und Kostentabelle mit Beispielwerten für den FSP-Generator

Kostenrechnung

Geplante Stückzahl:

1

Statorbauform:

geschweißt

Rohteilkonfigurator						
	Name	Rohteilart	Bearbeitungsverfahren	Material	Werkzeugkosten [€]	Bauteilkosten [€]
Stator	Schweißnaht	Draht	Schweißen	AlMgSi1	0	686,63
	Statorwelle	Rohr	Drehen	S355	0	197,93
	Statornabe	Rohr	Drehen	AlMgSi1	0	49,93
	Statorsteg	Platte	Drehen	AlMgSi1	0	571,27
	Statorrohr	geschw. Rohr	Drehen	AlMgSi1	0	764,09
	Rippen	Blech	Sägen	AlMgSi1	0	81,71
	Stator gefräst	Blech	Fräsen	AlMgSi1	0	5426,85
Rotor	Stator gegossen	Pulver	Sandguss	AlMgSi1	3500	4388,02
	Antriebswelle	Rund	Drehen	S355	0	83,37
	Antriebsflansch	Rohr	Drehen	S355	0	74,34
	Lagerschale I	Rohr	Drehen	S355	0	41,05
	Lagerschale II	Rohr	Drehen	S355	0	41,05
	Lagerschild I	Blech	Drehen	AlMgSi1	0	702,38
	Lagerschild II	Blech	Drehen	AlMgSi1	0	702,38
	Rotorrohr	Rohr	Drehen	S235	0	541,81

Kostentabelle						
	Name	Anzahl [Stk.]	Einzelpreis [€]	Montagezeit je Stück [h ¹]	Werkzeugkosten [€]	Gesamtkosten [€]
	Stator	1	2351,56	2,00	0	2410,92
	Rotor	1	2186,37	2,00	500	2745,73
	Nutenwicklung	1	2793,6	80,00	2424,27	7592,17
	Luftspaltwicklung	1	2038,57	80,00	2407,27	6820,14
	Magneten	162	14	0,08	100	2768,66
	Blechkpaket	1	1000	4,00	51,65	1170,36
	Kugellager	2	68,55	0,50	0	166,78
	Passfedern	2	8,91	0,03	0	19,60
	Schrauben	92	11,94	0,03	0	1189,49
	Sicherungsringe	1	4,05	0,08	0	6,42

Preis pro Generator: 24890,28

Erst bei höheren Stückzahlen ist zu erwarten, dass ein Gießen des Stators zu geringen Stückkosten führen wird. Das Fräsen aus dem Vollen sollte vermieden werden, da dort nur geringe Skalierungseffekte durch die Serienfertigung zu erwarten sind [9]. Die Bauteilkosten des Rotors nehmen insgesamt einen Anteil von 8,78 Prozent bezogen auf die Generatortgesamtkosten ein. Es sind jeweils günstige Halbzeuge in den Lieferprogrammen verfügbar. Ein weiterer Kostenfaktor sind die Neodym-Eisen-Bor-Magneten. Deren Preisentwicklung hängt von der Weltmarktsituation ab und soll hier nicht weiter betrachtet werden. Der Hauptkostentreiber ist die Fertigung der Kupferwicklungen, welche mit 57,9 Prozent der Gesamtkosten zu Buche schlägt. Für eine optimale Nutzung von Halbzeugen müsste der wirksamen

Hebelarm der Maschine um ca. 50 mm auf 200 mm verkleinert werden. Dann würde auch für das Statorrohr ein passendes Halbzeug zur Verfügung stehen. Um den Längenzuwachs zu berechnen, wird die Maschinenkonstante (K) benötigt:

$$K = \sqrt{3} \cdot l \cdot r \cdot B_{eff} \cdot \omega \cdot \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{b_{mag} + b_{Spalt}} \quad (3)$$

Daraus resultiert folgende Skalierungsregel für eine Maschine mit Luftspaltwicklung:

$$l_1 \cdot r_1^2 = l_2 \cdot r_2^2 \quad (4)$$

Es errechnet sich ein Längenzuwachs von ca. 112,5 mm. Dies würde zu einer Gewichtserhöhung führen die den Kostenvorteil überkompensiert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Kostenberechnungs- und Verwaltungswerkzeug vorgestellt, welches im entwicklungsbegleitenden DMU eingebettet ist. Es wurden verschiedene Kostenberechnungsvarianten abgewogen und eine Maschinenstundensatzrechnung mit Hilfe von Halbzeug- und Materialdatenbanken im Modell implementiert. Ein Überblick über die Kostenstruktur der Prototypenfertigung eines Generators mit Luftspaltwicklung konnte gegeben werden. Mit Hilfe dieses Werkzeuges konnte gezeigt werden, dass die mechanische Auslegung des FSP-Generators mit einem geschweißten Aluminiumstator zweckmäßig ist. Der Einfluss der Halbzeugauswahl ist wider Erwarten zu vernachlässigen, da die Fertigungskosten dominieren. Als Hauptkostentreiber wurden die Personalkosten bei der Fertigung der Wicklungen identifiziert. Deshalb sollten die Bestrebungen eine verbesserte Wickeltechnologie zu entwickeln, weiter forciert werden. Der Einfluss der geplanten Stückzahl auf den Generatorpreis kann nun analysiert werden. Sinnvolle Fertigungsverfahren und mechanische Auslegungsvarianten können nun bezüglich der zu erwartenden Kosten bewertet werden. Um die Qualität der Kostenberechnung zu erhöhen, könnten in Zukunft Webinhalte mit der Power-Query-Funktion in die Datenbanken verarbeitet werden. Es könnten zum Beispiel aktuelle Stahl- und Aluminiumpreise von entsprechende Webseiten abgerufen werden [7]. Bearbeitungsverfahren könnten nach dem REFA-Katalog definiert werden. Ein Plausibilisierungsalgorithmus für die Auswahl des Bearbeitungsverfahrens könnte entwickelt werden. Es ist zu prüfen, ob das Modell in ein PDM-System eingebunden werden kann. Autodesk® bietet hierfür das Programm Vault an, ein serverbasiertes PDM-System. Eine eingeschränkte Hoch-

schullizienz steht zur Verfügung. Es ist außerdem denkbar die Berechnungen für Großserienfertigung zu erweitern. Dazu müssten umfangreiche Daten zu Fertigungsprozessen hinterlegt werden.

Literatur

- [1] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007, ISBN 978-3-540-34060-7
- [2] Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für den Maschinenbau. 2. Auflage, München Wien, Carl Hanser Verlag, 2003
- [3] Hinzelmann, R.; Zörnig, A.; Borchardt, N.; Kasper, R.: Parametrisches Konstruktionswerkzeug für die Gestaltung von elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung, Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016, Rostock
- [4] VDMA: Kennzahlenkompass 2016, Frankfurt am Main, VDMA Verlag, 2015
- [5] Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure, Eine praxisbezogene Einführung, 2 völlig neu bearbeitet Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [6] Hering, E.: Kostenrechnung und Kostenmanagement für Ingenieure, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2005
- [7] Günther; Schramm; Digitalen Stahltrends auf der Spur, Zeitschrift: „Konstruktion“; Ausgabe 05/2017
- [8] Borchardt, N.; Kasper, R. (2016): Nonlinear design optimization of electric machines by using parametric Fourier coefficients of air gap flux density. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, S. 645–650. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/document/7576841/>.
- [9] Borchardt, N.; Kasper, R.; Brüggemann, D.; Hiller, T.; Jacob, A.; Odenthal, F.; Siebert, A.; Waßmann, T.: Fertigungskostenkalkulation eines innovativen Radnabenmotors, IMS-Projektarbeit, 03/2014
- [10] Markworth, R.: Entwicklungsbegleitendes Digital Mock-Up im Automobilbau (Berichte aus der Konstruktionstechnik) Taschenbuch – 1. Januar 2003
- [11] Norm DIN EN 10 058 Flachstahl Lieferprogramm ATG Deutschland GmbH
- [12] Norm DIN EN 10027-2 Bezeichnungssysteme für Stähle - Teil 2: Nummernsystem; Deutsche Fassung
- [13] Norm DIN EN 10060:2004-02 Warmgewalzte Rundstäbe aus Stahl - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße; Deutsche Fassung EN 10060:2003
- [14] Norm DIN EN 573-3:2013-12 Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen; Deutsche Fassung EN 573-3:2013
- [15] Norm DIN EN 485-2:2016-10 Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten - Teil 2: Mechanische Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 485-2:2016
- [16] Norm DIN EN 10025-1:2011-04 Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung pr EN 10025-1:2011
- [17] Norm ISO 17599:2015-01 Technische Produktdokumentation (TPD) - Allgemeine Anforderungen an "digital mock-up" für mechanische Produkte

Varianzsteuerung integraler Produkte durch den prozessbegleitenden Einsatz von Data-Mining Werkzeugen

Christian Konrad, Manuel Löwer, Walter Schmidt

Lehrstuhl und Institut für allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbau, RWTH Aachen University
Steinbachstraße 54 B, D-52074 Aachen

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

Inhalt: *Integrale Produktarchitekturen weisen gegenüber modularen Architekturen eine Reihe von Vorteilen auf. Sie begünstigen z.B. eine geringere Anzahl an Komponenten, eine einfachere Montierbarkeit und ein geringeres Gewicht des Produkts. Das heutige Spannungsfeld der Produktentwicklung sowie neue Material- und Fertigungstechnologien, z. B. die Weiterentwicklung von technischen Kunststoffen und die Nutzung von Verfahren der additiven Fertigung, erhöhen die Attraktivität integraler Produkte weiter. Neben ihren Vorteilen haben integrale Produkte aber auch eine Reihe signifikanter Nachteile. Integrale Produktarchitekturen sind stark vernetzte Strukturen, welche ein hohes Maß an Komplexität aufweisen. Die Aufwände für das Management dieser Komplexität und die damit verbundenen Risiken überwogen bisher häufig die Vorteile von integralen Produktarchitekturen.*

In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise beschrieben, wie in frühen Phasen der Produktentwicklung eine prozessbegleitende Varianzsteuerung integraler Produkte trotz stark vernetzter Produktarchitekturen erfolgen kann. Zur Erhöhung der funktionalen Unabhängigkeit muss die bisherige Betrachtungstiefe der Produktarchitektur um die Ebene der Produktmerkmale und -ausprägungen erweitert werden. Dadurch ist es möglich, die Komplexität integraler Produktarchitekturen durch den kombinierten Einsatz von etablierten Ansätzen des Variantenmanagements und Methoden des Data Mining beherrschbar zu machen.

Dies ermöglicht eine prozessbegleitende Varianzsteuerung in frühen Phasen der Produktentwicklung z. B. durch die Überführung von Kundenanforderungen in Produktmerkmale auf Basis von Bewertungsgrößen sowie implizitem und explizitem Unternehmenswissen.

Abstract: *Integral product architectures have several advantages over modular architectures. They favor e.g. a lower number of components, a simpler assembly and a lower weight of the product. Today's area of conflict in product development, new materials and manufacturing technologies, such as the development of engineering plastics and the use of additive manufacturing processes, further enhance the attractiveness of integral products. In addition to their advantages, integral products also have a few significant disadvantages. Integral product architectures are highly cross-linked structures that have a tremendous degree of complexity. The cost of managing this complexity and the risks associated with it have so far often overshadowed the advantages of integral product architectures.*

In this article, we describe a method for variance control of integral products in the early stages of product development, even though product architectures are strongly cross-linked. To increase the functional independence, the existing viewing depth of the product architecture must be extended by the level of product

features and characteristics. This makes the complexity of integral product architectures manageable by the combined use of established approaches regarding variant management and methods of data mining.

This allows a process-accompanying variance control in early stages of product development e.g. during the transfer of customer requirements into product features on the basis of evaluated variables and implicit as well as explicit corporate knowledge.

Stichwörter: *Konstruktionswissen, Standardisierung, Konfigurationsmanagement, integrale Produkte, Data Mining*

Keywords: *design knowledge, standardization, configuration management, integral products, data mining*

1 Einleitung

Verkürzte Produktlebenszyklen, wechselnde Anforderungen sowie Rahmenbedingungen, steigende Komplexität und Varianz der Produkte sind Herausforderungen mit denen Unternehmen heute konfrontiert werden [1, 2, 3]. Insbesondere im Sondermaschinenbau sollen Produkte kundenspezifische Anforderungen erfüllen. Zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit muss eine große kundendienliche externe Varianz durch eine möglichst kleine interne Produktvarianz abgebildet werden können. Die Reduktion der internen Varianz kann durch eine Vielzahl von effektiven Ansätzen und Methoden des Variantenmanagements erfolgen. Die Anwendbarkeit dieser Ansätze ist zumeist jedoch abhängig von der Modularisierbarkeit der betreffenden Produktarchitekturen und bei integralen Produkten nur eingeschränkt gegeben. Im Folgenden wird die Ursache für diesen Umstand abgeleitet und eine Vorgehensweise vorgestellt, wie eine Varianzsteuerung in den frühen Phasen der Produktentwicklung auch für integrale Produkte möglich ist. Anschließend wird dargestellt, wie diese Vorgehensweise durch den Einsatz von Data Mining Methoden prozessbegleitend zur frühen Phase der Produktentwicklung in die Praxis überführt werden kann.

2 Variantenmanagement: Stand der Forschung

Nach Feldhusen ist eine Variante als eine Lösung definiert, die sich in wenigstens einem Parameterwert von einer anderen Lösung für den gleichen Zweck unterscheidet [4]. Die Ursache für die Entstehung von Varianten kann unternehmensintern (Kosten, defizitäre Methoden, etc.) oder unternehmensextern (Kundenanforderungen, technologische Veränderungen, etc.) liegen [3, 4]. Durch zusätzliche Varianten wird die Anzahl an Bauteilen und Baugruppen und die Anzahl der im ERP System abgelegten Materialnummern stetig größer

[5]. Die Beherrschung der hieraus resultierenden Komplexität verbraucht Ressourcen, weswegen Methoden aus dem Variantenmanagement als Gegenmaßnahmen zum Einsatz kommen [6]. Derartige Methoden sind z. B. die Definition von Referenzvarianten und die Ableitung von weiteren Produktvarianten aus diesen Referenzvarianten [7], die Entwicklung kontextsensitiver Standards in modularen Produktplattformen [8] und die konfigurationsgestützte Modularisierung variantenreicher Produkte mittels Clusteranalysen [9].

Die bisher etablierten Methoden des Variantenmanagements gründen auf folgender Annahme:

„Sinnvolle Produktstrukturen setzen voraus, daß die Gestaltung von Flächenkomplexen, Bauteilen und Baugruppen, Modularisierung und geeignete Schnittstellen ermöglicht.“ [3]

Dem folgend bauen übliche Ansätze in der Regel auf der Suche nach Baustrukturen auf, welche Funktionen und Funktionsmerkmale in einzelnen abtrennbaren Baueinheiten der Produktstruktur (Baugruppen oder Bauteile) beinhalten [3]. Die Zuordnung von Elementen der Produktstruktur zu Elementen der Funktions- oder Merkmalsstruktur ergibt die Systemarchitektur eines Produkts [12].

Systemarchitekturen kann man hinsichtlich der relativen Autonomie, d.h. der funktionalen und physischen Unabhängigkeit ihrer Subsysteme in zwei Klassen unterteilen [13]:

- Systeme mit einer relativen Autonomie der Subsysteme werden als modular bezeichnet. Die Subsysteme nennt man dann auch Module.
- Eine Systemarchitektur mit schwacher Autonomie, d.h. stärkerem funktionalen und physischen Zusammenhalt der Subsysteme, bezeichnet man als integrale Systeme.

In Bild 1 sind zwei Zuordnungsmöglichkeiten von Funktionen bzw. Funktionsmerkmalen zu Komponenten dargestellt. Produktarchitekturen mit hoher funktionaler Unabhängigkeit (Bild 1, links) sind nach [3] prinzipiell geeignet für die etablierten Methoden des Variantenmanagements, da diese auf die Modularisierbarkeit der Produktarchitektur angewiesen sind. Produktarchitekturen mit schwacher Autonomie der Subsysteme (Bild 1, rechts) sind demzufolge für solche Ansätze schlecht geeignet [3].

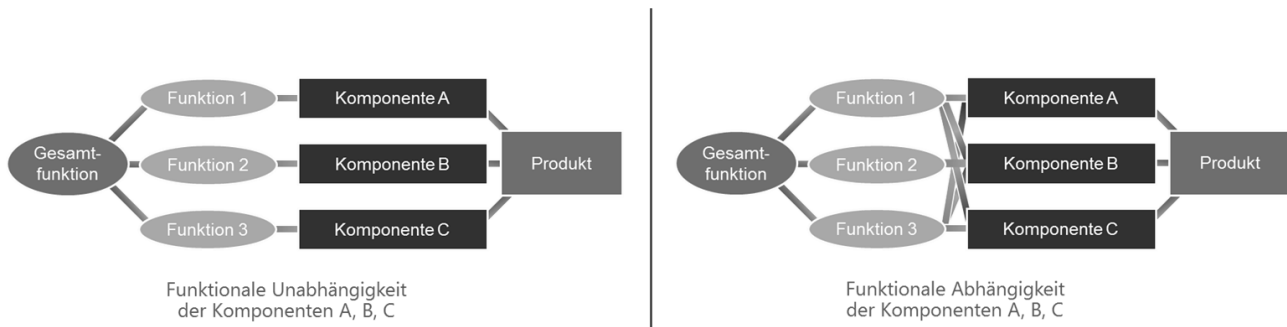


Bild 1: Vergleich zweier Produktarchitekturen mit funktional unabhängigen bzw. funktional abhängigen Komponenten, nach [13]

Integrale Produktarchitekturen zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus [13]:

- Komponenten der Produktstruktur erfüllen zugleich mehrere Funktionen
- Einzelne Funktionen werden von mehreren Komponenten erfüllt
- Komponenten weisen nicht bzw. kaum trennbare Schnittstellen auf

Letztere Eigenschaft liegt immer dann vor, wenn die Komponenten eines Produkts untereinander starke funktionale und physische Abhängigkeiten besitzen.

Obwohl Modularisierung im Allgemeinen ein geeigneter Ansatz zur Reduktion der Komplexität von Entwicklungsprozessen ist, besteht dennoch durchaus die Möglichkeit, dass eine integrale Produktarchitektur sinnvoll oder nicht vermeidbar ist. Wesentliche Vorteile von integralen Produkten ergeben sich nach Göpfert durch die in der Regel kleinere Anzahl an benötigten Komponenten. Resultierende Synergieeffekte sind weniger komplexe physische Schnittstellen, eine tendenziell höhere Zuverlässigkeit des Produkts und eine einfachere Fertigung und Endmontage. Im direkten Vergleich mit modularen Produktarchitekturen können integrale Architekturen kompaktere und leichtere Produkte ergeben. [13]

Neue Material- und Fertigungstechnologien wie z. B. immer leistungsfähigere technische Kunststoffe und additive Fertigungsverfahren sowie Leichtbauansätze steigern die Attraktivität von integralen Produkten zunehmend. Um integrale Produktarchitekturen wirtschaftlich-technisch attraktiv zu machen, muss die durch integrale Bauteile entstehende Varianz und das daraus resultierende Risiko durch die Bereitstellung von Bewertungsgrößen und einem durchgängigen Entwicklungsprozess beherrscht und kalkulierbar gemacht werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Nachteile des Ressourcen- und Infrastrukturverbrauchs die Vorteile integraler Bauweisen überwiegen.

3 Ansatz zur Varianzsteuerung integraler Produkte

Der Einsatz von etablierten Ansätzen des Variantenmanagements auf ein reales Produkt mit integraler Produktarchitektur ist dann erfolgreich, wenn die integrale Produktarchitektur durch eine konstruktive Überarbeitung in eine modulare transformiert werden kann. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn die integrale Produktarchitektur nicht systembedingt notwendig oder sinnvoll ist.

Falls eine solche Transformation nicht möglich ist, sind konventionelle Methoden des Variantenmanagements, wie z. B. Kennzahlen zur Steuerung der Variantenvielfalt, Modularisierung, sowie Baureihen und Baukastensysteme nicht einsetzbar oder wenig wirksam, da diese Ansätze darauf angewiesen sind, dass eine Modularität bzw. möglichst große funktionale und physische Unabhängigkeit zumindest partiell gegeben ist.

Im konventionellen Variantenmanagement ist die Bauteil- bzw. Elementebene die unterste betrachtete Ebene. Diese Ebene wird auch Elementarebene genannt [13]. Bauteile werden durch Bauteilmerkmale, wie z. B. Länge, Breite, Höhe, Härte und Härtetiefe definiert. Diese Bauteilmerkmale sind bei integralen Bauteilen relevant für die Funktionserfüllung. Durch eine Erweiterung der zur Varianzsteuerung betrachteten Ebene der Produktstruktur um Bauteilmerkmale können sich Produktarchitekturen mit einer höheren funktionalen Unabhängigkeit ergeben, vgl. Bild 2.

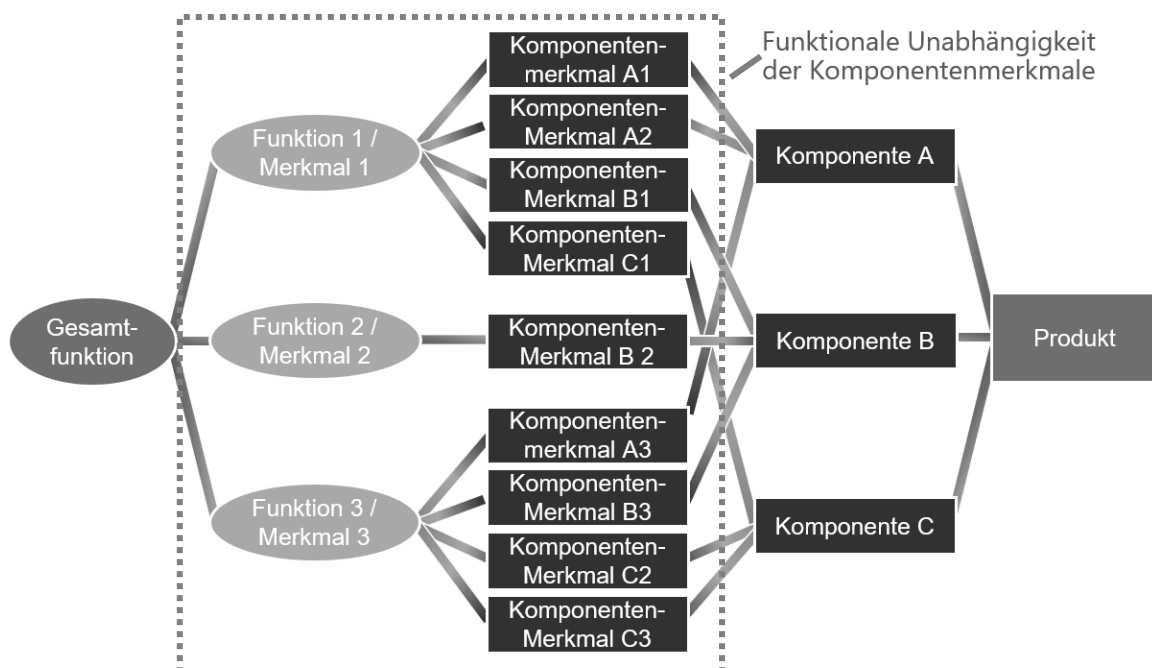


Bild 2: Die Erweiterung der nicht modularisierbaren Produktarchitektur aus Bild 1 um die Ebene Komponentenmerkmale erhöht die funktionale Unabhängigkeit bei steigender Komplexität der Betrachtung

Durch die genauere Auflösung der betrachteten Zusammenhänge ergibt sich eine größere funktionale Unabhängigkeit zwischen Funktionsstruktur und der untersten Ebene der Produktstruktur, der Komponentenmerkmalsebene. Hieraus resultiert allerdings auch eine stark ansteigende Komplexität der erweiterten Produktarchitektur.

4 Varianzsteuerung mittels Data Mining

Um die Vorteile von integralen Produktarchitekturen nutzen zu können, muss die durch starke Interdependenzen gekoppelte Produktarchitektur beherrschbar gemacht werden, so dass die Vorteile nicht durch Nachteile überwogen werden.

Im Rahmen von Industriekooperationen wurde eine Vorgehensweise zur Varianzsteuerung integraler Produkte erarbeitet. Dabei kam experimentell die in Kapitel drei beschriebene Erweiterung der Produktstruktur um die Komponentenmerkmalsebene zum Einsatz, nachdem die Anwendung konventioneller Ansätze nicht zum gewünschten Erfolg geführt hatte. Im Anschluss konnten mit konventionellen Ansätzen zumindest Teilerfolge erzielt werden. Da die Anzahl der Kombinationen von Merkmalen und Merkmalsausprägungen sowie die damit entstehende Varianz exponentiell steigt, wird die Kombinatorik bei Betrachtung von Komponentenmerkmalen allerdings schnell sehr anspruchsvoll. Ein Variantenmanagement durch strategisches Vordenken des Produktportfolios wäre aufgrund der Rahmenbedingungen nicht zielführend.

Vielversprechender ist der Einsatz von prozessbegleitenden Bewertungs- und Entscheidungswerkzeugen, um kontextsensitiv nur dort Varianz zuzulassen, wo sie aufgrund von produktbezogenen Anforderungen erzwungen wird. Bereits im Rahmen des Anforderungsmanagements können Kundenanforderungen mittels Kennzahlen bezüglich ihrer Ähnlichkeit zu Altprojekten bewertet werden. Auf Basis der Anforderungen kann über die Funktions- und Prinzipsynthese das qualitative Design des Produkts festgelegt und anschließend z. B. hinsichtlich der Ähnlichkeit zu Altprojekten bewertet werden. Nach der Festlegung des qualitativen Designs werden die kundenspezifischen Produktmerkmale determiniert. Auf Basis dieser Merkmale können die verbleibenden nicht kundenspezifischen Produktmerkmale konfiguriert werden. Die Konfiguration wird unterstützt durch den prozessbegleitenden Einsatz von Bewertungskennzahlen sowie die Implementierung von explizitem Konstruktionswissen (z. B. in Form von Werksnormen) und Data Mining Methoden zur Erschließung und Nutzung von implizitem Konstruktionswissen (z. B. mit Hilfe von Korrelationsanalysen). Optimierungsziel der Konfiguration muss neben der Funktionserfüllung die Minimierung der

entstehenden Varianz sein. Der beschriebene Varianzsteuerungsprozess ist in Bild 3 skizziert.

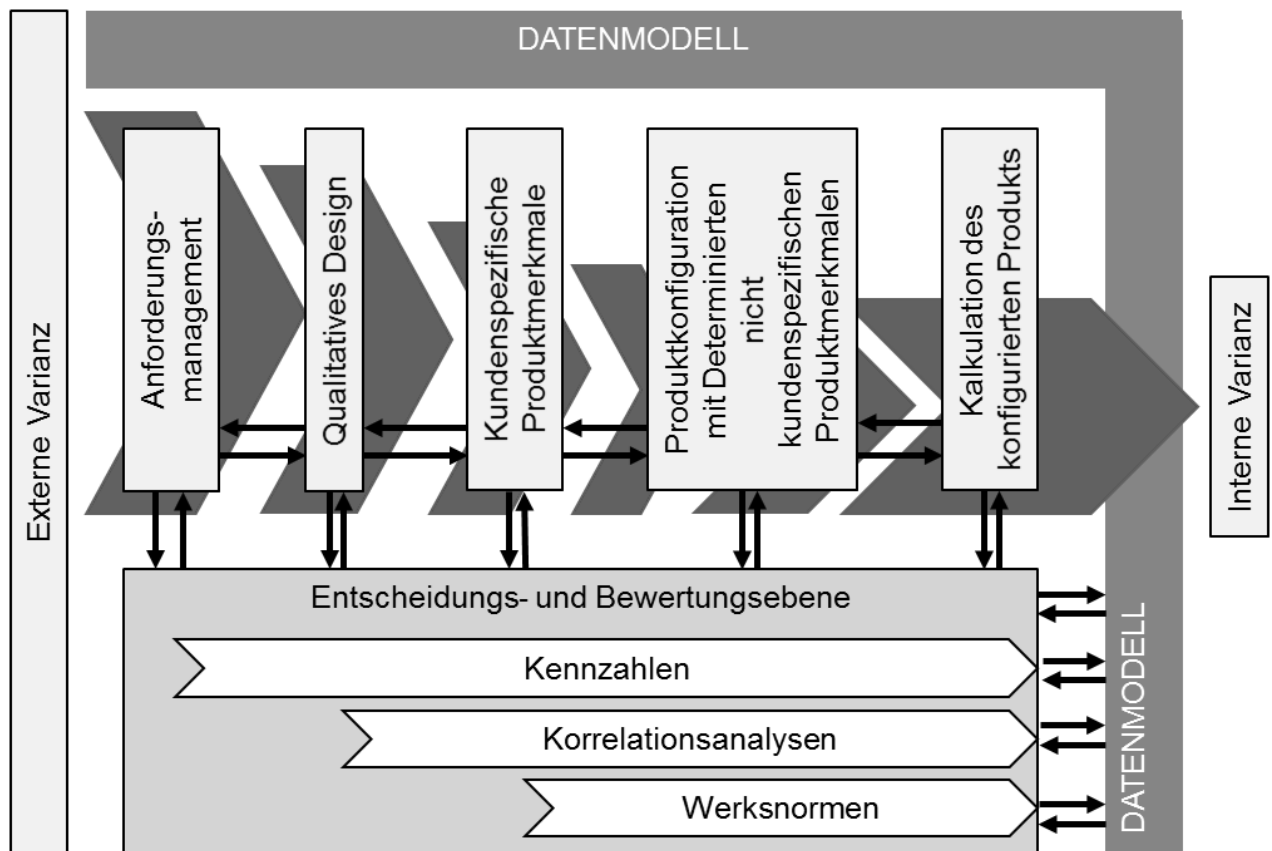


Bild 3: Varianzsteuerung integraler Produkte mit Hilfe einer durchgängigen Bewertungsebene

4.1 Einführung einer Bewertungsgrundlage für Ausprägungen von Komponentenmerkmalen

Durch die Erweiterung der Produktstruktur ist die prozessbegleitende Bewertung von Merkmalsausprägungen durch Kennzahlen möglich. Auf Bauteilebene ist eine Bewertung aufgrund der hohen funktionalen Abhängigkeiten des Produkts nicht zielführend. Es wurden mehrere etablierte Kennzahlen zur Steuerung der Variantenvielfalt bezüglich ihrer Anwendbarkeit auf integrale Produktarchitekturen geprüft, z. B. der relative Nutzen von Merkmalsausprägungen, die relativen Kosten, die Verwendungshäufigkeit und der Anteil an Umsatz sowie Gewinn von Merkmalsausprägungen. Diese und weitere Kennzahlen werden von Knauss et al. näher erläutert [3]. Problematisch sind konventionelle Kennzahlen, welche auf eine Standardversion des Produkts bezogen werden, da bei einem integralen Produktportfolio und gegebener Varianz die Bestimmung einer „Standardversion“ des Produkts nicht

möglich ist. Beispiele für solche Kennzahlen sind der relative Nutzen und die relativen Kosten von Merkmalsausprägungen. Eine Standardisierungskennzahl, welche sich aus der Verwendungshäufigkeit, einem Kostenanteil sowie einem Zeitrelevanzfaktor einzelner Komponentenmerkmalsausprägungen zusammensetzt, stellt einen vielversprechenden Lösungsansatz für dieses Dilemma dar. Durch die Bewertung sämtlicher Merkmalsausprägungen ist es möglich, auch vollständig konfigurierte Produkte bezüglich ihres Standardisierungsgrads zu bewerten und dadurch zu differenzieren.

4.2 Einsatz von Data Mining Verfahren zur Stammdatenauswertung

Der Einsatz von Data Mining Verfahren ist notwendig, um eine Bewertungsgrundlage für die prozessbegleitende Steuerung der Varianz zu schaffen. Von Interesse ist die Quantifizierbarkeit der Ähnlichkeit einzelner Ausprägungen zueinander, um die Substituierbarkeit kundenspezifischer Ausprägungen durch Standards zu bewerten.

Zur Ergänzung des z. B. in Werksnormen dokumentierten Konstruktionswissens des jeweiligen Unternehmens ist die Auswertung der Korrelationen zwischen Merkmalen und Merkmalsausprägungen zweckmäßig. Diese Auswertung erfolgt aufgrund der zu betrachtenden Datenkomplexität, hervorgerufen durch die Kombinatorik, die große Anzahl an möglichen Datentypen und die erforderliche Gewichtung der Wertebereiche von Datentypen und Merkmalen, idealerweise durch den Einsatz von Data Mining.

Data Mining Verfahren wurden im Rahmen von Variantenmanagement bereits erfolgreich zur Modularisierung von Produktarchitekturen eingesetzt [11]. Eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik des Data Minings gibt [14].

4.3 Implementierung in die Prozess- und Datenlandschaft

Der Erfolg der vorgestellten Vorgehensweise hängt von der durchgängigen Bereitstellung von unterstützenden Daten-, Bewertungs- und Entscheidungsmodellen ab. Daher bestehen große Synergiepotentiale mit dem derzeit intensiv beforschten Ansatz des Model Based Systems Engineering. Dieser wurde bereits forschungsseitig bezüglich der Einsetzbarkeit in den Bereichen Anforderungsmanagement [15, 16], Funktionsentwicklung [17], Variantenmanagement [18] sowie im klassischen Controlling [19] untersucht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Herausforderungen der heutigen Produktentwicklung sowie neue Material- und Fertigungstechnologien erhöhen die Attraktivität von Produkten mit integraler Produktarchitektur. Damit diese Produkte erfolgreich eingesetzt werden können, muss die resultierende Varianz und deren Auswirkungen auf Wirtschaftlichkeit des Produktentwicklungsprozesses steuer- und bewertbar gemacht werden. Herkömmliche Ansätze des Variantenmanagements sind dafür nicht geeignet, da sie auf modularisierbare Produktarchitekturen angewiesen sind. Eine Ausweitung der Betrachtung auf die Ebene der Bauteilmerkmale hat das Potential die Varianzsteuerung integraler Produkte zu ermöglichen, da sich aufgrund dieser Erweiterung eine höhere funktionale Unabhängigkeit der Zuordnung zwischen Funktionen und Merkmalen ergibt. Nachteil dieser Erweiterung ist eine exponentiell steigende Kombinatorik und Komplexität im Entwicklungsprozess, die aber durch Methoden des Data Mining beherrscht werden können. Die Frage, ob und wie eine solche Varianzsteuerung im Unternehmenskontext durch robuste Prozesse sowie durchgängige Daten- und Evaluierungsmodelle zu einer Verbesserung der wirtschaftlichen Wertschöpfung eines integralen Produktportfolios führen kann, wird am ikt intensiv beforscht und in Industriekooperationen evaluiert.

Literatur

- [1] SCHUH, Günther; VARNHAGEN, Volkmar (Hg.). Fokus Automobilindustrie: Digitale Wertschöpfungsnetzwerke im Werkzeugbau. Apprimus Verlag, 2013.
- [2] Schmitt, R.; Amini, P.; Bergholz, M.; Falk, B.; Humphrey, S.; Müller, C.; Schill, E.; Schwiderek, O.; Steinmeier, B.: Anforderungsmanagement 4.0 - Robuste Spezifikation in turbulentem Umfeld. In: Integrative Produktion: Industrie 4.0, Aachener Perspektiven. Tagungsband: Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium AWK, 22. bis 23. Mai 2014, Aachen.
- [3] Knauss, A., Damian, D., & Schneider, K. (2014, August). Eliciting contextual requirements at design time: A case study. In Empirical Requirements Engineering (EmpiRE), 2014 IEEE Fourth International Workshop on (pp. 56-63).
- [4] Jörg Feldhusen, Erwin Nurcahya, 2007: Ableitung einer Produktvariante aus einer Referenzvariante. In: Ralph Stelzer, Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen, Frank Rieg, Klaus Brökel, 5. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2007, S. 179-187. Dresden.
- [5] Franke, H.-J.; Hesselbach, J.; Huch, B.; Firchau, N.L.; Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2002.
- [6] Baumgart, I., Modularisierung von Produkten im Anlagenbau. Aachen, RWTH, Diss., 2004.
- [7] Budino, H.D.S.; Kiswanto, G.; Soemardi, T.P.: Method and model development for manufacturing cost estimation during the early design phase related to the complexity of the machining processes. In: International Journal of Technology 5 (2), S. 183-192, 2014.

- [8] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [9] Jörg Feldhusen, Erwin Nurcahya, 2007: Ableitung einer Produktvariante aus einer Referenzvariante. In: Ralph Stelzer, Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen, Frank Rieg, Klaus Brökel, 5. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2007, S. 179-187. Dresden.
- [10] Kevin Schmitz, Johannes van der Beek, Jörg Feldhusen, 2014: Entwicklung kontextsensitiver Standards in modularen Produktplattformen. In: Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess; 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014, 16. - 17. Oktober 2014 in Bayreuth / Hrsg. Klaus Brökel, S. 63-72. Bayreuth: Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD.
- [11] Johannes van der Beek, Kevin Schmitz, Walter Schmidt, Jörg Feldhusen, 2015: Konfigurationsgestützte Modularisierung variantenreicher Produkte mittels Clusteranalyse. In: Klaus Brökel, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Norbert Müller, Frank Rieg, Ralph Stelzer, 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2015, Clausthal.
- [12] Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, 2013: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung / Jörg Feldhusen; Karl-Heinrich Grote (Hrsg.). Berlin: Springer Vieweg.
- [13] Göpfert, Jan. "Modulare Produktentwicklung." Innovationsforschung und Technologiemanagement. Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [14] Runkler, Thomas A. Data Mining: Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse. Springer-Verlag, 2015.
- [15] Eigner, M.; Dickopf, T.; Huwig, C.: An Interdisciplinary Model-Based Design Approach for Developing Cybernetic Systems. In: The Design Society: DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. Glasgow: Design Society, 2016.
- [16] Nicklas, J.-P. G.; Ansatz für ein modellbasiertes Anforderungsmanagement für Unternehmensnetzwerke, Bergische Universität Wuppertal, Shaker Verlag, Aachen, 2016.
- [17] UMLdesigner: graphical tooling to edit and visualize UML models. URL <http://www.uml designer.org/> – Überprüfungsdatum 2017-05-19.
- [18] Albers, A.; Moeser, G.: Modellbasierte Prinzip- und Gestaltvariation. In: Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Rieg, F.; Stelzer, R.; Köhler, P.; Müller, N.; Scharr, G. (Hrsg.): Tagungsband Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion. Rostock, 2016 (14), S. 96–104.
- [19] Isaksson, O.; Bertoni, M.; Hallstedt, S. Lavesson, N.: MODEL BASED DECISION SUPPORT FOR VALUE AND SUSTAINABILITY IN PRODUCT DEVELOPMENT. In: The Design Society (Hrsg.): Design for X, design to X. Glasgow: Design Society, 2015.

Modellbasierte KBE-Methodenentwicklung im Bereich der konstruktionsbegleitenden Simulation

René Andrae, Peter Köhler

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

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

Inhalt: In diesem Beitrag wird eine allgemeine Methode zur Erstellung von KBE-Unterstützungssystemen zur wissensbasierten Absicherung konstruktionsbegleitender Simulationen vorgestellt. Anhand ausgewählter Problemstellungen und dem Stand der Technik werden allgemeine Anforderungen ermittelt, welche in die darauffolgende Vorstellung der dreistufigen modellbasierten Methode einfließen. Anschließend wird eine exemplarische Anwendung des Ansatzes auf eine ausgewählte Problemstellung dargestellt.

Abstract: Content of this paper is a general methodology for the developing of KBE-Systems for the knowledge-based safeguarding of simulations during the design process. Based on selected problems and the state of the art, general requirements are determined, which are incorporated into the subsequent concept of the three-stage model-based method. An exemplary application of the approach is then presented in a case study.

Stichwörter: Wissensbasierte Konstruktion (KBE), Konstruktionsbegleitende Simulation, Modellbasierte Systementwicklung (MBSE)

Keywords: Knowledge-based Engineering (KBE), Simulation during the design process, Modelbased Systems Engineering (MBSE)

1 Einleitung

Konstruktionsbegleitende Simulationen werden vom Konstrukteur durchgeführt und sollen den eigentlichen Berechnungsexperten entlasten. Viele Hersteller von CAD-Systemen haben diesen Trend erkannt und bieten zu ihren CAD-System eine integrierte Simulationsumgebung an, welche untereinander verknüpft sind. Eine genaue Betrachtung zeigt den unzureichenden Grad der Verknüpfung dieser Disziplinen und die Notwendigkeit neuer Methoden zur Optimierung dieser auf. Neue Methoden erfordern an dieser Stelle oft ein domänenübergreifendes Unterstützungssystem für den Konstrukteur. In diesem Beitrag wird eine allgemeine Vorgehensweise für eine modellbasierte Entwicklung eines solchen Knowledge-based Engineering (KBE)-Systems, mit dem Fokus auf die Prozesskette CAD-CAE, vorgestellt.

2 Stand der Technik

Die Unterstützung des Konstrukteurs bei der Durchführung von Simulationen und Optimierungen durch moderne KBE-Methoden ist und bleibt ein wichtiges Forschungsthema. Es wird aufgezeigt, dass die Absicherung der Multidisziplinarität und der Händelbarkeit von fortgeschrittenen Simulationen durch wissensbasierte Unterstützungssysteme ein oft verwendeter Ansatz ist [1, 2, 3]. Die verwendeten Methoden zur Erstellung sind dabei individuell.

Eine allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung eines KBE-Systems ist in der VDI 5610 Blatt 2 [4] enthalten. Die Wissensakquise und die Schaffung der Wissensbasis bilden die Basis jeder KBE-Methode. Das Wissen, welches personengebunden beim Konstrukteur und Berechner liegt, muss extrahiert und strukturiert werden. Techniken zur Wissenserhebung, für explizites und implizites Wissen, sind in unterschiedlichen Literaturquellen, wie [5] zu finden. Bekannte Methoden zur Wissensstrukturierung sind MOKA [6] und CommonKADs [7].

Für die Entwicklung neuer Unterstützungsmethoden an der Schnittstelle CAD/CAE kann zusammengefasst werden, dass bisher eine praktische Methode zur Erstellung komplexer Unterstützungssysteme fehlt. Eine modellbasierte Betrachtungsweise bietet sich gerade bei komplexen Systemen an. Damit kann auch eine Lesbarkeit für programmiererunfähige Anwender sichergestellt werden, damit diese effizient an der Systementwicklung mitwirken können. Für die Wissenstransformation muss eine geeignete Methode gewählt werden, um eine effiziente Wissenstransformation zu gewährleisten.

3 Methode

Im Folgenden wird eine allgemeine Methode zur Erstellung von KBE-Unterstützungssystemen zur wissensbasierten Absicherung konstruktionsbegleitender Simulationen vorgestellt. Fokussiert wird dabei auf die Anforderungsentwicklung, die Beschreibung des dreistufigen Ansatzes und eine Validierung durch eine praktische Anwendung.

3.1 Anforderungsentwicklung

Zur Entwicklung der Rahmenbedingungen der Methode werden im Folgenden Anforderungen zusammengefasst, vgl. Bild 1. Der Methode werden vier allgemeine Anforderungen zu-

geordnet. Am Entwicklungsprozess sind immer mindestens drei Rollen beteiligt: Ein Wissensingenieur, ein Konstrukteur und ein Berechnungsexperte. Diese Rollen können teilweise fließend sein [4]. Eine frühe Einbeziehung aller am Entwicklungsprozess beteiligten Personen soll durch einen transparenten Prozess gewährleistet werden. Eine Forderung nach einer rechtlichen Absicherung geht auf einen Vergleich zurück: analytische Berechnungsverfahren sind rechtlich abgesichert, numerische Verfahren dagegen nicht [8]. Durch einen nachvollziehbaren Aufbau des Unterstützungssystems soll dem entgegengewirkt werden.

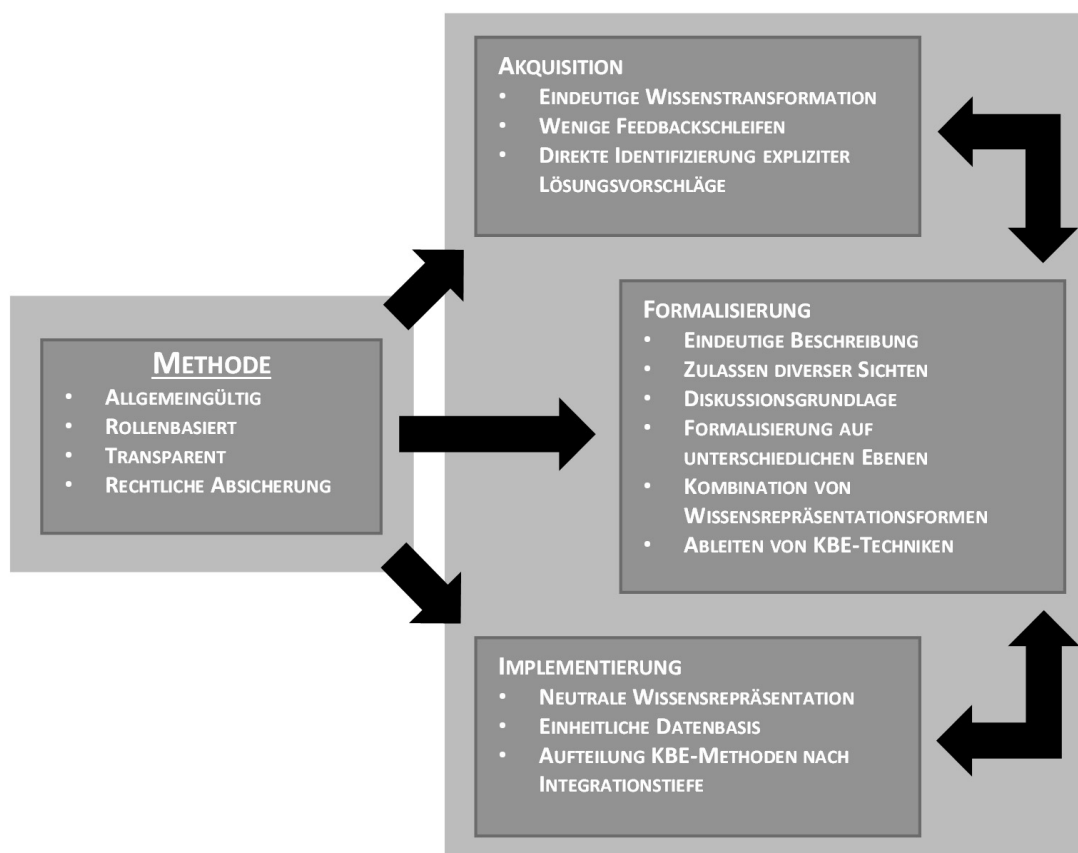


Bild 1: Anforderung an die Methode

Weiterhin wird die Methode in drei Bausteine aufgeteilt: Die Akquisition, die Formalisierung und Implementierung. Eine eindeutige Wissenstransformation zu einem frühen Zeitpunkt beschleunigt die Entwicklung eines wissensbasierten Systems ungemein und verhindert unnötige Iterationen. Dies begründet ebenfalls die Forderung nach möglichst wenigen Iterationen zur Wissensakquisition zwischen dem Wissensingenieur und beteiligten Personen. Eine weitere wichtige Anforderung an die Methode ist die direkte Identifizierung expliziter

Lösungsvorschläge aus der gegebenen Form der Dokumentation. Dies kann durch den Wissensingenieur oder auch andere beteiligte Personen geschehen.

Eine wichtige Anforderung zur Formalisierung ist eine eindeutige Beschreibung des Systems. Eine Lesbarkeit für programmierunerfahrene Anwender wird ebenfalls gefordert. Dies impliziert auch die Definition unterschiedlicher Sichten auf das System, da dies so als Diskussionsgrundlage verwendet werden kann, was die weitere Einbeziehung aller Beteiligten unterstützt. Dies wird bestärkt durch eine Forderung nach einer Formalisierung des Systems auf unterschiedlichen Ebenen (Funktion, Anforderungen, Struktur). Alle aufgeführten Anforderungen sind hinreichend für eine vollständige Formalisierung des Systems. Weitere Anforderungen sind das direkte ableiten passender Wissensrepräsentationsformen und KBE-Techniken. Dies sichert zum einen eine strukturierte Vorgehensweise des Programmierers ab, zum anderen sind die am Entwicklungsprozess beteiligten Personen dadurch gezwungen, die Formalisierung des Systems dahingehend aufzubereiten.

Die Implementierung des Systems, unabhängig ob integriert oder gekoppelt, ist die Aufgabe des Programmierers. Die Anforderung bei der Formalisierung nach einem direkten Ableiten einer passenden KBE-Technik erfordert vom Programmierer ein gewisses Verständnis über die unterschiedlichen KBE-Techniken im CAD- und CAE-System. Gefordert ist an dieser Stelle eine Aufteilung der KBE-Methoden nach Integrationstiefe, an welcher sich der Programmierer orientieren kann. Eine bestmögliche Pflege und Wartung des Systems ist möglich, wenn die Datenbasis einheitlich und neutral vorliegt. Dies geht in die Forderung nach einer neutralen Wissensrepräsentation über.

3.2 Methodische Vorgehensweise

Die klassischen Elemente bei der Entwicklung wissensbasierter Systeme im Bereich der virtuellen Konstruktion sind die Erstellung einer Wissensbasis und die Implementierung in die CAD-Umgebung. Die Notwendigkeit nach einer eindeutigen Formalisierung, gerade bei komplexen Systemen, mit allen am Prozess beteiligten Personen wurde aufgezeigt. Dementsprechend wird den beiden Elementen ein drittes, die Systementwicklung zugeordnet (Bild 2).

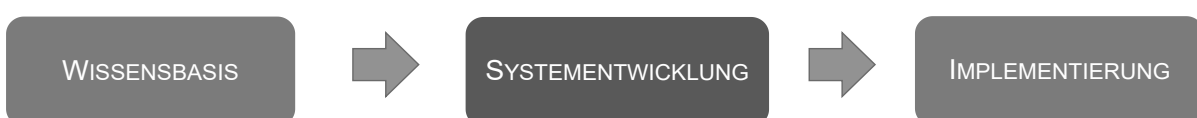


Bild 2: dreistufige Vorgehensweise

Das erste Element ist und bleibt die Erstellung einer Wissensbasis. Die Wissensakquisition, die auch problemspezifische Besonderheiten berücksichtigen muss, ist dabei eine Voraussetzung für die Qualifizierung des Modellbildungsprozesses. Die Formalisierung des expliziten Wissens erfolgt durch Methoden aus der Systementwicklung, welche u. a. im Stand der Technik vorgestellt wurden. Die Umsetzung erfolgt durch moderne KBE-Methoden.

3.2.1 Erstellung der Wissensbasis

Die Grundlage für jede Methode ist eine Vorgabe von Wissen, welches in ein System implementiert werden muss. Dafür muss dieses aufbereitet werden, unabhängig davon ob dieses implizit oder explizit vorliegt. In [4] werden folgende Techniken beschrieben und zusammengefasst:

- Interviewtechniken,
- Textanalysen,
- Beobachtungstechniken,
- Reviewtechniken.

Interviewtechniken, wie auch die Beobachtungstechniken zeichnen sich über einen direkten Dialog des Wissensingenieurs und des Experten aus, also der Wissensumwandlung. Die Techniken der Textanalysen dienen der Extraktion von relevanten Wissen aus Lehrbüchern, Normen und Richtlinien alleine durch den Wissensingenieur. In dem zu entwickelnden Ansatz wird als Methode eine modifizierte FMEA verwendet. Eine FMEA stellt oft die erste Explikation von impliziten Wissen dar [9]. Das Wissen über fehlerrelevante Zusammenhänge wird in FMEA-Formularen gesammelt. In Bild 3 ist der modifizierte Aufbau eines FMEA-Formulars dargestellt.

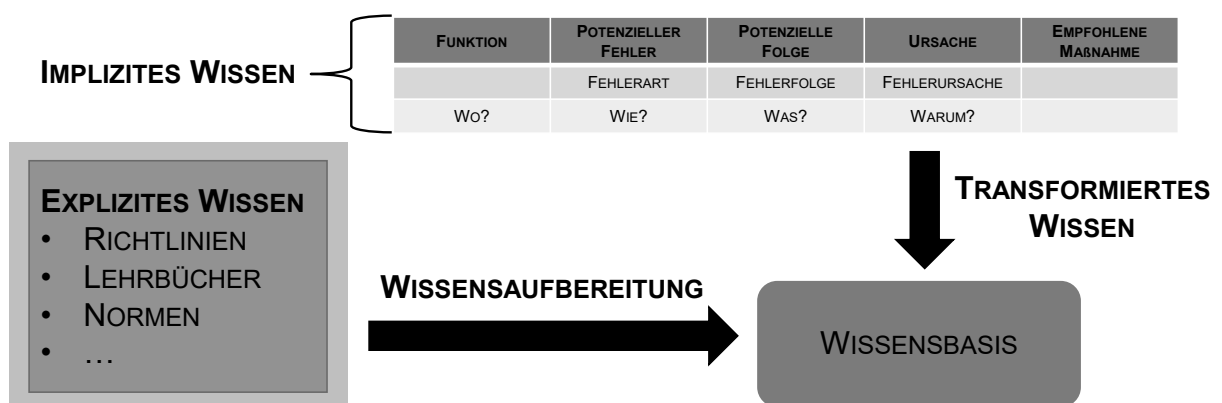


Bild 3: Erstellen der Wissensbasis

Vom Anwender ist gefordert, dass er ein solches Formular hinsichtlich einer abgeschlossenen oder neuen Problemstellung ausfüllt. Die daraus empfohlenen Maßnahmen zeigen explizite Lösungsansätze auf. Diese werden dann neben von vornherein explizit vorliegenden Gestaltungs- und Konstruktionsregeln in der Wissensbasis abgelegt. Ein positiver Nebenaspekt ist, dass durch die Anwendung einer FMEA der gesamte Prozess transparent wird. Gerade in Bezug auf die zuvor geforderte rechtliche Absicherung bei numerischen Berechnungen ist dies hervorzuheben.

3.2.2 Systementwicklung

Für die Systementwicklung wird die Modellierungssprache SysML verwendet. An der Entwicklung des Systems sind mindestens drei Personen in einem Team beteiligt, siehe auch Bild 4. Der Systementwickler ist als Projektleiter gekennzeichnet und kann über den dargestellten Input aus Schritt 1, mit der Erstellung des grundlegenden Systemmodells in Schritt 2 beginnen.

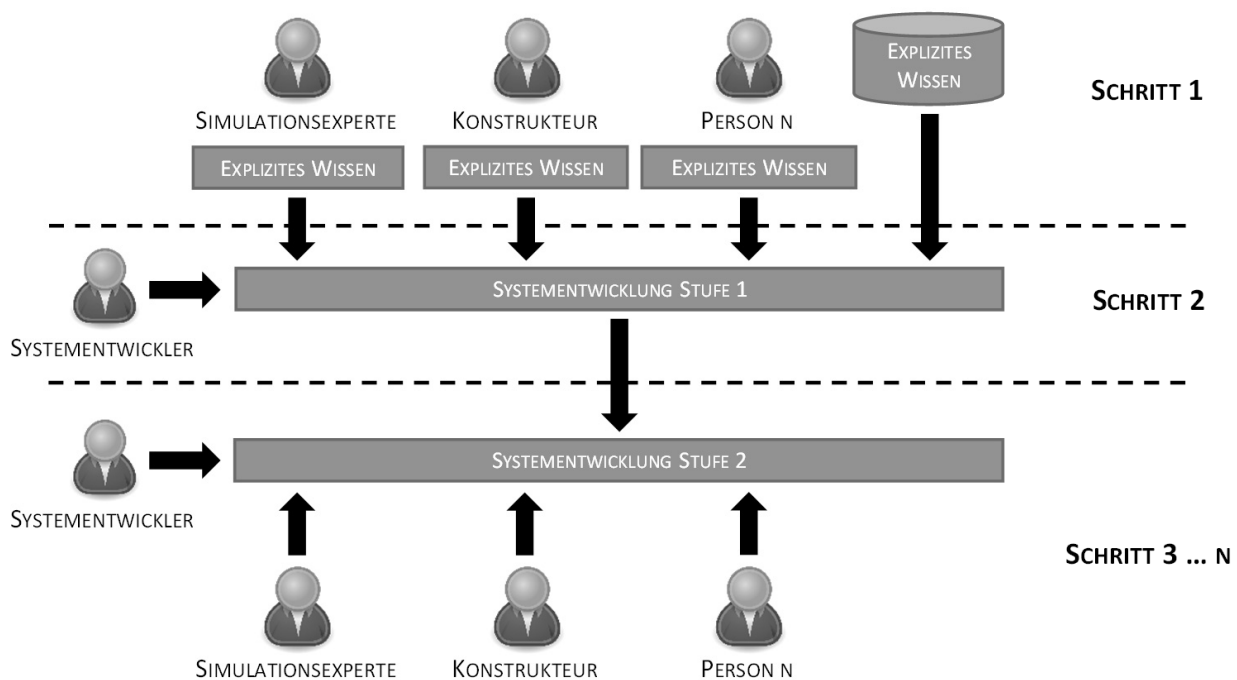


Bild 4: Erstellung des Systemmodells

Der Input sind die erstellten FMEA's und das bereits explizit vorliegende Wissen in Form von Standards, Normen, etc. Die unterschiedlichen Sichten auf Informationen gewährleisten die geforderte Diskussionsbasis, um den Berechner und Konstrukteur in die Entwicklung

des Systems mit einzubeziehen, gekennzeichnet als Schritt 3. Nach einer bestimmten Anzahl von Feedbackschleifen ist die Systementwicklung abgeschlossen. Sind mehrere Lösungsansätze vorhanden, soll eine Abschätzung des Aufwands/Nutzens durch alle Anwender erfolgen und es muss sich in der ersten Feedbackschleife auf einen Ansatz geeinigt werden.

Der Ansatz sieht vor, dass der Systementwickler in der ersten Stufe der Systementwicklung aus der zuvor erstellten FMEA, Anforderungslisten und weiteren explizit vorliegende Daten zu Rand- und Lastbedingungen die ersten grundlegenden Diagramme modelliert. In den meisten Fällen werden zu Beginn Paketdiagramme, Anforderungsdiagramme, Blockdefinitionsdiagramme und Anwendungsfalldiagramme definiert. Mit diesen Diagrammtypen sind die grobe Struktur wie auch die Anforderungen an das System beschrieben. Aus diesen und der zuvor entwickelten Wissensbasis lassen sich im Weiteren funktionale Abläufe herleiten. Diese werden zumeist in Aktivitätsdiagrammen beschrieben. Dies alles bildet die Grundlage für erste Feedbackschleifen in der zweiten Stufe. Aus den Schleifen und weiteren Detaillierungen ergeben sich dann weitere Diagrammtypen. Durch die unterschiedlichen Diagrammtypen (Sichten) ist die Definition gängiger Wissensrepräsentationsformen und die Kombination untereinander abgesichert.

3.2.3 Implementierung

Die Implementierung in ein CAD/CAE-System erfolgt über unterschiedliche KBE-Techniken. Der Einsatz der Techniken ist anwendungsspezifisch und erfordert eine weitergehende Einteilung nach bestimmten Kriterien, wie z. B. die Integrationstiefe oder eine gewünschte/geforderte Wissensrepräsentationsform. Abhängig von dem im Kapitel zuvor erstellten System werden vom Systementwickler die passenden Techniken zur simulationsgerechten Absicherung gewählt. Eine Auswahl möglicher Techniken sind:

- Feature-Techniken,
- Regelbasierter Modellaufbau,
- Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung,
- Schnittstellenprogrammierung.

Die Wertigkeit der Absicherung ist abhängig von Umfang der Integrationstiefe der jeweiligen Technik. Die Wertigkeit kann dabei als Indikator für den Informationsgrad definiert werden.

Die Wissensbasis ist meist lokal auf dem Rechner des Anwenders, z. B. im CAD-System selbst, vorhanden. Innerhalb der Recherche zum Stand der Technik wurden unterschiedliche Techniken zur Wissensbereitstellung identifiziert. Einige davon sind:

- der Parametereditor in CAD-System,
- der Beziehungseitor im CAD-System,
- im Quellcode im Falle der Anwendungsprogrammierung,
- in externer Software,
- in einer Datenbank.

Eine wichtige Anforderung ist eine Trennung der Wissensbasis und der Wissensrepräsentation. Damit wird eine systemneutrale Wissensbereitstellung abgesichert.

4 Anwendungsbeispiel

Der dargestellte Ansatz zur wissensbasierten Absicherung konstruktionsbegleitender Simulationen wird im Folgenden validiert. Dazu werden die gezeigten Methoden im Rahmen eines am Lehrstuhl „Rechnereinsatz in der Konstruktion“ der Universität Duisburg-Essen bearbeiteten Forschungsprojektes angewendet. Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation mit dem Lehrstuhl „Konstruktion und Kunststoffmaschinen“ ebenfalls der Universität Duisburg-Essen.

Der Ursprung des Projektes liegt in der fehlenden Unterstützung des Konstrukteurs beim spritzgussgerechten Bauteilentwurf. 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.

Der Konstrukteur soll dabei die meiste Zeit seine gewohnte CAD-Umgebung nicht verlassen müssen. Falls dies unumgänglich ist, soll die Interaktion mit anderen System für den Konstrukteur so angepasst werden, dass eine Bedienung durch ihn, hinsichtlich des Fokus auf konstruktionsbegleitende Simulationen, ohne große Einarbeitung und Schulung möglich ist. Das Wissen, welches zur Erstellung des beschriebenen Systems benötigt wird, wird Richtlinien, Normen und Lehrbüchern entnommen und aufbereitet, wie auch durch zuvor beschriebene Techniken zur Wissenstransformation bereitgestellt. Darauf aufbauend wurde

mit der Systementwicklung begonnen. Die ersten Diagramme beschreiben die grundlegende Struktur des Projektes, vgl. Bild 5.

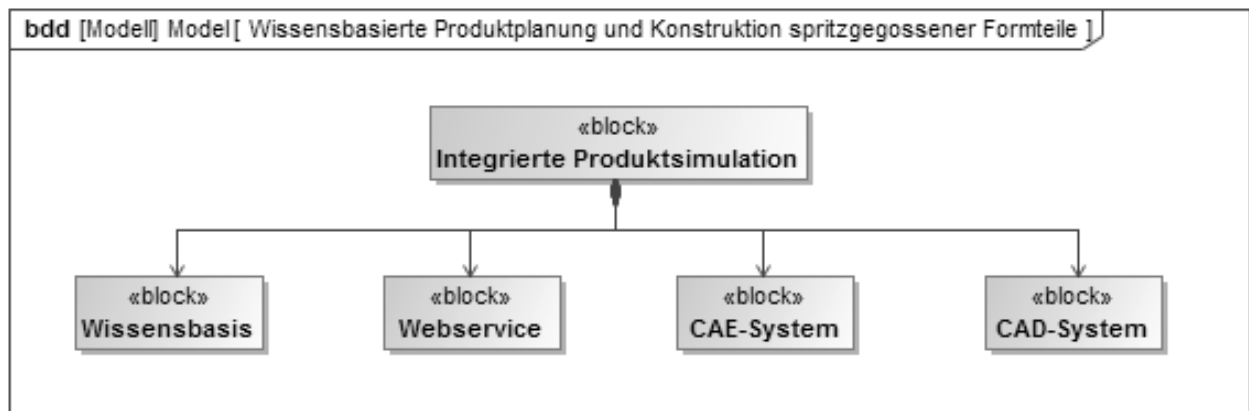


Bild 5: Grundlegende Struktur des entwickelten Systems

Die Struktur des Projektes ist aufgeteilt in 4 Blöcke, dargestellt im Blockdefinitionsdiagramm. Dieses Diagramm beschreibt den Aufbau des gesamten Systems. Hieraus lassen sich alle weiterhin zu erstellenden funktionalen Beziehungen, Funktionsabläufe etc. ableiten. Datentechnische Verknüpfungen werden im internen Blockdiagramm dargestellt. Eine grobe Übersicht über das Verhalten des zu entwickelten Systems ist in einem Anwendungsfalldiagramm zusammengefasst. Vorgehensweisen, wie die anzuwendende Modellierungsmethodik, werden in Aktivitätsdiagrammen zusammengefasst. Aktivitätsdiagramme werden zu meist auch für zu entwickelnde Feature verwendet. Sie geben in strukturierter Form den Ablauf einer Aktivität an. Eine Übersicht über die angesprochenen Diagramme ist in [10] zu finden. Bekannte Wissensrepräsentationsform können dargestellt werden. Die Implementierung des formalisierten Systems erfolgt dann durch den Programmierer. In diesem Falle ist die Verwendung einer gegebenen API notwendig. U. a. deshalb, da neue Feature im CAD-System erstellt werden müssen.

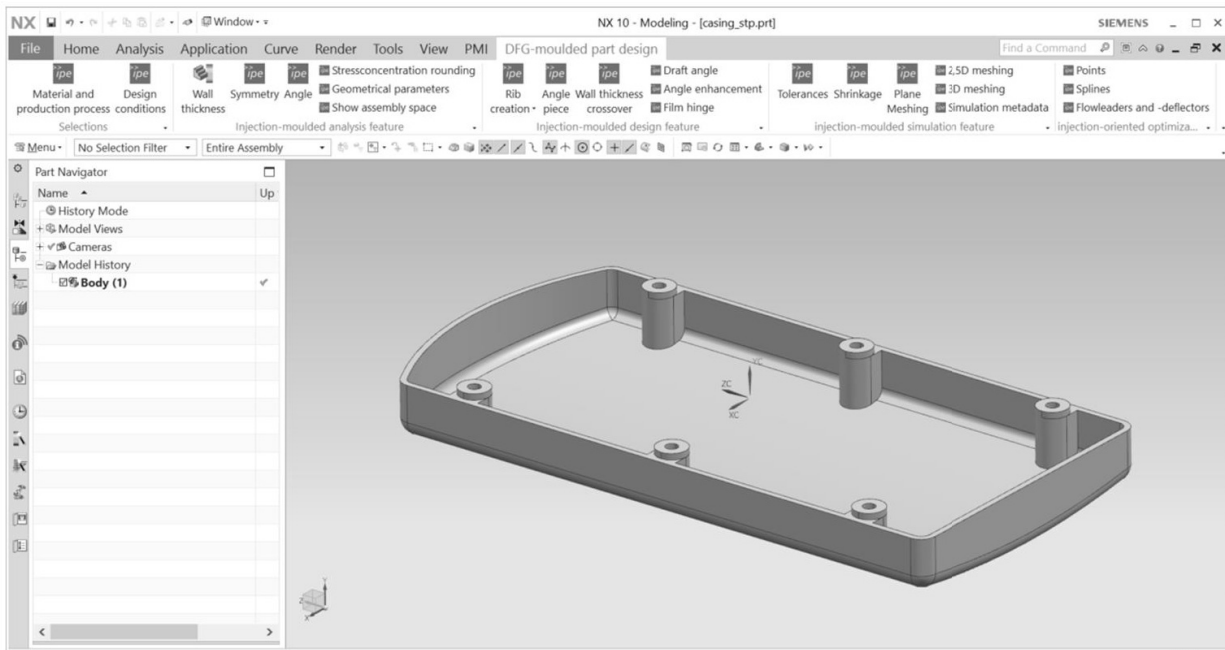


Bild 6: Unterstützungssystem für den Konstrukteur beim spritzgussgerechten Bauteilentwurf

Mit Projektende wurde ein integriertes KBE-System erstellt, welches einer ganzheitlichen Unterstützung des Konstrukteurs beim spritzgussgerechten Bauteilentwurf dient, vgl. Bild 6. Die Validierung des Systems erfolgte am Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion. Mit der Erreichung deutlich kürzerer Entwicklungszeiten wurde ein wichtiges Ziel erreicht.

5 Fazit

In diesem Beitrag wurde eine allgemeine Vorgehensweise dargestellt, wie Unterstützungssysteme an der Prozesskette CAD-CAE erstellt werden können. Die dreistufige Methode teilt sich auf Techniken zur Erstellung einer Wissensbasis, die Formalisierung durch Techniken der MBSE und die Implementierung ins CAD-System auf. Geleitet wird die Entwicklung durch einen Systementwickler. Die Vorgehensweise sieht vor, dass alle am Entwicklungsprozess beteiligten Personen (Rollen) mit in die Systementwicklung einbezogen werden. Die Methode wurde u. a. an einem aktuellen Forschungsprojekt, des Lehrstuhls Rechnereinsatz in der Konstruktion, angewendet, welches im Beitrag vorgestellt wurde.

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

Literatur

- [1] 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
- [2] Boussuge, Flavien; Shahwan, Ahmad; Leon, Jean-Claude; Hahmann, Stefanie; Foucault, Gilles; Fine, Lionel: Template-based Geometric Transformation of a Functionally Enriched DMU into FE Assembly Models. In: Computer-Aided Design and Applications 11 (4), 2014, S. 436–449.
- [3] Klemme, Uwe: Methoden zum wissensbasierten Aufbau simulationsorientierter Produktmodelle. Dissertation Universität Duisburg-Essen. Göttingen: Cuvillier Verlag. 2015.
- [4] VDI Richtlinie 5610 Blatt 2. Verein Deutscher Ingenieure. 2017. Beuth Verlag. Berlin.
- [5] Arbeitspapiere der GMD 338: Methoden und Techniken des Knowledge Engineering. Hrsg.: Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung MBH.1998.
- [6] Stokes, Melody: Managing Engineering Knowledge: MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Applications. 2001. - ISBN: 1860582958
- [7] Schreiber, Guus; Crubézy, Monica; Musen, Mark: A Case Study in Using Protege-2000 as a Tool for CommonKADS. In: Knowledge Engineering and Knowledge Management. Methods, Models, and Tools: 12th International Conference, EKAW 2000, Juan-les-Pins, France, October 2-6, 2000 Proceedings.
- [8] Kesselmanns, Christoph: Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse. Dissertation Universität Duisburg-Essen. Göttingen: Cuvillier Verlag. 2014.
- [9] Dittmann, Lars Uwe: OntoFMEA: Ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Dissertation. Universität Duisburg-Essen. Springer Verlag. 2007.
- [10] Andrae, René; Köhler, Peter: Knowledge Based Support for the Designer at the Interface of CAD/CAE. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 6: Design Information and Knowledge, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017.

CAD-integrierte Modellierung von Gitterstrukturen für Additive Fertigung

Peter Koch, Jonas Lindemann, Richard Kordaß*, Hannes Korn*, Christine Schöne, Ralph Stelzer

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Technische Universität Dresden

Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD

George-Bähr-Str. 3c, 01069 Dresden

Email: peter.koch@tu-dresden.de

Internet: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm/ktc>

*Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Nöthnitzer Str. 44, 01187 Dresden

Email: richard.kordass@iwu.fraunhofer.de; Internet: <https://www.iwu.fraunhofer.de/>

Inhalt: In diesem Paper wird ein Tool vorgestellt, welches die Erstellung von komplexen Gitterstrukturen für die Additive Fertigung direkt in der CAD-Umgebung ermöglicht. Die Daten werden von der Gittererstellung über die Festigkeitsberechnung bis zur Schichtdatengenerierung in einem eigens entwickelten Framework gespeichert. Zusätzlich wurden an ausgewählten Probekörpern Zugversuche durchgeführt.

Abstract: In this paper a tool is presented which enables the user to directly create complex lattice structures for Additive Manufacturing in a CAD-environment. A custom framework is used to store all generated data from lattice creation to stiffness computation to slicing information. Additionally, tensile tests were executed with selected specimens.

Stichwörter: Additive Fertigung, Gitterstrukturen, CAD, Zugversuch.

Keywords: Additive Manufacturing, Lattice Structures, CAD, Tensile Test

1 Einleitung

Additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing, AM) bietet dem Konstrukteur einen unschlagbaren Vorteil: die nahezu vollständige Gestaltungsfreiheit. Restriktionen, die sich durch die konventionellen Verfahren wie Gießen und Zerspanen ergeben, spielen keine Rolle mehr. Dadurch ist es möglich, die Komplexität der Bauteil-Geometrie um ein Vielfaches zu erhöhen, Funktionen zu integrieren und Eigenschaften maßzuschneidern.

Besondere geometrische Komplexität besitzen dreidimensionale Gitterstrukturen, die als eine große Anzahl miteinander verbundener Stäbe schnell mehrere tausend Geometrieelemente umfassen können. Bei der herkömmlichen, volumengestützten Konstruktion dieser

Strukturen kommen selbst moderne CAD-Systeme auf leistungsfähigen Workstations rasch an ihre Leistungsgrenze.

In dieser Arbeit wird daher ein Tool vorgestellt, welches die gewohnte, volumenbasierte Arbeitsweise des Konstrukteurs als Ausgangspunkt nimmt und eine benutzerfreundliche Erstellung von Gitterstrukturen direkt im CAD-System ermöglicht. Ebenso Bestandteile des Tools sind eine Übergabe an ein FEM-Programm zur Simulation der mechanischen Eigenschaften sowie ein Slicer zur direkten Ausleitung der Prozessdaten für die schichtbasierte Fertigung.

Zur Validierung der Ergebnisse erfolgt die Fertigung mittels Laserstrahl-Schmelzen und Zugprüfung ausgewählter Testkörper in Anlehnung an den Normentwurf DIN 50099.

2 Datenstruktur

Wie die meisten zellularen Materialien lassen sich auch Gitterstrukturen auf die Wiederholung eines einzelnen repräsentativen Volumenelements reduzieren. Dieses Element wird auch Einheitszelle genannt, ist üblicherweise hexaedrisch und enthält gerade so viel Geometrie, wie zur vollständigen Charakterisierung der kompletten Struktur notwendig ist [1].

Entsprechend besteht der Kern der Datenstruktur aus einer Liste aller Einheitszellen und den Informationen über die jeweiligen Nachbarschaften. Dabei können nicht nur Gitterstrukturen gespeichert werden, sondern beliebige zelluläre Materialien, solange sie sich durch eine hexaedrische, parametrisierbare Einheitszelle beschreiben lassen.

Im Falle der Gitterstrukturen ist die Einheitszelle gefüllt mit Knoten (Nodes) und Stäben (Struts). Die Knoten stellen die Verbindungen zwischen den Stäben dar und sind mit ihrer Position sowie einer ID hinterlegt. Jeder Stab wiederum verbindet zwei Knoten und besitzt einen Radius sowie eine Teilung. Die Teilung ist nötig, da bei einigen Gittertypen Stäbe auf den Seitenflächen bzw. -kanten der Einheitszelle verlaufen und dadurch nur ein Segment des Stabes zu dieser Zelle gehört.

Der Vorteil dieser Datenstruktur ist die einfache Manipulierbarkeit des Gitters. So können rechenstechnisch günstig Stabradien verändert, Knoten verschoben und Stäbe gelöscht werden. Ebenfalls kann bei Bedarf eine Gradierung des Gitters über Änderung von Zellgrößen & -formen, Knotenpositionen und Stabradien eingeführt werden.

3 Gittergenerierung

Im aktuellen Entwicklungsstand ist das Tool in der Lage innerhalb des CAD-Systems SolidWorks homogene periodische Gitterstrukturen, also Strukturen mit konstantem Stabradius, in beliebige Bauteile zu integrieren. Um dem Konstrukteur eine hohe Benutzerfreundlichkeit zu bieten, erfolgt die Parametrisierung der Gitterstruktur sowohl anhand der Benutzeroberfläche des CAD-Systems als auch der grafischen Oberfläche des Tools. Die Verknüpfung der Gitterstruktur mit dem Bauteil erfolgt über das Trimmen-Verfahren, bei dem die Stäbe der Gitterstruktur an den Schnittpunkten mit der Hüllkontur durchtrennt und anschließend alle außerhalb des Hüllkörpers liegenden Stäbe gelöscht werden. Dieses Verfahren wurde gewählt, da es robust und uneingeschränkt anwendbar ist.

Grundsätzlich bietet das Tool dem Benutzer zwei Möglichkeiten, Gitterstrukturen in Bauteile zu integrieren (im Folgenden auch als Modi bezeichnet).

Der erste Modus (Bild 1 oben) basiert auf einem Wandungsbefehl und kann das komplette Bauteil füllen.

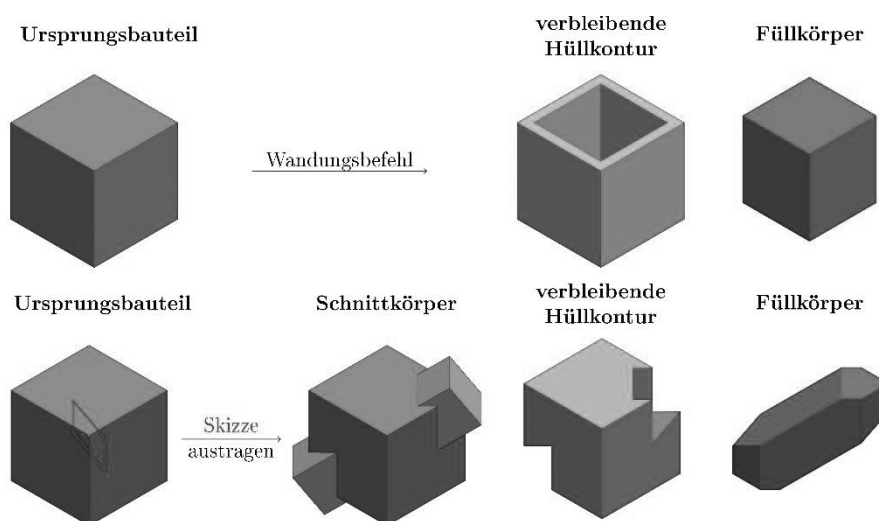


Bild 1: Modi zur Bestimmung des Füllvolumens – oben: per Wandungsbefehl; unten: über Austragung einer Skizze

Der zweite Modus (Bild 1 unten) basiert auf der Austragung einer beliebigen Skizze. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn nur bestimmte Bereiche des Bauteils mit Gitterstrukturen gefüllt werden sollen.

Neben der Auswahl eines Modus erwartet das Tool, dass die geometrischen Parameter der zu generierenden Gitterstruktur festgelegt werden. Dazu zählen die Orientierung der Struktur, welche durch die Selektion einer Referenzebene (Orientierungsebene) festgelegt wird,

die Größe der Einheitszelle je Achsenrichtung, der Stabradius und die Auswahl einer Zelltopologie.

Nachdem alle Parameter festgelegt wurden, kann die Erzeugung der Gitterstruktur beginnen. Im ersten Schritt wird dazu der Bereich, der mit Gitterstrukturen gefüllt werden soll, bestimmt. Dieser Bereich wird im Folgenden als Füllvolumen bezeichnet. Je nach Betriebsmodus läuft dieser Prozess unterschiedlich ab. Neben dem Füllvolumen wird auch die verbleibende Hüllkontur des Bauteiles ermittelt (Bild 1). Anschließend wird für das Füllvolumen eine Oriented Bounding Box (OBB) erzeugt, deren Achsen kollinear zu den Achsen des lokalen Koordinatensystems der Orientierungsebene ausgerichtet sind. Die OBB repräsentiert damit das Volumen, welches von der Gitterstruktur abgedeckt werden muss. Um im nächsten Schritt die tatsächlichen Abmaße der Gitterstruktur zu ermitteln, muss die OBB tesseliert werden. Die Auflösung richtet sich dabei nach der vom Benutzer festgelegten Größe einer Einheitszelle. Auf Basis des generierten Rasters könnte im Anschluss bereits eine Gitterstruktur erzeugt werden, indem an jedem Rasterelement eine Zelle erzeugt wird. Allerdings würden die Zellen der Gitterstruktur eine unterschiedliche Überdeckung mit dem Füllvolumen aufweisen.

Bei dem exemplarisch in Bild 2 a) dargestellten Raster würden die Zellen am linken und oberen Rand eine geringe Überdeckung aufweisen, als die Zellen am rechten und unteren Rand. Aus diesem Grund wird vor der Generierung der Zellen eine Zentrierung des Rasters bezüglich des Füllvolumens durchgeführt, siehe Bild 2 b). Die Bedeutung der Zentrierung nimmt allerdings mit kleinerem Zellgröße zu OBB-Größe Verhältnis ab.

Die Generierung der Zellen erfolgt im weiteren Verlauf nicht pauschal für alle Elemente des erzeugten Rasters. Stattdessen wird jedes Element auf eine Überschneidung mit dem Füllvolumen untersucht. Nur jene Zellen, die zumindest eine partielle Überschneidung aufweisen, werden anschließend erzeugt. Der Vorteil dieser Strategie besteht darin, dass beim Trimmen der Gitterstruktur lediglich die außenliegenden Zellen berücksichtigt werden müssen. Dies ermöglicht eine große Zeitersparnis.

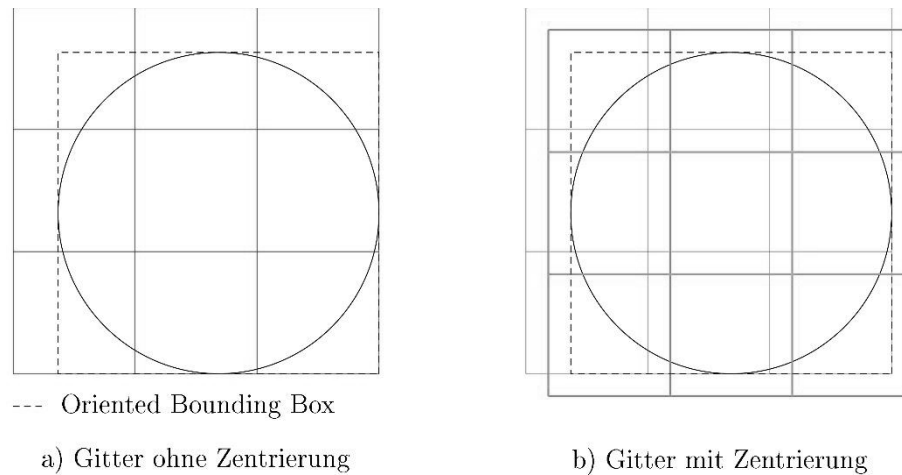


Bild 2: Gitterausrichtung

Im letzten Schritt muss schließlich eine Verknüpfung des Füllvolumens mit der Gitterstruktur hergestellt werden. Dies wird, wie bereits erwähnt, durch das Trimmen ermöglicht. Dabei wird jeder Stab einer Außenzelle auf Überschneidungen mit dem Füllvolumen untersucht. Stäbe bleiben erhalten, sofern sie komplett innerhalb des Füllvolumens liegen. Im Gegensatz dazu werden sie vollständig entfernt, wenn sie sich außerhalb des Füllvolumens befinden (siehe rot markierte Stäbe in Bild 3 b).

Sollte eine partielle Überschneidung des Stabes mit dem Füllvolumen existieren, gilt es eine Stabverkürzung durchzuführen. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden. Wird der zu verändernde Knoten lediglich durch einen Stab verwendet, so kann die Stabverkürzung durch Verschiebung des Knotens realisiert werden. Diese Methode funktioniert nicht, wenn der Knoten auch durch andere Stäbe verwendet wird, da eine Verschiebung des Knotens automatisch zu einer Lageveränderung der anderen Stäbe führen würde. In diesen Fällen muss die Stabverkürzung stattdessen durch die Erzeugung eines neuen Knotens erfolgen, siehe Bild 3 b). Das Ergebnis des Trimmen-Verfahrens für das illustrierte Beispiel ist in Bild 3 c) dargestellt.

Nachdem die Gitterstruktur erzeugt wurde, wird sie durch eine 3D-Skizze im CAD-System visualisiert, um dem Konstrukteur einen Eindruck des Ergebnisses zu vermitteln.

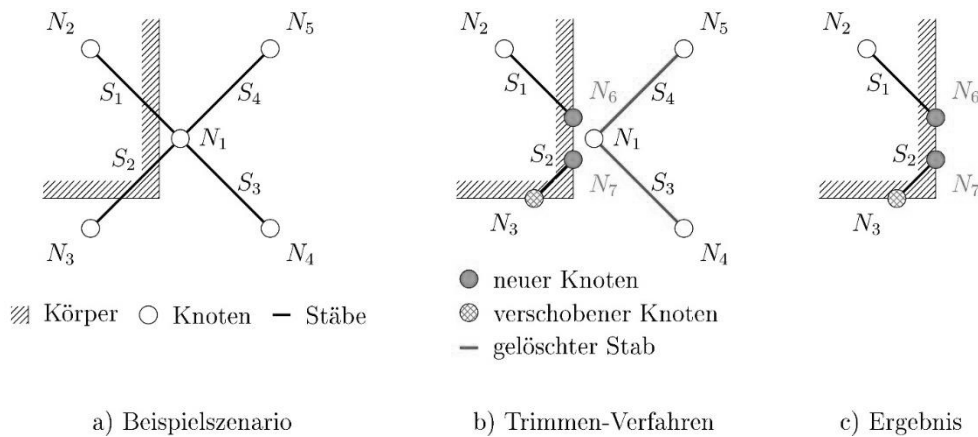


Bild 3: Ablauf des Trimmen-Verfahrens

4 Berechnungsstrategie

Genau wie mit konventionellen Verfahren gefertigte Teile, müssen gedruckte Gitterstrukturen die im Einsatz auftretenden Belastungen ertragen können. Durch die nahezu unbeschränkten Kombinationsmöglichkeiten von Material, Topologie und Stabdurchmessern ist eine quantitative Aussage bezüglich der Belastbarkeit einer Struktur meist nur mittels computergestützter Berechnung möglich.

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) bietet sich hier als ein seit Jahrzehnten etabliertes Verfahren an. Das Grundprinzip dieser Methode – den Körper in viele kleine Elemente zu unterteilen – impliziert jedoch, dass die Größenordnung der Elemente kleiner ist als die des zu vernetzenden Körpers. Dies führt im Fall der filigranen Gitterstrukturen dazu, dass selbst für moderat große Bauteile viele Millionen Elemente notwendig sind und sowohl Vernetzungs- wie auch Lösungszeit dadurch stark ansteigen [2].

Die Regelmäßigkeit der Gitterstrukturen lässt sich jedoch durch die sogenannte Homogenisierung ausnutzen. Dabei wird die Einheitszelle der Struktur fein vernetzt, periodische Randbedingungen appliziert und das Modell 6x gelöst (3x Zug/Druck, 3x Scherung). Aus den Ergebnissen lassen sich die effektiven elastischen Kennwerte dieser Gitterstruktur extrahieren [3, 4]. Bei der Simulation des eigentlichen Bauteils lässt sich nun das komplexe Gitter durch ein virtuelles Vollmaterial mit diesen Kennwerten ersetzen und kann grob vernetzt werden. Elementanzahl und Rechenzeit sinken in der Folge stark (Bild 4).

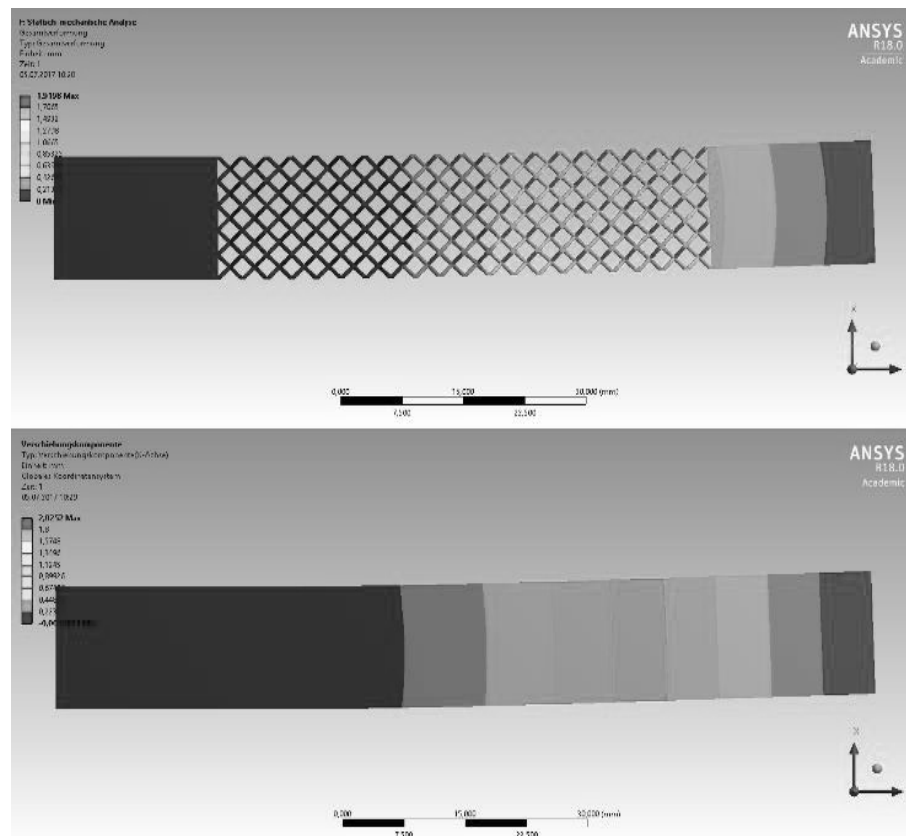


Bild 4: Homogenisierung am Beispiel eines einfachen Biegebalkens – oben: ausmodellerte Gitterstruktur, 570.000 Elemente, Lösungszeit 2min 14s – unten: Ersatzmodell, 2.000 Elemente, Lösungszeit 50s + 5s (Ermittlung der effektiven Festigkeitswerte einer Einheitszelle + Lösung des Ersatzmodells)

Aus den im Datenobjekt hinterlegten Gitterdaten wird für die Homogenisierung automatisch ein APDL-Skript erzeugt. Dieses wird dann zur Ausführung an ANSYS® Mechanical übergeben und die am Ende ausgegebenen Gitter-Kennwerte wieder in das Datenobjekt eingelesen.

5 Schichtdatengenerierung

Bevor die Struktur per Laserstrahl-Schmelzen (LBM) gefertigt werden kann, muss das Gitter in dünne Schichten aufgespaltet (gesliced) werden. Da die marktbeherrschenden Software-Lösungen Gitter bereits bei der Generierung tessellieren und danach nur mit diesen Dreiecksnetzen arbeiten, erfolgt das Slicen ebenfalls Dreiecksnetz-basiert [5]. Dies hat den Vorteil einer weitgehenden Geometrieunabhängigkeit des Algorithmus, birgt jedoch auch einige Nachteile. Einer davon ist die Unterteilung der Stäbe in Rand und Füllung. Während es bei größeren Geometrien notwendig ist, den Rand definiert zu belichten und anschließend die

umrandete Fläche zu füllen, so führt dies bei sehr kleinen Querschnitten wie in Gitterstrukturen dazu, dass der reale Strutdurchmesser stark von der Vorgabe abweicht.

Bei Verwendung der in Abschnitt 2 vorgestellten Datenstruktur ist jedoch die Achse der Struts und damit auch ihr Mittelpunkt in jeder Schicht bekannt. Abhängig vom Durchmesser des Struts kann dieser Punkt nun singulär belichtet oder als Mittelpunkt kurzer Belichtungsstrecken dienen. Über verschiedene Laser-Parameter wie Leistung, Verweildauer und Spot-size lässt sich bei dieser punktuellen Belichtung die Größe des erzeugten Durchmessers ebenfalls variieren.

Die erzeugten Schichtendaten werden im nicht-proprietären CLI-Format (Common Layer Interface) gespeichert und können direkt von der Maschine verarbeitet werden.

Neben einem besseren Prozesshandling bewirkt die parametrische Schichtgenerierung in Verbindung mit Punktbelichtung auch eine deutlich reduzierte Fertigungszeit pro Schicht, was wiederum die Bauteilkosten senkt und die möglichen Stückzahlen erhöht.

6 Prüfaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Verifikation der Simulation der mechanischen Eigenschaften werden Zugversuche an Gitterstruktur-Proben aus Ti6Al4V und aus X3NiCoMoTi18-9-5 durchgeführt. Die Probengeometrie und der Versuchsaufbau sind dabei an die Empfehlungen des Normentwurfes E DIN 50099 angelehnt. Diesem entsprechend wird die Probe während der Zugversuche zur Vermeidung von Biegebelastungen in einer kardanischen Aufhängung fixiert. Zusätzlich wird für die spätere Bestimmung des zeitlichen Querkontraktionsverlaufs eine frontale Videoaufnahme der Probe während des Versuchs angefertigt.

Die üblicherweise für Zugversuche an Vollmaterial verwendeten Probengeometrien eignen sich nicht für Zugversuche an Gitterstrukturen. In Ermangelung anwendbarer Normen wurde für die Gitterstruktur-Proben eine eigene Probengeometrie entworfen. Diese ist mit den folgenden Anforderungen der DIN 50099 kompatibel: die Probe besitzt mindestens zehn vollständige Zellen in jeder Richtung der Proben-Querschnittsebene. Weiterhin beträgt die Länge der Probe mindestens 1,5-mal die Probenbreite. Die verwendete Probengeometrie ist in Bild 5 dargestellt.

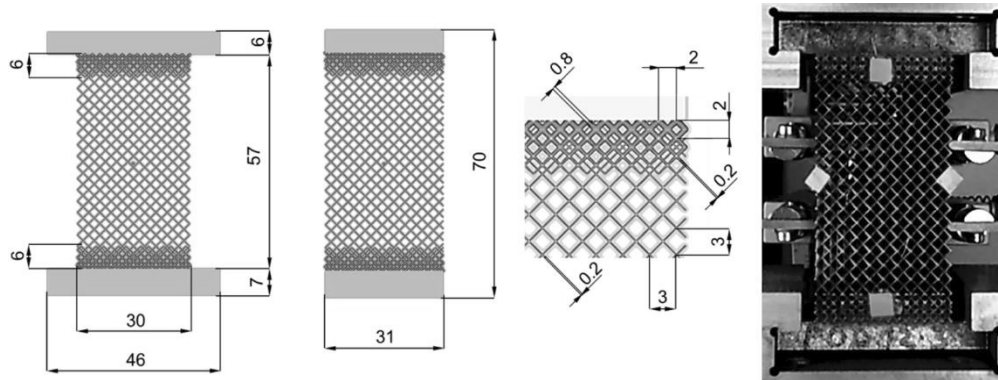


Bild 5: Für die Zugversuche entwickelte Probengeometrie. Die Probe wird zur Ermittlung der Längen- und Breitenänderung mit Tracking-Marken in zwei unterschiedlichen Farben versehen.

Neben dem Spannungs-Dehnungs-Verlauf wird als Maß der Querkontraktion die Poissonzahl bestimmt. Dies erfolgt durch die Messung der relativen Längen- und Breitenänderung der Probe. Dabei kommt eine optische Methode zur Anwendung. Die Proben werden, wie in Bild 5 dargestellt, mit quadratischen Tracking-Marken in zwei verschiedenen Farben versehen.

Die Videoaufnahme der Probe während der Versuchsdurchführung wird zeitlich diskretisiert und durch die Anwendung linearer Bildfilter werden entweder die Trackingmarken für die Breiten- oder jene für die Längenbestimmung hervorgehoben. Durch die Polygonerkennung der Computer Vision-Bibliothek boofCV [6] wird die Position der Tracking-Marken-Mittelpunkte und daraus ihr Abstand zueinander ermittelt. Hieraus wird die Poissonzahl bestimmt. In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass es mittels Laserstrahl-Schmelzens möglich ist, Gitterstrukturen mit reproduzierbaren mechanischen Eigenschaften zu erzeugen. Abweichungen in den Kennwerten von unter identischen Bedingungen gefertigten Proben liegen im Bereich von 10%. Dagegen hat sich besonders die durch die schichtweise Fertigung bedingte Anisotropie als signifikant herausgestellt. Der E-Modul von stehend und liegend gefertigten Proben weist beispielsweise Unterschiede von etwa 20% auf. Auch die gemessene Poissonzahl sowie ihr Verlauf in Abhängigkeit von der Dehnung unterscheiden sich bei Gitterstrukturen deutlich von dem von Vollmaterialien. Damit lassen sich einige Gesetze der Festkörpermechanik nicht oder nur sehr bedingt auch auf Gitterstrukturen anwenden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Tool vorgestellt, mit dem ein Konstrukteur direkt in der CAD-Umgebung komplexe Gitterstrukturen in Bauteile integrieren kann. Die Datenhaltung erfolgt

dabei in einem auf zelluläre Materialien angepassten Framework im Backend. Ebenso wurde eine Methodik implementiert, die durch eine Substitution des Gitters durch ein geeignet parametrisiertes Vollmaterial die Vernetzungs- und Rechenzeit signifikant verringert. Zur Generierung der Schichtdaten wurde ein Slicer entwickelt und in das Tool integriert.

Mittels Zugversuch sind an E DIN 50099 angelegte Probekörper auf ihre mechanischen Kennwerte untersucht worden. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Wiederholgenauigkeit recht gut, die Anisotropie durch die schichtweise Fertigung jedoch sehr hoch ist.

Zukünftige Entwicklungen zielen zum einen auf die Generierung non-uniformer Gitter (z. B. mit gradierten oder formfolgenden Zellen) und zum anderen auf die Steigerung der Prozessbeherrschung durch die Gitterherstellung mittels Punktbelichtung.

Literatur

- [1] Gibson, Lorna J.; Ashby, Michael F.: Cellular Solids. Cambridge: Cambridge University Press. 1997
- [2] Chung, Peter W.; Tamma, Kumar K.; Namburu, Raju R.: Asymptotic expansion homogenization for heterogeneous media: computational issues and applications. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 32 (9), S. 1291–1301. 2001. DOI: 10.1016/S1359-835X(01)00100-2.
- [3] Berger, Harald; Kari, Sreedhar; Gabbert, Ulrich; Rodriguez-Ramos, Reinaldo; Guinovart, Raul; Otero, Jose A.; Bravo-Castillero, Julian: An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites. In: International Journal of Solids and Structures 42 (21-22), S. 5692–5714. 2005. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.016.
- [4] Arabnejad, Sajad; Pasini, Damiano: Mechanical properties of lattice materials via asymptotic homogenization and comparison with alternative homogenization methods. In: International Journal of Mechanical Sciences 77, S. 249–262. 2013 DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.10.003.
- [5] <http://www.materialise.com/sites/default/files/2016-11/Materialise%203-matic%20-%20Light-weight%20Structures.pdf>, abgerufen 12.07.2017
- [6] Abeles, P.; “BoofCV” v0.25, <http://boofcv.org/>, 2016

Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – STE 1451/16-1.

Augmented-Reality-basierte Anforderungsvisualisierung zur Unterstützung der Formfindung bei der Nutzung physischer Designmodelle

Ulrich Feldinger, Thomas Vietor*

Volkswagen Aktiengesellschaft, Brieffach 011/17010, 38436 Wolfsburg

Tel. (05361) 9986142, E-Mail: ulrich.feldinger@volkswagen.de

*Technische Universität Braunschweig, Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF),

Hermann-Blenk-Straße 42, 38108 Braunschweig

Tel. (0531) 391-66671, E-Mail: t.vietor@tu-braunschweig.de

Inhalt: Im Zuge dieses Beitrages soll ein Werkzeug vorgestellt werden, welches auf intuitive Weise technische Anforderungen an das Fahrzeugdesign in physischen Designmodellen für den Designer verfügbar macht. Die Motivation ist die Unterstützung der zielgerichteten Formfindung. Basis dieses Vorgehens ist die Übertragung von in virtuellen Entwicklungsumgebungen vorhandenen Hilfsmitteln in die reale Wirklichkeit. Dies wird mit Hilfe eines Augmented Reality Systems ermöglicht. Zu diesem Zweck wird zunächst der ursprüngliche Ansatz zur oberflächenzentrierten Anforderungsvisualisierung sowie der zugehörige Soll- und Ist-Vergleich mit Designoberflächen erläutert. Auf Basis dessen wird abschließend auf den Ansatz der Visualisierung von virtuellen Oberflächendaten innerhalb der Realität durch ein Augmented Reality (AR)-System eingegangen.

Abstract: The aim of this contribution is to present a method to intuitively illustrate technical requirements towards the styling of a vehicle. The focus is on physical design models and the support of target driven surface styling. The approach carries over a previously introduced virtual CAD-method into the physical reality. This is done by utilizing an augmented reality approach. In order to do so, the original surface centric knowledge based engineering approach will be briefly discussed. Moreover, the related target-performance comparison regarding styling surfaces will be demonstrated. To conclude, the realisation of the method to visualise virtual surface data inside physical models will be showcased by using an augmented reality system.

Stichwörter: Designprozess, Formgestaltung, Designmodelle, Computer Aided Styling, Augmented Reality

Keywords: design process, surface design, design models, Computer Aided Styling, Augmented Reality

1 Ausgangssituation

Angesichts des Wettbewerbsdrucks und der stetig wachsenden Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung müssen die Fahrzeughersteller ihre Prozesse, Werkzeuge und Methoden laufend überarbeiten und sich den ändernden Randbedingungen anpassen. Diese Situation

macht auch vor dem Prozess der Findung der äußeren Form eines Fahrzeugs – dem Design – nicht Halt.

Der Fahrzeugdesignprozess ist von zwei Gegensätzen geprägt: dem emotionalen und funktionalen sowie dem physischen und virtuellen [1]. So ist einerseits die Hauptaufgabe des Automobildesigners, eine für den Zielkunden ansprechende Fahrzeugform und auch Nutzerschnittstelle zu schaffen. Andererseits müssen bei der Formfindung zusätzlich alle technischen und ökonomischen Anforderungen an das Fahrzeug erfüllt werden. Nur so kann ein funktions- und zulassungsfähiges Endprodukt entwickelt werden, welches marktwirtschaftlich erfolgreich sein kann [2, 3].

2 Motivation und Problemstellung

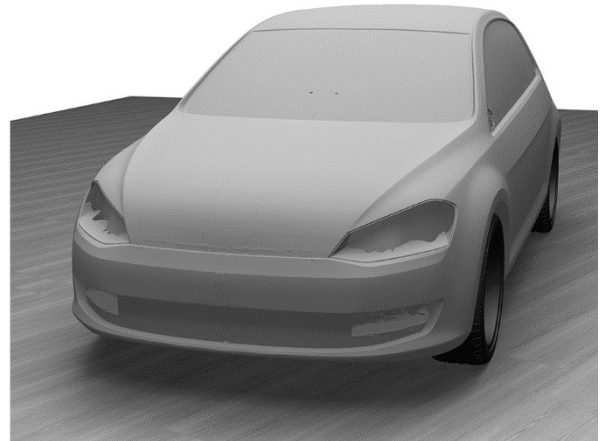
Neben dem Konvergenzprozess zwischen den technischen Anforderungen und dem Design tritt an dieser Stelle der modusbedingte Gegensatz des Designprozesses zutage: Der Gegensatz zwischen stofflichen und nicht-stofflichen Modellen. Während die heutige Produktentwicklung stark virtuell geprägt ist, d. h. nicht-stoffliche Modelle nutzt, spielen im Fahrzeugdesign stoffliche Modelle weiterhin eine große Rolle.

Diese heuristischen Modelle – d. h. der Formfindung dienend – bestehen zumeist aus einem synthetischen Modellbauplastillin, welches sich im erwärmten Zustand per Hand verformen und bei Raumtemperatur auch maschinell bearbeiten lässt. Das Material erlaubt somit die Erarbeitung der Oberflächengeometrie durch Materialauf- und abtrag. Durch die gezielt eingestellte Farbe des Materials, welche der Farbe von Ton nachempfunden ist, wird die Flächenwahrnehmung und –bewertbarkeit unterstützt. Hierzu illustriert Bild 1 die beiden grundsätzlichen Modellarten zur Formfindung im Fahrzeugdesign [4].

Die weiterhin hohe Durchdringung des Fahrzeugdesigns mit stofflichen Modellen innerhalb einer stark virtuell geprägten Fahrzeugentwicklung ist begründet. Die Ursachen hierfür liegen unter anderem an der Sinnfälligkeit der Änderung stofflicher Modelle [5] einerseits und an der Raumwahrnehmung und Flächenbewertbarkeit andererseits [6]. Diese Eigenschaften werden von heutigen, virtuellen Computer-Aided-Styling- und Computer-Aided-Design-Systemen noch nicht erreicht [7].



nicht-stoffliches Modell



stoffliches Modell

Bild 1: Die beiden grundsätzlichen Modellarten im Design

Im Fahrzeugdesignprozess ist eine parallele Nutzung von stofflichen und nicht-stofflichen Modellen üblich [6]. Daraus ergeben sich jeweils unterschiedlichen Herangehensweisen an die Kommunikation technischer Inhalte zur Berücksichtigung bei der Formfindung. Bei der Formgestaltung anhand nicht-stofflicher Designmodelle haben sich Schnittansichten und dreidimensionale Bauraummodelle etabliert [8].

Das Berücksichtigen solcher Anforderungen stellt den Automobildesigner vor erhebliche Herausforderungen. So bedingt die steigende Fahrzeugkomplexität sowohl eine erhöhte Anzahl zu berücksichtigender Anforderungen, als auch mehr Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Anforderungen untereinander [9].

Die Konvergenz dieser Anforderungen und der skulpturalen Gestalt des Formentwurfs wird zusätzlich durch nicht einheitliche Anforderungsabstraktionsgrade erschwert. Als Ansatzpunkt dieser Problematik wurde ein oberflächenzentrisches Knowledge Based Engineering Werkzeug vorgestellt. Dieses gibt dem Projektteam aus Ingenieuren und Designern die Möglichkeit, Anforderungen als dreidimensionale Oberflächenmodelle zu visualisieren. Somit wird ein intuitiver Abgleich des Soll- und Ist-Standes zwischen dem Designmodell und der einzelnen Anforderung innerhalb eines CAD-Systems ermöglicht [10].

Bild 2 veranschaulicht den Ansatz der Methodik: Die Basis ist eine Datenbankanbindung der parametrisierten Anforderungen mit einem CAD-System. Die parametrisierten Anforderungen werden innerhalb des CAD-Systems mit parametrisierten Geometrievorlagen verknüpft. Auf diese Weise wird ein direkter Vergleich der quantitativ formulierbaren Anforderungen der Technik mit den stark subjektiven und in der Form von geometrischen Merkma-



Bild 3: Schnittansichten an einer Modellwand und das stoffliche Designmodell

3 Visuelle Repräsentation von Soll-Eigenschaften durch Oberflächen

Entsprechend der obigen Ausführungen lassen sich Designmodelle sowohl in ihrer stofflichen als auch nicht-stofflichen Ausprägung als Oberflächenmodelle klassifizieren. Um den mentalen Aufwand für den Abgleich zwischen den geometrischen Merkmalen dieser Oberflächenmodelle und den technischen Soll-Eigenschaften gering zu halten, wird auf eine Anforderungsrepräsentation in Form von Oberflächen geschlossen.

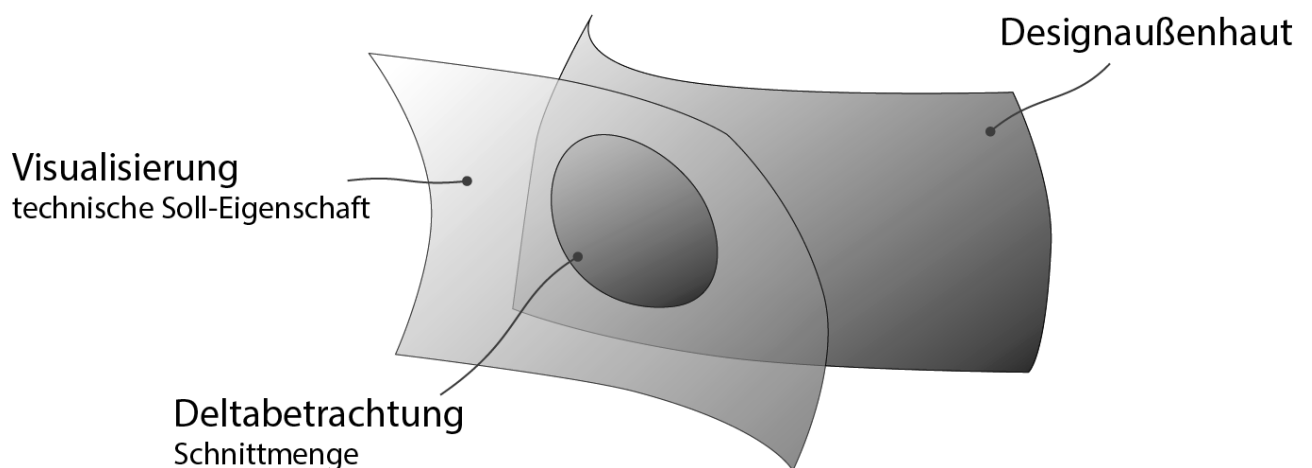


Bild 4: Ablesen der Konvergenz zwischen Design und technischen Anforderungen durch Schnittmengen

Dieser Zusammenhang ist für den Kontext der Konvergenz zwischen technischen Anforderungen und Designoberflächen in Bild 4 dargestellt. Die Grundlage bildet die Wahrnehmung von technischen Anforderungen in Form von Oberflächen. Die Verarbeitung ist der direkte

Vergleich dieser Oberflächen mit den vorhandenen Designflächen. Aus dem Vergleich bildet sich die Erkenntnis des Konvergenzstatus in Form einer Schnittmenge Delta. Die Visualisierung einer technischen Anforderung durch Oberflächen wird im Folgenden als Leitgeometrie bezeichnet.

In diesem Zusammenhang stellt Bild 5 den Ablauf zur Erzeugung und Darstellung der Leitgeometrien in einem Beispiel dar. Das Beispiel beschreibt anhand fiktiver Daten die technisch nötigen Abstrahlwinkel für das Fernlicht eines Fahrzeuges. Die Designaußenhaut und die Abstrahlwinkel, welche vom Leuchtmittel im Scheinwerfer ausgehen, dürfen sich dabei nicht überschneiden.

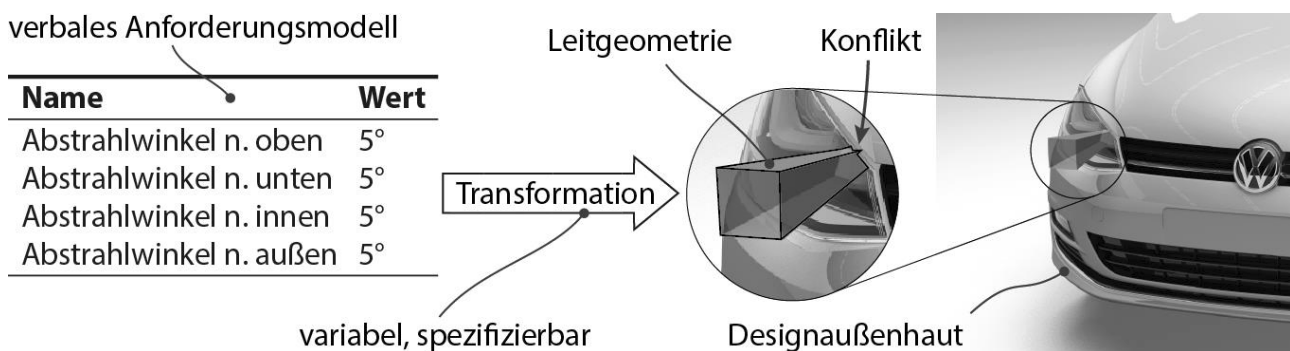


Bild 5: Vereinfachte Darstellung der Methodenanwendung innerhalb des Konvergenzprozesses zwischen Design und Technik

Ausgehend von einem Anforderungsmodell beliebiger Ausprägung, in diesem Fall einer verbal formulierten Anforderungsliste, findet eine Transformation statt. Diese Transformation des Anforderungsmodells ist entsprechend obiger Ausführungen variabel und spezifizierbar, um die Auswirkung der Änderung technischer Anforderungen an die Designaußenhaut in Echtzeit darstellen zu können. Durch die Transformation des Anforderungsmodells wird eine sinnfällige Anforderungsvisualisierung in Form einer Leitgeometrie ermöglicht. Diese lässt sich als Oberflächenmodell direkt in das Designmodell integrieren und erlaubt einen sofortigen Vergleich mit der Designaußenhaut. Etwaige Konfliktpunkte zwischen Anforderung und Designflächen sind somit sinnfällig ablesbar.

4 Visualisierung technischer Anforderungen in stofflichen Modellen

Ausgehend von dem in Abschnitt 3 beschriebenen Methodenansatz für das Verknüpfen von qualitativen und quantitativen Anforderungen wird im Folgenden der Übertrag des Methodenansatzes zwischen stofflichen und nicht-stofflichen Designmodellen dargelegt.

Der dargestellte Methodenansatz zielt auf das Visualisieren von quantitativen Anforderungen als Oberflächen ab. Daraus kann gefolgert werden, dass die bereits erzeugten Oberflächendaten innerhalb des stofflichen Designmodelles visualisiert werden müssen. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Bild 6 am Beispiel der in Bild 5 vorgestellten Methodenanwendung bezüglich des benötigten Abstrahlwinkel des Fernlichts.

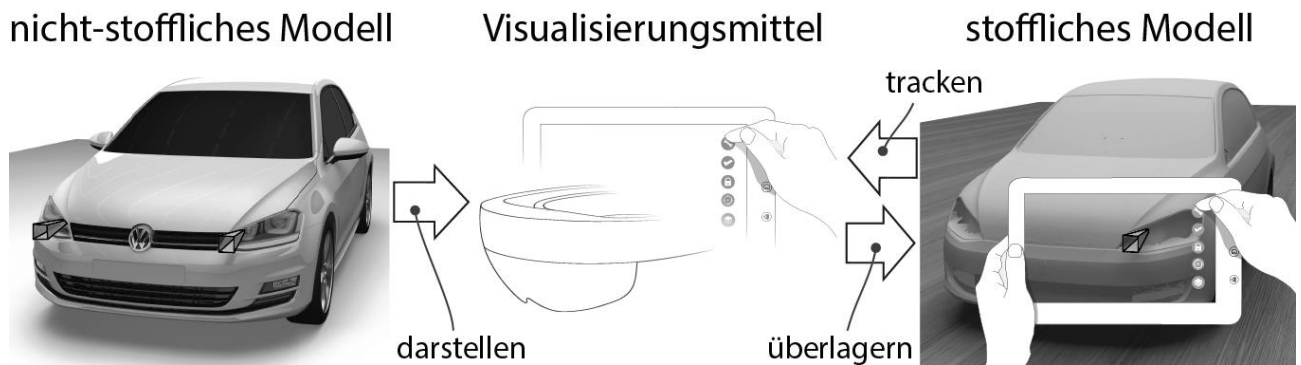


Bild 6: Ansatz der modellmodusübergreifenden Methodenanwendung

Die Abbildung stellt dabei die drei Verknüpfungspunkte des Ansatzes dar: das nicht-stoffliche Modell mit seinen Leitgeometrien, ein passendes Visualisierungsmittel, sowie das stoffliche Modell. Die virtuellen Inhalte des nicht-stofflichen Modells können durch das Visualisierungsmittel dargestellt werden. Bis zu diesem Punkt entspricht dies der Ausprägung konventioneller CAS- oder CAD-Systeme. Zusätzlich kann über eine Referenzierung, dem Tracken, die relative Lage zwischen dem Visualisierungsmittel und dem stofflichen Modell bestimmt werden. Somit kann eine perspektivisch korrekte Überlagerung von virtuellen Daten und dem stofflichen Modell erreicht werden. Auf diese Weise können die virtuell vorhandenen Leitgeometrien in ihrer nicht-stofflichen Ausprägung innerhalb des stofflichen Designmodells visualisiert werden. Das Vorgehen des visuellen Abgleichs quantitativer und qualitativer Anforderungen ist somit bei stofflichen und nicht-stofflichen Modellen nicht nur möglich, sondern in der Durchführung sogar identisch.

5 Praktische Anwendung

Anhand der vorausgegangenen Ausführungen zum Methodenansatz der graphischen Visualisierung von technischen Soll-Eigenschaften innerhalb von Fahrzeugdesignmodellen soll an dieser Stelle die praktische Anwendung erläutert werden. Zu diesem Zweck ist in Bild 7 ein prototypischer Aufbau anhand eines Augmented Reality-Systems dargestellt.

Die Basis des Aufbaus bildet ein stoffliches Interieurdesignmodell aus Plastilin. Mit Hilfe eines Tabletcomputers als Visualisierungsmittel wird laufend das Echtzeitbild der Kamera an der Tabletcomputerrückseite ausgegeben. Das Kamerabild dient zusätzlich zur Referenzierung zwischen Visualisierungsmittel und stofflichem Designmodell. Dieses Darstellungsprinzip entspricht der „Magic Lens“, welches zum Beispiel Broll in [11] beschrieben hat. Anhand der Referenzierung können in Echtzeit perspektivisch korrekt nicht-stoffliche Oberflächendaten in das Kamerabild überlagert werden und, wie in Bild 4 und 5 dargelegt, Delta Betrachtungen zwischen den technischen Soll-Eigenschaften und den geometrischen Merkmalen der Designaußenhaut durchgeführt werden.

stoffliches Designmodell



Visualisierungsmittel

perspektivisch korrekt eingeblendete Daten

Echtzeitkamerabild

Bild 7: Praktische Anwendung am Beispiel eines Interieurmodells

6 Diskussion und Ausblick

Die vorangegangenen Ausführungen verdeutlichen den erheblichen Gewinn an Sinnfälligkeit bei der Abstimmung zwischen den geometrischen Merkmalen der Designaußenhaut mit den an sie gestellten technischen Soll-Eigenschaften. Dies wird insbesondere bei dem Vergleich der Bilder 3 und 7 deutlich. Der Ansatz ermöglicht somit die intuitivere Kommunikation technischer Soll-Eigenschaften bei der Formgestaltung anhand stofflicher Modelle.

In Bezug auf die manuelle Formgestaltung bei stofflichen Modellen stechen zwei Aspekte heraus, welche aktueller Gegenstand der Weiterentwicklung des vorgestellten Ansatzes sind: Das verwendete Visualisierungsmittel ermöglicht zwar das perspektivisch korrekte Einblenden von virtuellen Daten, der Formgestalter kann jedoch seine Hände nicht frei zum Modellieren nutzen, da diese den Tabletcomputer halten und bedienen. Eine mögliche Abhilfe scheint an dieser Stelle der Wechsel zu einer Durchsichtdatenbrille (englisch: see-through Head Mounted Display – HMD) als Visualisierungsmittel. Bei dieser Vorgehensweise könnte der Formgestalter durchgehend die Hände für die manuelle Formgestaltung einsetzen.

Der zweite Arbeitspunkt bezieht sich auf die zur Deltabildung in Bild 4 herangezogenen Oberflächen der Designaußenhaut. Bei der vorgestellten Realisierung des Ansatzes war keine Echtzeitdatenrückführung des Materialauf- und Abtrags vorgesehen. Somit können nur digital „eingefrorene“ Arbeitsstände als Datenbasis verwendet werden. Dieser Punkt ließe sich jedoch durch eine laufende Digitalisierung der stofflich-vorhandenen Designaußenhaut beseitigen. Somit könnte der Formgestalter in Echtzeit überprüfen, welchen Einfluss der gerade durchgeführte Materialauftrag oder –Abtrag in Bezug auf die Konvergenz zwischen Designaußenhaut und technischen Soll-Eigenschaften hat.

7 Literatur

- [1] Chandra, Sushil (2015): „Evaluation of Clay Modeling and Surfacing Cycles from Designers Perspective“. In: Weber, Christian et al. (Hg.): The 20th International Conference on Engineering Design (ICED15). 27th-30th July 2015, Politecnico di Milano, Italy : proceedings of ICED15. Glasgow, Scotland: Design Society: Design Society (= Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design), S. 215–224
- [2] Hacker, Winfried (2005): „Aufgabendienlichkeit von Produkten zwischen Konstruktion und Design“. In: Reese, Jens (Hg.): Der Ingenieur und seine Designer. Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 289–295
- [3] Reese, Jens (2005): „Car Design - ein Design aus dem goldenen Käfig heraus?“. In: Reese, Jens (Hg.): Der Ingenieur und seine Designer. Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 187–197
- [4] Kalker, Thomas (2015): „Tonmodellierung — von der Skizze zum Modell“. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 117, H. 9, S. 70–73
- [5] Hacker, Winfried (2003): „Design Problem Solving und psychologische Unterstützungsmöglichkeiten“. In: Öhlmann, Gerhard/David, Heinz/Emons, Hans (Hg.): Katalyse und Automobil - Wege zur Nachhaltigkeit der Mobilität. Berlin: Trafo-Verlag (= Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät e.V; 57), S. 115–122

- [6] Kurz, Melanie (2007): Die Modellmethodik im Formfindungsprozess am Beispiel des Automobildesigns. Analyse der Wechselwirkungen zwischen Entwurfs- und Darstellungsmethoden im Hinblick auf die systematische Entwicklung und Bewertbarkeit der dreidimensionalen Form artefaktischer Gegenstände im Entstehungsprozess. Dissertation. Baden-Baden: Deutscher Wissenschaftsverlag
- [7] Lender, Kurt (2016): „Feasibility Design -"Designqualität in Serie bringen"“. In: Krzywinsky, Jens/Linke, Mario/Wölfel, Christian (Hg.): Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016. Beiträge zum Industrial Design. Dresden: TUDpress: TUDpress (= Reihe Technisches Design; 10), S. 139–152
- [8] Grabner, Jörg; Nothaft, Richard (2006): Konstruieren von PKW-Karosserien. Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit Catia V4 und V5. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer
- [9] Hucho, Wolf-Heinrich (2007): „Design und Aerodynamik — Wechselspiel zwischen Kunst und Physik“. In: Braess, Hans-Hermann/Seiffert, Ulrich (Hg.): Automobil design und Technik. Formgebung, Funktionalität, Technik. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (= ATZ-MTZ-Fachbuch), S. 218–238
- [10] Feldinger, Ulrich; Kleemann, Sebastian; Vietor, Thomas: „Automotive styling: Supporting engineering-styling convergence through surface-centric knowledge based engineering“. Peer Review durchlaufen und angenommen. Wird erscheinen in: Tagungsband zur International Conference on Engineering Design 2017 - ICED 2017: 21.-25. August 2017, Vancouver, Kanada
- [11] Broll, Wolfgang (2013): „Augmentierte Realität“. In: Dörner, Ralf et al. (Hg.): Virtual und Augmented Reality (VR / AR). Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Berlin: Springer Vieweg (= eXamen.press), S. 241–294

Auslegung von Energiespeichern in Elektrofahrzeugen mittels Digital Mock-Up bei dezentralisierten Antriebssträngen

Tobias Stefaniak, Daniel Maiwald, Gunther Püschel, 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

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

Inhalt: Die Verwendung elektrischer Antriebsstränge in zukünftigen automobilen Anwendungen führt letztlich durch das systematische Überdenken der Gesamtarchitektur des Automobils zu einer völlig neuen Herangehensweise an die funktionalen Baugruppen. Ferner ergeben sich durch die Implementierung elektrischer Antriebsstränge neue Gestaltungsmöglichkeiten für die Konstruktion der Gesamtarchitektur, aber auch neue Herausforderungen im Produktentstehungsprozess. Innerhalb der Fahrzeuggrobgestaltung zukünftiger elektrifizierter Fahrzeuge müssen sowohl Fahrzeugarchitektur, Energiespeicher als auch Antriebsart frühzeitig Berücksichtigung finden.

Das Auftreten unterschiedlicher Bauraumgeometrien für verschiedene Gestaltungskonzepte des Fahrzeuges führt zu einem ständig neu zu konzipierenden Energiespeicher. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Lösungsfindung des Energiespeichers bezüglich der durchaus komplexen Anordnungssystematik seiner Einzelzellen im Rahmen eines Digital Mock-Up (DMU). Aufbauend auf ein Maßkonzept sollen in kürzester Zeit realnutzbare Batteriebau Räume identifiziert und auch charakterisiert werden. Mittels des NSGA-II Algorithmus wird die Einzelzelle (Rund oder Prismatisch) zu Zellmodulen verschaltet, welche bestmöglich in den vorhandenen Bauraum zu integrieren sind. Für die Durchführung des Optimierungsprozesses wurde ein strukturelles Konzept zur Anordnung der Zellmodule entwickelt, welches auf einzelnen, in ihrer Größe flexiblen Rastern beruht. Das Konzept besitzt hierbei acht miteinander gekoppelte und einen flexiblen Verband bildende Einzelvolumen, in denen sich Raster mit Zellmodulen anordnen und somit der Bauraum effizient ausgenutzt wird.

Abstract: The use of electric drive trains in future automotive applications ultimately leads to the systematic rethinking of the overall architecture of the automobile to a completely new approach to the functional assemblies. Furthermore, the implementation of electric drive trains results in new design possibilities for the construction of the overall architecture, but also new challenges in the product creation process. Within the vehicle design of future electrified vehicles, the vehicle architecture, energy storage and mode of driving must be considered at an early stage.

The occurrence of different constructed size for different design concepts of the vehicle leads to a constantly new energy storage. The present paper deals with the solutions of energy storage with the regard to the complex arrangement of its individual cells within a digital mock-up (DMU). Based on a measurement concept, constructed size that can be used for battery used in real time are to be identified and characterized.

Using the NSGA-II algorithm, the individual cell (round or prismatic) is connected to cell modules, which must be optimally integrated into the available constructed size. For the implementation of the optimization process, a structural concept for the arrangement of the cell modules was developed, which is based on individual, variable-size grids. In this case, the concept has eight individual volumes that are coupled together and form a flexible dressing, in which grids are arranged with cell modules and thus the space is efficiently utilized.

Stichwörter: Elektromobilität, Produktentwicklung, Hochvolt, Traktionsbatterie, Fahrzeuggrobgestaltung, Optimierung.

Keywords: electromobility, product development, high voltage, traction battery, vehicle design, optimization.

1 Ausgangssituation und Motivation

Fahrzeuge mit einem elektrifizierten Antriebsstrang haben sich bereits in den letzten Jahren am Automobilmarkt etablieren können. Es ist davon auszugehen, dass deren Marktanteil in den nächsten Jahren deutlich ansteigen wird. Dieser Umstand verlangt nach neuen Werkzeugen, die es ermöglichen, Elektrofahrzeuge effizient zu entwickeln, um insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklung valide Aussagen über das spätere Produkt treffen zu können [1, 2]. Ein wichtiges Werkzeug ist das parametrisch gesteuerte Digital Mock-Up (DMU), wodurch das Package eines Produktes digital abgebildet werden kann: Im Gegensatz zu den physischen Versuchsmodellen, kann deren Anpassung und Erweiterung deutlich schneller und mit geringerem Aufwand durchgeführt werden, wodurch sich die Iterationszyklen zwischen den Entwicklungsständen verkürzen [3, 4]. In diesem Beitrag wird ein DMU vorgestellt, das dazu verwendet werden soll, Teile des Packages eines Elektrofahrzeuges im Grobkonzeptstadium festzulegen. Es soll den Anwender des DMUs dabei unterstützen, geeignete Bauräume für den Energiespeicher zu identifizieren, in denen anschließend im Optimierungsprozess Batteriezellen angeordnet werden. Die Umsetzung des DMUs erfolgt im CAD-System CATIA-V5 zur Visualisierung, das über das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel vom Anwender gesteuert werden kann.

Zur Identifikation der Bauräume ist die Definition wesentlicher Komponenten notwendig, die den Bauraum für den Energiespeicher begrenzen. Dazu zählen zunächst Grenzflächen des Unterbodens, des Fahrzeuginnenraumes und der Karosserie (Bild 1, a). Zur parametrischen Steuerung dieser Komponenten im DMU werden relevante Maße aus der Norm DIN 70200 verwendet, nach der grundlegende Maße von Personenkraftwagen herstellerübergreifend festgelegt werden [5]. Neben der Basisgeometrie des Fahrzeuges ist der Antriebsstrang eine weitere wesentliche Komponente, die den Bauraum für den Energiespei-

cher begrenzt. Durch Festlegung von Abständen zu den Grenzflächen können beispielsweise Crashzonen definiert oder bauliche Einschränkungen berücksichtigt werden. Anschließend können Bauraumsegmente für den Energiespeicher abgeleitet und modular ausgewählt werden (Bild 1, b).

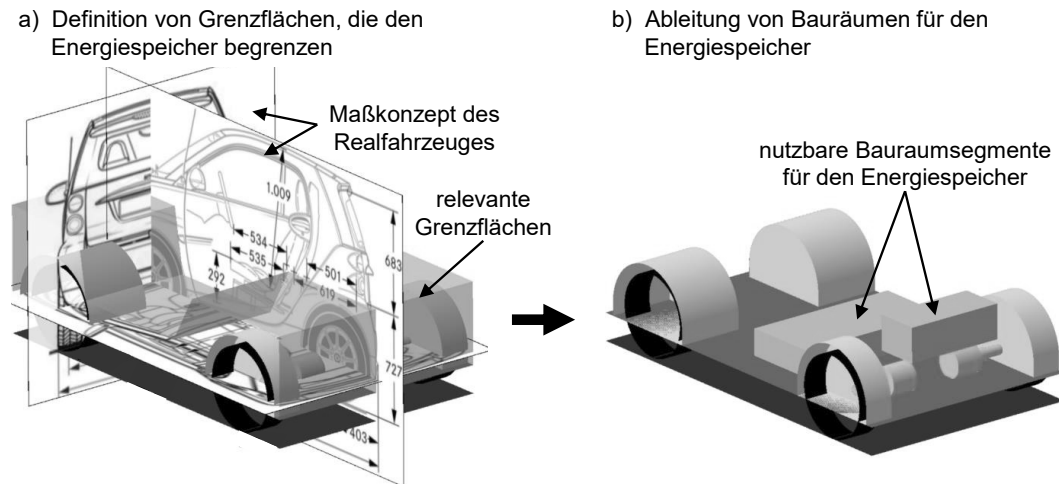


Bild 1: Digital Mock-Up eines Elektrofahrzeugs im Grobkonzeptstadium

So kann einerseits das Maßkonzept eines bereits existierenden Fahrzeuges im DMU dargestellt werden nach dem Conversion Design (Anpassungskonstruktion). Andererseits ist jedoch auch die freie Erstellung eines neuartigen Maßkonzeptes nach dem Purpose Design (Neukonstruktion) möglich, bei dem die Anforderungen und Eigenschaften des elektrifizierten Antriebsstranges vollständig einbezogen werden können [6]. Im DMU werden weiterhin ausschließlich dezentrale Antriebsstrangtopologien berücksichtigt, die einen separaten Antrieb der Räder auszeichnen. Aus Sicht der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg bieten sie im Vergleich zu zentralen Antrieben hinsichtlich der Effizienz und der Bauraumnutzung große Vorteile [6, 7]. In den abgeleiteten Batteriebauräumen sollen in einem Optimierungsprozess Batteriezellen angeordnet werden. Er soll dazu beitragen, bereits frühzeitig valide Aussagen zu einem Fahrzeugkonzept bezüglich der wesentlichen Eigenschaften einer Traktionsbatterie treffen zu können.

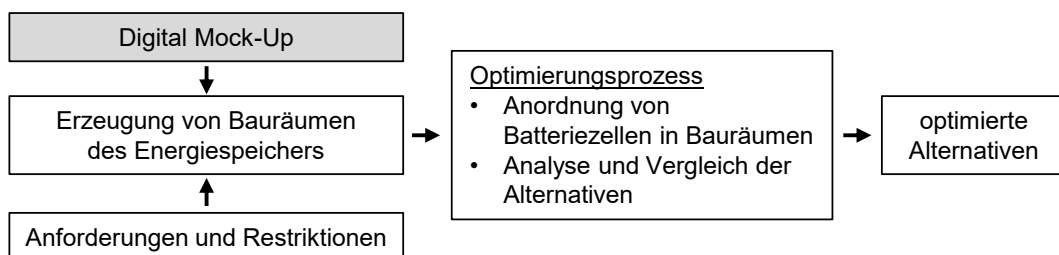


Bild 2: Integration des DMUs in einen Optimierungsprozess für das Package des Energiespeichers

Die geometrischen Daten des Packages für den Energiespeicher können in universellen Dateiformaten an ausgelagerte Optimierungsprozesse übergeben werden, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Damit wird ein teilautomatisierter Prozess geschaffen, um aus einem Grobkonzeptmodell eines Elektrofahrzeuges Bauräume für den Energiespeicher abzuleiten, in denen anschließend Batteriezellen in einem Optimierungsprozess angeordnet werden können.

2 Grundlagen der frühen Fahrzeuggrobgestaltung

Die Ansprüche an das digitale Produktmodell in der frühen Fahrzeuggrobgestaltung bestehen insbesondere in der effizienten Vergleichbarkeit von verschiedenen Konzepten untereinander. Es müssen deshalb Einschränkungen hinsichtlich der Detaillierung gemacht werden, um die Komplexität und den Erstellungsaufwand des Modells möglichst gering zu halten. Die Betrachtung einer ausreichenden Anzahl an unterschiedlichen Konzepten soll so die Validierung des Produktmodelles für die nachfolgenden Entwicklungsschritte erhöhen. In dem DMU wird sich deswegen auf wenige wesentliche Komponenten mit einer möglichst einfachen Topologie beschränkt, die den Bauraum des Energiespeichers begrenzen aber gleichzeitig eine angemessene Abbildungsqualität des Modells bieten.

Es existieren bereits Modelle und Prozesse, die in der Grobkonzeptphase einzuordnen sind und auf die Optimierung des Energiespeicherpackages aber auch des Gesamtfahrzeuges mit elektrifiziertem Antriebsstrang abzielen. Dazu zählen unter anderem die Ergonomie, die Fahrleistung, die Fahrzeugdynamik oder die Wirtschaftlichkeit [8, 9]. Eine Betrachtung des dezentralen Antriebsstranges findet bei diesen Modellen jedoch noch nicht statt und auch Potentiale des Purpose Designs können in diesen Modellen nur beschränkt berücksichtigt werden.

Diese Lücke soll das hier vorgestellte DMU füllen. Es werden dezentrale Antriebskonzepte im DMU integriert und neben dem Conversion Design eine Konzepterstellung nach dem Purpose Design ermöglicht. Der Fokus liegt dabei zunächst ausschließlich auf der Identifikation und der Optimierung des Packes eines Energiespeichers im Bodenbereich des Fahrzeuges. Weiterhin sind spätere Erweiterungen möglich, wie beispielsweise zur Ergonomie oder Fahrzeugaufbauten, die durch genormte Bemaßungen, wie dem Sitzreferenzpunkt oder Außenabmessungen der Karosserie gewährleistet sind [10].

3 Aufbau des Digital Mock-Ups

Der Aufbau sowie die Steuerung des DMUs setzen sich aus drei Softwares zusammen (Bild 3). Zu diesen gehören Excel, das als Eingabemaske spezifischer Fahrzeugdaten dient und daraus potentielle Bauräume ableitet, Catia-V5 zur Visualisierung der Ergebnisse und Matlab zur Berechnung/Optimierung der Batteriezelleanordnung in real nutzbaren Bauräumen des Konzeptmodells.

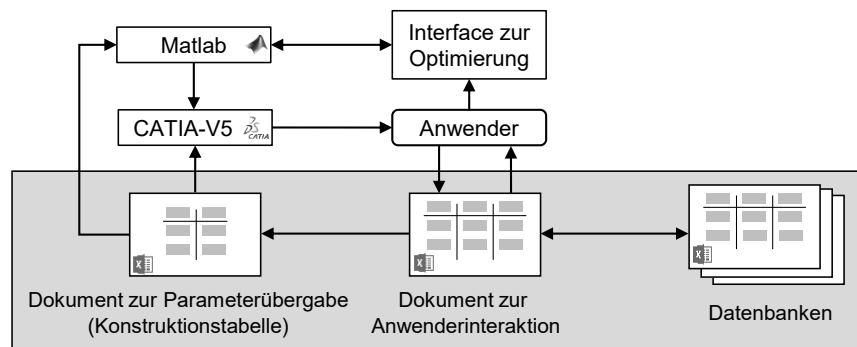


Bild 3: Aufbau und Steuerung des Digital Mock-Ups

Im ersten Schritt erfolgt die Eingabe von Fahrzeugklasse, Antriebstopologie – die in den *Datenbanken* hinterlegt sind - und Auswahl von Bauräumen im *Dokument zur Anwenderinteraktion*, das gleichzeitig zur Informationsrückgabe dient, um Eigenschaften der ausgewählten Elemente wie Antriebsmotoren oder Orientierungshilfen zur Dimensionierung des Modells für eine bestimmte Fahrzeugklasse anzuzeigen. Das Einlesen der Werte übernimmt Catia-V5 vollautomatisch über das Feature *Konstruktionstabelle*, das mit dem *Dokument zur Parameterübergabe* verknüpft ist. Über ein Makro in Catia-V5 wird Matlab gestartet, welches anschließend die Bauraumdaten für den Energiespeicher einliest und ein Eingabefenster für den Anwender öffnet, indem er die Parameter für die Optimierung eingeben kann. Zu den Parametern gehören unter anderem die Auswahl der Zelle (rund, prismatisch sowie weitere geometrische Eigenschaften), Zellspannung, -kapazität, Gesamtspannung, Höhe Kontaktierungselement, Wanddicke vom Modulgehäuse sowie Abstand zwischen den Zellmodulen. Nach Abschluss der Optimierung überträgt Matlab das Ergebnis nach Catia-V5, erzeugt gültige Alternativen im Lösungsraum und der Anwender hat anschließend die Möglichkeit die erzeugten Ergebnisse zu bewerten.

3.1 Ermittlung der Bauräumeausprägung und Lösung des Packageproblems

Nach dem Aufbau der Fahrzeugklasse und der Auswahl der Antriebstopologie ergibt sich durch Grenzflächen, die durch verschiedene Offsets zur Karosserie ermittelt werden, der potentiell nutzbare Bauraum (vgl. Bild 4).

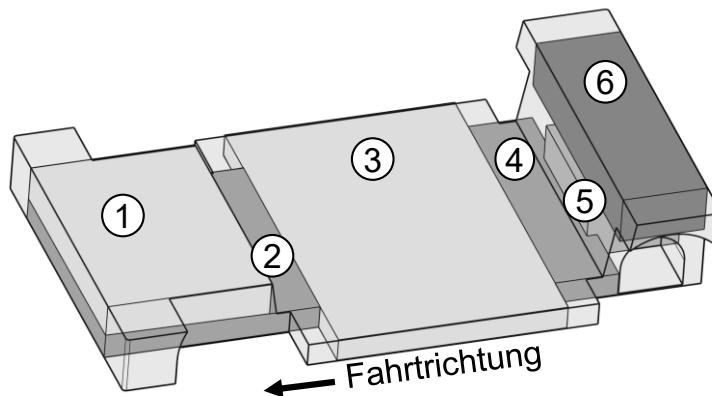


Bild 4: Auswählbare Bauräume/Bauraumsegmente im potentiell nutzbaren Bauraum

Innerhalb dieses Bauraumes können 6 real nutzbare Bauräume/Bauraumsegmente zur Anordnung von Batteriezellen identifiziert werden. Welche dieser Bauraumsegmente für die Optimierung genutzt werden sollen, entscheidet der Anwender über eine True/False-Option innerhalb des *Dokuments zur Anwenderinteraktion*.

Die anschließende Problematik besteht in der Belegung der ausgewählten Bauraumsegmente mit Batteriezellen, die in Zellmodule zusammengefasst werden.

Zellmodule, welche exemplarisch aus Rundzellen bestehen, sind in ihrer Formgebung flexibel. Das beruht darauf, dass die einzelnen Zellen in verschiedenster Weise nebeneinander angeordnet sein können. Wichtig ist in allen Fällen die Einhaltung der Mindestmenge an Rundzellen, die für die nötige Betriebsspannung im seriell verschalteten Zellmodul notwendig ist. Um ein Zellmodul mit einer Betriebsspannung von ca. 100 V aufzubauen, bei einer Zelle mit einer Nennspannung von 3,2 V, kann ein Modul aus 8x4 Zellen bestehen, woraus sich eine Gesamtzahl von 32 Zellen ergibt, aber auch eine 16x2 Anordnung ist in diesem Fall realisierbar. Daraus wird die Flexibilität eines Zellmoduls aus Rundzellen ersichtlich, aber auch, dass es unterschiedliche Formate gibt.

Ein zentraler Punkt des Algorithmus bezüglich der Auslegung der Batterie ist die Anordnung aller Zellmodule zueinander. Es muss eine geeignete Vorgehensweise vorhanden sein, um die durchaus große Anzahl an Zellmodulen durch einen Algorithmus im verfügbaren Bauraum anordnen zu können und dabei das Restvolumen so gering wie möglich zu

halten. Bild 4 zeigt einen Bauraum in der x-y Ebene in dem 9 Zellmodule gleicher Größe angeordnet sind sowie das Restvolumen (schraffierter Bereich) – die belegte Fläche wird in den nachfolgenden Ausführungen als Hauptraster bezeichnet.

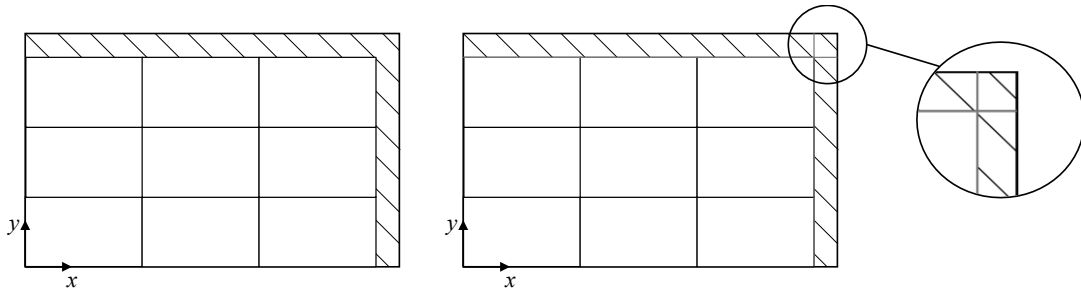


Bild 4: Restvolumen des Bauraums bei Verwendung genau eines Rasters (links), Aufteilung des Restvolumens in drei weitere Raster (rechts)

Um das Restvolumen nutzbar zu machen und mit in die Optimierung aufzunehmen, wurde es zu diesem Zweck in drei weitere Raster unterteilt (Nebenraster). Die rot dargestellten Linien definieren hierbei die Grenzen zwischen den Rastern. Vorteil dieser weiteren Raster besteht darin, je mehr von ihnen im Bauraum vorliegen, desto höher ist die Flexibilität und Fähigkeit sich diesem anzupassen. Dabei werden alle Nebenraster allein von der Größe des Hauptrasters definiert. Wie in Bild 5 (links) zu sehen ist, gibt es einen Vektor (\vec{v}), der das Hauptraster vom Punkt P_0 bis zum Punkt P_1 aufspannt. Da alle Nebenraster mit einer ihrer Ecken an P_1 angrenzen, sind darüber die fehlenden geometrischen Eckdaten bestimmbar. Durch eine beliebige Anpassung des Vektors kann die Anordnung der vier Raster exakt bestimmt werden. Auf diese Weise lassen sich bei Bedarf auch ganze Raster bis zur Bedeutungslosigkeit verkleinern.

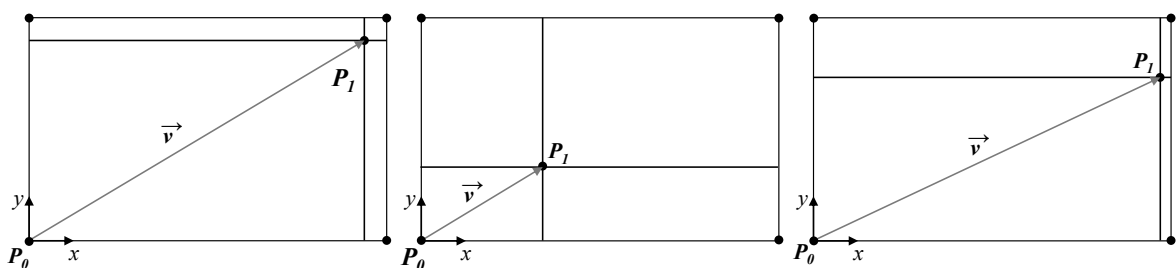


Bild 5: Aufgespannter Vektor im Hauptraster (links) sowie Variationen des Rasterverbands mit Hilfe des Hauptvektors (mitte, rechts)

Eine Überführung des Rasterverfahrens ins Dreidimensionale wird in Bild 6 verdeutlicht. Dazu werden die bereits 4 bekannten Raster um die dritte Dimension erweitert, wodurch

vier Einzelvolumen entstehen. Indem die vier Volumen kopiert und in z-Richtung angefügt werden – wobei sie sich in dieser Richtung nur soweit erstrecken, wie es die Höhe des Bauraumsegmentes zulässt – entsteht der komplette Volumenverband.

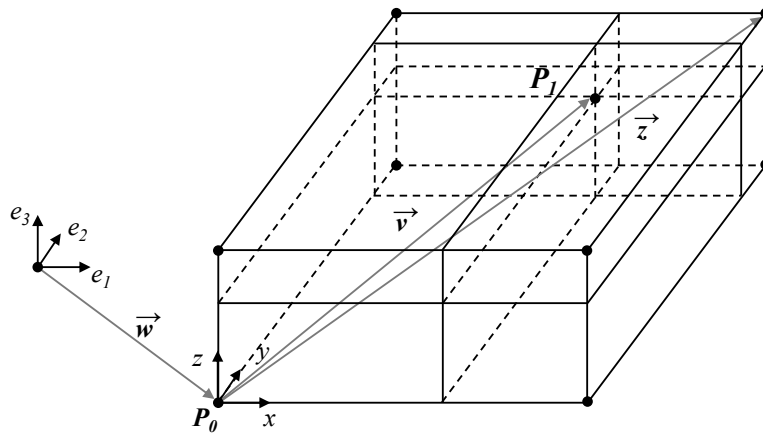


Bild 6: Bauraumsegment samt Einzelvolumen

Auch hier ist es ausreichend, allein anhand des Hauptvektors (v) des Hauptvolumens alle anderen Volumen in ihrer Größe zu bestimmen. Um die Bauraumsegmente (wie sie in Bild 4 dargestellt sind) in ihrer Position und Ausrichtung exakt im Fahrzeug zu beschreiben, ist es notwendig einen Ortsvektor (w) sowie Lagevektor (z) zu definieren (vgl. Bild 6).

3.2 Integration des Rasterverfahrens

Zur Durchführung der Optimierung mittels der Software Matlab muss für den reibungslosen Austausch notwendiger Daten zwischen den Softwareschnittstellen gesorgt werden (vgl. Bild 7).

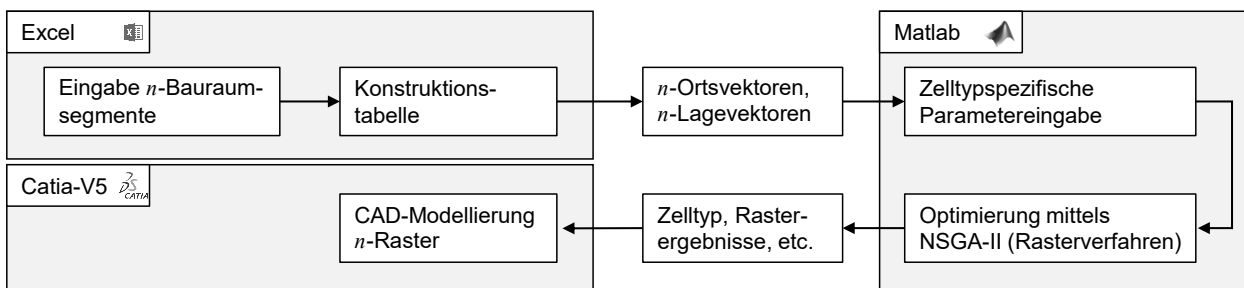


Bild 7: Workflow und Schnittstellen zwischen Excel, Matlab und Catia-V5

Die Optimierung benötigt zum einen die geometrischen Daten aller Bauraumsegmente, wozu die Orts- und Lagevektoren zählen. Zum anderen werden vom Anwender zellspezifische Parameter wie die Zellnennspannung und die Zellkapazität und systemspezifische

Parameter wie die Gesamtspannung der Traktionsbatterie und die Anzahl der Parallelschaltungen pro Zellmodul eingegeben.

Die Optimierung selbst basiert auf dem NSGA-II Algorithmus, der zur Gruppe der genetischen Optimierungsalgorithmen gehört und in geeigneter Weise mit un stetigen Lösungsräumen umgehen kann. Die Entwurfsvariablen, welche die geometrische Struktur aller acht Raster definieren, belaufen sich auf insgesamt 27 – drei für jedes Raster und drei weitere für den Vektor (v) des Hauptvolumens/Hauptrasters. Die Zellmodule lassen sich dabei hinsichtlich ihres Formates an Einzelzellen/Rundzellen als auch bzgl. ihrer räumlichen Ausrichtung variieren. Indem diese Entwurfsvariablen während des iterativen Optimierungsprozesses durch genetische Optimierungsoperatoren verändert werden, entsteht ein immer besseres Ergebnis, welches möglichst viele Zellmodule im Bauraum unterbringt. Zur anschließenden Darstellung des Ergebnisses müssen die Daten an Catia-V5 überführt werden. Dazu werden der darzustellende Zelltyp und die geometrischen Daten aller vorhandenen Raster und deren Zellmodule samt Einzelzellen benötigt. Durch die vollautomatische Erzeugung des dreidimensionalen Modells der Gesamtbatterie im bestehenden Fahrzeugmodell ist die Funktion des Digital Mock-Ups gewährt, wodurch sich die ergebende Traktionsbatterie betrachten und hinsichtlich bestimmter Kriterien, wie zum Beispiel Kollisionsfreiheit, analysieren lässt.

4 Anwendungsprozess

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit des DMUs am Funktionsmuster EDITHA I der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg gezeigt. Hierbei handelt es sich um einen Smart Fortwo der Baureihe 451, dessen konventioneller Antrieb mit Verbrennungsmotor durch einen dezentralen elektrifizierten Antriebsstrang mit zwei radnahen E-Maschinen, die die Hinterräder antreiben, ersetzt wurde. Der derzeitige Energiespeicher besteht aus prismatischen Zellen (Thunder Sky Winston) mit einer Gesamtspannung von 100 V bei einer gespeicherten Energie von 15,6 kWh. Durch den Wegfall des Kraftstofftankes ergibt sich im Bodenbereich ein Bauraum zur Anordnung des Energiespeichers, der bereits im Fahrzeug genutzt wird. Ein weiterer Bauraum zwischen Kofferraumboden und dem Hinterradantrieb bietet ebenfalls die Möglichkeit zur Integration eines Energiespeichers.

Zunächst werden die Fahrzeuggeometrie nach dem Maßkonzept des Fahrzeuges und der dezentrale Antrieb definiert. Die bereits vorhandenen Karosseriestrukturen müssen, entsprechend des Conversion Designs, bei der nachträglichen Integration der Energiespei-

cherbauräume berücksichtigt werden. Das geschieht über die Festlegung entsprechender Offsets zu den Grenzflächen der Fahrzeugkomponenten. Anschließend werden aus dem DMU die Bauräume für die Energiespeicher abgeleitet, die denen von EDITHA I entsprechen.

In den abgeleiteten Bauräumen für den Energiespeicher werden anschließend mittels Rasterverfahren die Batteriezellen angeordnet. Hierfür sollen Rundzellen des Typs 18650 von Panasonic verwendet werden. Neben den Angaben zur Geometrie und deren relevanten elektrischen Eigenschaften müssen die Höhe der Kontaktierungselemente zur Verschaltung der Zellen, die Abstände zwischen den Zellmodulen sowie die Wanddicke vom Gehäuse des jeweiligen Zellmodulgehäuses definiert werden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Eingabeparameter der Batteriezelle (Panasonic 18650) für das Rasterverfahren in MATLAB

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Zell-Nennspannung	3,2 [V]	Kontaktierungselementhöhe am Zellmodul	5 [mm]
Zellkapazität	3 [Ah]	Wanddicke des Zellmodulgehäuses	3 [mm]
Gesamtspannung	100 [V]	Abstand zwischen den Zellmodulen	5 [mm]
Zellendurchmesser	18 [mm]	Gewicht einer Zelle	46 [g]
Zellenhöhe	65 [mm]		

Durch das in Kapitel 3 beschriebene Rasterverfahren werden die Batteriezellen zu Zellmodulen verschaltet, die entsprechend der vorgegebenen geometrischen Restriktionen in den beiden zur Verfügung stehenden Bauraumsegmenten angeordnet werden. Für die berechneten Lösungen werden jeweils die Anzahl der Zellmodule über dem Restvolumen im Energiespeichermodule in Diagrammen dargestellt (Bild 8).

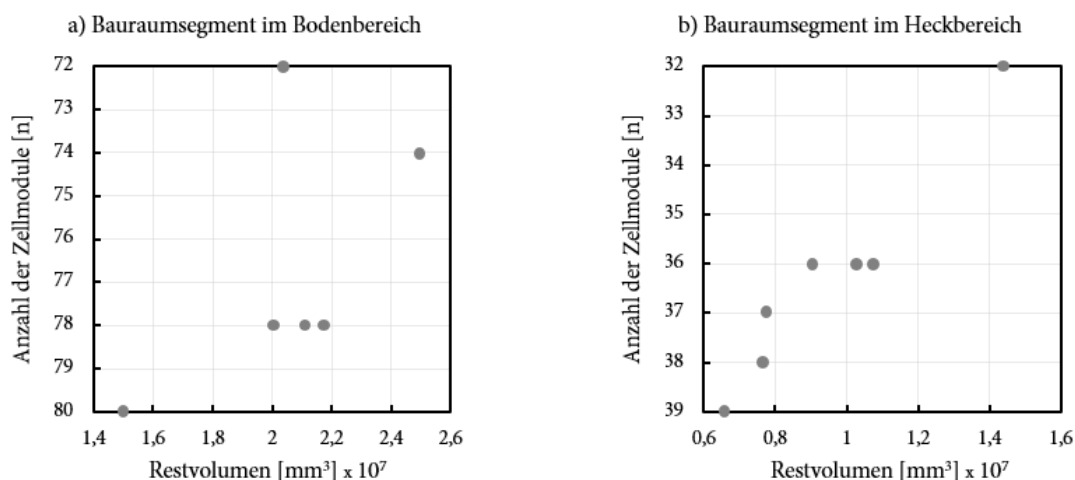


Bild 8: Ermittelte Lösungen zur Anordnung der Batteriezellen in den jeweiligen Bauraumsegmenten

In dem Bauraum im Bodenbereich (Bild 8, a) können nach den ermittelten Lösungen maximal 80 Zellmodule bei einem Restvolumen von 15 dm^3 angeordnet werden. Im Bauraum im Heckbereich (Bild 8, b) sind es maximal 39 Zellmodule bei einem Restvolumen von $6,5 \text{ dm}^3$. Das ergibt für beide Bauraumsegmente zusammen eine Zellmodulanzahl von 119, was für den Energiespeicher mit einer erzielten Spannung von $102,4 \text{ V}$ eine Energie von $36,55 \text{ kWh}$ zur Folge hat. Im Umkehrschluss zu EDITHA I würde das bedeuten, dass mit der 18650 Zelle von Panasonic die Reichweite mehr als verdoppelt werden konnte. Die Lösungen sollen für die Integration im Fahrzeugmodell verwendet und dargestellt werden. Hierzu werden mittels eines Makros die Bauraumdaten von Matlab an CATIA-V5 übergeben und das gesamte Modell mit den Batteriezellmodulen entsprechend der vorgegebenen Bauräume erzeugt (Bild 9).

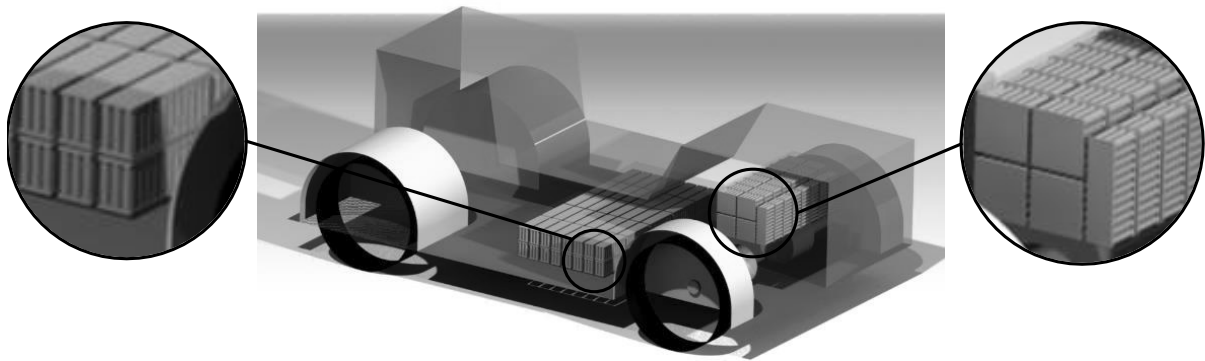


Bild 9: Anordnungen der Batteriezellmodule im DMU nach den von Matlab berechneten Ergebnissen

Gut zu erkennen sind die unterschiedlichen Raster je Bauraumsegment. So ist festzustellen, dass sich im unteren Bauraumsegment (Bodenbereich) nur ein Raster ausgebildet hat, hingegen es im Heckbereich zwei sind. Die zwei Raster im Heckbereich sind darauf zurückzuführen, dass es ein größeres Hauptraster gibt und ein zweites, deutlich kleineres, wodurch versucht wird, den restlichen Bauraum möglichst optimal auszunutzen.

Eine abschließende Überprüfung der visuellen Ergebnisse durch den Anwender ermöglicht eine gezielte Bewertung jeder einzelnen Lösung für ein Grobkonzept, das durch das DMU erstellt wurde.

5 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Das in diesem Beitrag vorgestellte DMU hilft zukünftig Konstrukteuren bei der konzeptionellen sowie konstruktiven Bewertung von Energiespeichern in der frühen Fahrzeuggrobgestaltung. Der Fokus liegt dabei sowohl auf der schnellen Erzeugung unterschiedlicher

Fahrzeugklassen, mit integrierter Antriebstopologie sowie den auszuwählenden realnutzbaren Bauraumsegmenten als auch auf die optimierte Batteriezellanordnung durch das beschriebene Rasterverfahren. Damit wird, neben den bisherigen aus der Literatur bekannten Ansätzen, eine weitere Methodik aufgezeigt, um bereits in der frühen Fahrzeuggrobgestaltung - mit Blick auf das Purpose Design - fundierte Aussagen über den Energiespeicher treffen zu können.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich die Energiespeicherauslegung durch die Verwendung von Konstruktionstabellen und Makros in Catia-V5, Excel und Matlab sowie die Verwendung eines parametrischen CAD-Modells automatisiert umsetzen lässt. Dadurch wird die Auslegung der Energiespeicher deutlich effizienter und einfacher. Erweiterungspotential besteht in der Ergänzung des parametrischen CAD-Modells um weitere relevante Elemente. So könnte z. B. durch eine integrierte Aufbaustruktur der Karosserie Aussagen zur Fahrzeugsteifigkeit und -sicherheit getroffen werden.

Literatur

- [1] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 7. Aufl., ATZ / MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2013. – ISBN 978-3-658-01690-6
- [2] Stefaniak, T.; Maiwald, D.; Eickhoff, M.; Grote, K.-H.: Produktentwicklung in der Elektromobilität - Opportunismus im Zeichen der Konstruktionsmethodik, in 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016, Aufl.14, 2016. – ISBN 978-3-8440-4732-5
- [3] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-29568-3
- [4] Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management, 2. Aufl., VDI, Springer, Dordrecht, 2013. . – ISBN 978-3-540-44373-5
- [5] DIN 70020: Allgemeine Begriffe im Fahrzeugbau, Beuth Verlag. Deutsches Institut für Normung, 1972.
- [6] Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen, 2. Aufl., ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2011. – ISBN 978-3-8348-1412-8
- [7] Lüdecke, S.; Stefaniak, T.: Plug&Play zum Hochvoltantrieb, Industrieanzeiger, 2016.
- [8] Kuchenbuch, K.: Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge, Dissertation, AutoUni, Wolfsburg, 2012.
- [9] Ried, M.: Lösungsraumanalyse für Plug-In-Hybridfahrzeuge hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Essen, 2014.
- [10] Bubb, H.: Automobilergonomie, ATZ / MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. – ISBN 978-3-8348-1890-4

Kreativitätsmethoden im digitalen Umfeld – Aktive Förderung von Innovationsimpulsen in standortverteilten Entwicklungsteams

Benjamin Walter, Monika Klippert, Mark Kunz, Albert Albers, Nicolas Reiß

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

Campus Süd, Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Email: (Albert.Albers, Benjamin.Walter, Nicolas.Reiss)@kit.edu, Klippert@mail.ipek.kit.edu, mark@kunz-odenheim.de

Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

Inhalt: Derzeit existieren kaum Ansätze, die die gemeinsame Generierung von Innovationsimpulsen in standortverteilten Entwicklungsteams gezielt unterstützen. Dies führt dazu, dass sie ihr Potential deutlich schlechter oder nur mit deutlich erhöhtem finanziellen Aufwand ausschöpfen können. Der vorliegende Beitrag präsentiert drei Kreativitätsmethoden für standortverteilte Entwicklungsteams. Diese basieren auf bekannten Methoden und deren Prinzipien und transferieren sie mit Hilfe moderner Medien in den virtuellen Raum. Die Methoden werden im Rahmen einer empirischen Live-Lab-Studie sowie in ihrem Einsatz in Entwicklungsprojekten in zwei Unternehmen evaluiert.

Abstract: At present, there exist very few approaches, which support the common creation of innovation impulses within distributed product development. This leads to the fact that these teams are able to exploit their potential significantly worse or only with significantly increased financial expenditure. The present paper presents three creativity methods for distributed development teams. These are based on known methods and their principles and transfer them into virtuality using modern media such as an innovation platform. The methods are evaluated in an empirical live-lab study as well as in development projects in two companies.

Stichwörter: Kreativität, Kreativitätsmethoden, Innovationsimpulse, standortverteilte Produktentwicklung, Digitalisierung

Keywords: Creativity, Creativity methods, innovation impulses, distributed product development, digitalization

1 Einführung und Motivation

Kreativitätsmethoden als zentrale Methoden des Innovationsmanagements lassen sich zur systematischen Generierung von Innovationsimpulsen in unterschiedlichen Phasen von Produktentwicklungsprojekten einsetzen. Hierdurch tragen sie wesentlich zum Erfolg von Entwicklungsprojekten bei. Vor dem Hintergrund von Globalisierung und Digitalisierung sind jedoch die beteiligten Expertiseträger zunehmend nicht mehr an einem gemeinsamen

Standort angesiedelt. Mit der zunehmenden Integration von Kunden und Lieferanten in Entwicklungsprozesse im Sinne von Open Innovation und Co-creation steigt der Entwicklungsanteil, der von standortverteilten Entwicklungsteams bestritten wird, zusätzlich. Den großen Vorteilen dieser Entwicklung, z.B. die Integration des jeweils passenden Know-hows oder die Möglichkeit zu verbesserter Stakeholder-Integration, stehen auch Nachteile gegenüber, die sich aus der eingeschränkten Möglichkeit ergeben, Aktivitäten gemeinsam und synchron durchzuführen.

2 Stand der Forschung

Nach Konradt und Hertel zeichnet sich ein virtuelles Team durch Mitglieder einer Arbeitsgruppe aus, die ein gemeinsames Ziel verfolgen, an dezentralen Orten zusammenarbeiten und zur Kommunikation überwiegend elektronische Medien einsetzen [1]. Dies gilt auch dann, wenn nicht alle Mitglieder im physischen Raum miteinander interagieren [2]. Der Virtualisierungsgrad der Kommunikation ist deshalb ein entscheidender Faktor bei der Definition virtueller Teams [3]. Methoden sind eine wichtige Grundlage für die Zusammenarbeit in der standortverteilten Produktentwicklung und können nach Lindemann [4] als die Beschreibung einer regelbasierten und geplanten Handlung mit dem Ziel, bestimmte Tätigkeiten nach ihrer Spezifikation durchzuführen, verstanden werden. Durch die Analyse von mehr als 400 Entwicklungsprojekten aus der Praxis zeigte Graner [5], dass eine integrierte Methodenanwendung den Ingenieur im Produktentwicklungsprozess stark unterstützen kann. So fördern intuitive Methoden wie das Brainstorming, das Brainwriting, die 6-3-5-, die Reizbild oder Reizwortmethode Gedankenassoziationen bei der Suche nach neuen Ideen [4]. Dennoch sind Methoden in die tägliche Entwicklungspraxis von verteilten Teams unzureichend integriert und werden in diesem Zusammenhang nur selten in ihrem Potenzial voll ausgeschöpft. Die jüngsten Forschungen über diesen Mangel an Akzeptanz kommen zu dem Schluss, dass die Wissenschaft oft zu weit von der Realität entfernt ist [6, 7]. Insbesondere in kreativen Aktivitäten werden individuelle Bedürfnisse des Ingenieurs sowie der individuellen Arbeits- und Denkmuster nur unzureichend berücksichtigt [8, 9]. Es existieren in der Literatur viele Definitionen der Kreativität. So versteht Ehrlenspiel [13] unter Kreativität allgemein die Fähigkeit eines Menschen, Ideen, Konzepte, Kombinationen und Produkte hervorzubringen, die in wesentlichen Merkmalen neu sind und dem Bearbeiter vorher unbekannt waren. Kreativität äußert sich somit als schöpferische Kraft, neue Ideen oder Lösungen zu erschaffen und alte Strukturen neu zu gestalten [14, 15]. Es ist möglich, mit Hilfe

geeigneter Methoden, die Kreativität anzuregen, wodurch sich das vorhandene Kreativitätspotential besser nutzen lässt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, den Prozess der Ideengenerierung in Teilen zu formalisieren, was seine Planbarkeit und Kontrollierbarkeit steigert. Die hohe Lösungsvielzahl führt zusätzlich dazu, dass eine rationelle und objektive Auswahl der besten Ideen ermöglicht wird. Weiterhin steigert der Einsatz dieser Methoden die Wahrscheinlichkeit, gute Lösungen zu erhalten im Vergleich zu einem Vorgehen ohne Methode [16, 17]. In der Praxis werden allerdings nur eine geringe Anzahl an Kreativitätsmethoden verwendet. So wird Brainstorming [10] von fast jedem Ingenieur (98%) verwendet, während andere Methoden wie 6-3-5 (42%) oder Brainwriting (36%) deutlich seltener eingesetzt werden. Die Überführung derjenigen Entwicklungsmethoden in eine virtuelle Umgebung, die die zwischenmenschliche Interaktion stark betreffen, ist eine große Herausforderung der Methodenforschung. Erste Vorarbeiten zeigen aber, dass das Brainstorming in standortverteilten Entwicklungsteams zu Vorteilen hinsichtlich der Quantität der Ergebnisse und der Zufriedenheit der Teammitglieder führen kann [11]. Das Brainwriting weist ähnliche Vorteile wie das virtuelle Brainstorming auf [12]. Um aber bei der Durchführung von Methoden der Produktentwicklung in standortverteilten Teams Probleme zu vermeiden und Vorteile zu nutzen, ist die weitere Erforschung und der Transfer dieser Methoden in die virtuelle und Arbeitsumgebung unerlässlich [3].

3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Derzeit fehlen erprobte Kreativitätsmethoden für die standortverteilte Produktentwicklung. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages sollen daher drei Kreativitätsmethoden für standortverteilte Entwicklungsteams vorgestellt werden. Hierzu werden insbesondere folgende Forschungsfragen beantwortet:

1. Welche technischen Anforderungen ergeben sich an Kreativitätsmethoden für den Einsatz in standortverteilten Entwicklungsteams?
2. Wie sollten Kreativitätsmethoden für den erfolgreichen Einsatz in standortverteilten Entwicklungsteams gestaltet werden?
3. Was sind Erfolgsfaktoren und Barrieren bei der Anwendung dieser Methoden in standortverteilten Entwicklungsteams?

4 Forschungsmethodik und Forschungsumgebung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden in einem ersten Schritt bereits bestehende Kreativitätsmethoden hinsichtlich ihrer Merkmale analysiert. Aufbauend werden technische

Anforderungen an Kreativitätsmethoden für den Einsatz in standortverteilten Entwicklungsteams erarbeitet. Auf dieser Grundlage werden drei Kreativitätsmethoden entwickelt, die mittels detaillierter Methodensteckbriefe beschrieben werden. Diese gehen neben dem Wirkprinzip und der Durchführung ebenfalls auf die zu verwendenden Tools ein. Aufbauend darauf werden Methodenanleitungen und –videos erstellt, die zur Unterstützung des Verständnisses der Methodenanwendung dienen. Diese werden weiterführend in ein Schulungskonzept zur Vermittlung der Methoden integriert. Die Evaluierung der entwickelten Kreativitätsmethoden erfolgt im Rahmen eines Live-Labs sowie aufbauend in ihrem Einsatz in zwei standortverteilten Entwicklungsprojekten in unterschiedlichen Unternehmen.

Live-Labs im Sinne der Produktentwicklung lassen sich als Forschungsumgebungen beschreiben, in denen sich „Methoden und Prozesse der Produktentwicklung in einem möglichst realen Entwicklungsprozess [...] erforschen und gleichzeitig die Randbedingungen in hohem Maße gestalten“ lassen [18]. Im Rahmen dieses Beitrages wurde das Live-Lab ProVIL im Sommersemester 2016 genutzt. ProVIL ist ein vierphasiges studentisches Entwicklungsprojekt, welches als Fachpraktikum im Masterstudium Maschinenbau angeboten und in Kooperation mit einem Industrieunternehmen durchgeführt wird [19]. In ProVIL arbeiten die Studierenden in weiten Teilen ortsungebunden auf einer Innovationsplattform zusammen [20]. Durch die vom Industriepartner definierte, reale Entwicklungsaufgabe und dem zu Grunde liegenden Produktentwicklungsprozess mit regelmäßigen Meilensteinen verfolgen die Studierenden den Projekterfolg mit großer Ausdauer und weitestgehend aus intrinsischer Motivation. Daher eignet sich ProVIL als Validierungsplattform für vielfältige Methoden der standortverteilten Zusammenarbeit zur Erzielung realitätsnaher, empirischer Untersuchungsergebnisse. Derzeit nutzt beispielsweise eine aktuelle Studie ProVIL 2017 zur Untersuchung der Szenario-Technik für die standortverteilte Produktentwicklung [21].

5 Ergebnisse

5.1 Technische Anforderungen an die Implementierung von Kreativitätsmethoden für ihren Einsatz in standortverteilten Entwicklungsteams

Eine wichtige Randbedingung im Kontext Standortverteilung ist die Digitalisierung der Zusammenarbeit. Bisher bewährte Entwicklungsmethoden können aufgrund eingeschränkter Interaktionsmöglichkeiten nicht ohne weiteres in die vernetzte und (teil-) digitalisierte Arbeitswelt der standortverteilten Produktentwicklung übernommen werden. Mit steigender Verfügbarkeit neuer Medien und Softwaretools werden allerdings die vorhandenen Einschränkungen zunehmend aufgehoben. Durch Analyse der Bedarfe von standortverteilten

Entwicklungsteams im Hinblick auf die Anwendung von Kreativitätsmethoden ergeben sich folgende Anforderungen:

- Audiobasierte Konversation ermöglichen
- Gemeinsames Betrachten von Bildern und Texten ermöglichen
- Sammeln von Wort- und Textbeiträgen unterstützen
- Dokumentation der Tätigkeit unterstützen
- Wechselseitige Bearbeitung (durch Teilnehmer) elektronischer Inhalte ermöglichen
- Gemeinsames Betrachten gesammelter Texte unterstützen

5.2 Kreativitätsmethoden für standortverteilte Entwicklungsteams

Die im Rahmen des vorliegenden Beitrags entwickelten Kreativitätsmethoden für standortverteilte Entwicklungsteams bauen auf wesentlichen Elementen bereits bekannter Kreativitätsmethoden, wie sie in Entwicklungsteams am gleichen Standort eingesetzt werden, auf. Zudem berücksichtigen sie die beschriebenen Anforderungen standortverteilter Entwicklungsteams, die durch die Funktionalität der verwendeten Tools adressiert werden. Dies sind eine Webkonferenz-Software (z.B. Skype) in Kombination mit einer Möglichkeit zum schnellen Dokumentieren und Teilen von Arbeitsergebnissen, wie sie beispielsweise eine Innovationsplattform (z.B. SAP Innovation Management) bereitstellt werden. Insbesondere ist hierbei entscheidend, dass die synchrone Durchführung von Aktivitäten ermöglicht und auf asynchron durchgeführte Aktivitäten bestmöglich abgestimmt wird. Hierdurch werden die Schwächen unterschiedlicher Standorte der an einer Kreativitätssitzung beteiligten Personen möglichst gut ausgeglichen. Daraus können sich andererseits auch positive Aspekte ergeben, wie beispielsweise eine höhere Konzentration der Teilnehmer, die sich bei entsprechender Moderation in manchen Fällen besser fokussieren lassen als bei physischen Treffen. Die drei entwickelten Methoden, 4-3-X-Methode, Reizbild-Tsunami 2.0 sowie die Reizwortmethode 2.0 lassen sich anhand einer Vielzahl von Attributen beschreiben (vgl. Tabelle 1). Allen Methoden ist gemeinsam, dass sie gezielt einen Stimulus in Form von themenfremden Reizbildern bzw. Reizworten einbringen. Diese sollen den kreativen Denkprozess fördern, indem mentale Vorfixierungen gezielt aufgelöst werden. Sobald der Ideenfluss in einer Runde zum Erliegen kommt bzw. nach Ablauf einer bestimmten Frist wechselt der Moderator den Stimulus, womit eine neue Runde beginnt.

Tabelle 1: Attribute und deren Ausprägungen von Kreativitätsmethoden für standortverteilte Entwicklungsteams (Auszug)

Kategorie	Kriterium	4-3-X-Methode	Reizbild-Tsunami 2.0	Reizwortmethode 2.0
Zielsystem	Wirkprinzip	assoziativ und konfrontativ		
	Impuls	Reizbild	Reizbild	Reizwort
	Abgeleitet von	6-3-5 Methode	Brainwriting	Brainstorming
	Ideen	qualitativ	quantitativ	qualitativ
Durchführung	Anzahl der Teilnehmer	4	4-6	4-6
	Anzahl der Runden	4	10	10
	Dauer einer Runde	9/ 10,5/ 12/ 13,5 Minuten	6 Minuten	6 Minuten
	Art der Ideengenerierung	schriftlich	schriftlich	mündlich
	Anzahl der generierten Ideen pro Runde	3 Ideen pro Runde	uneingeschränkt	uneingeschränkt
	Arbeitsweise	Einzelarbeit	Einzel-/ Gruppenarbeit	Gruppenarbeit
Soziale Faktoren	Hierarchie	Hierarchieabbau wird gefördert	Hierarchieabbau wird nicht gefördert	
	Einbindung	Methode fördert die Einbindung aller TN	Einbindung aller TN (auch introvertierterer) muss durch Moderation sichergestellt werden	

Bei der **4-3-X-Methode** bearbeitet jeder Teilnehmer in einer Runde drei mit einem Reizbild versehenen so genannte Ideenkarten, die neben einem Schriftfeld auch die Möglichkeit der Einbindung von Grafiken bieten. In jeder Runde notieren die Teilnehmer ihre Gedanken und Assoziationen in Eigenarbeit schriftlich. Die drei Ideenkarten pro Teilnehmer werden in der jeweils nächsten Runde von dem nachfolgenden Teilnehmer bearbeitet, indem die Ideen weiterentwickelt und in ihrem Reifegrad gesteigert werden. Auf diese Weise bilden die Ideen der jeweiligen Vorgänger einen zusätzlichen Stimulus für die Kreativität des aktuellen Bearbeiters der Ideenkarten. Die Durchführung endet sobald jeder Teilnehmer alle Ideenkarten bearbeitet hat. Durch die feste Anzahl an Ideenkarten begrenzt die 4-3-X-Methode die Anzahl der Ideen und legt den Fokus auf hohe Ideenqualität.

Das **Reizbild Tsunami 2.0** zielt vor allem auf eine hohe Quantität der generierten Ideen ab. Hierzu nutzt es ebenso wie die 4-3-X-Methode themenfremde Bilder als Impulsgeber. In jeder Runde reflektieren die Teilnehmer das Gezeigte im Stillen und äußern Ihre Ideen laut, um sie mit allen Teilnehmern zu teilen. Daraufhin halten die Teilnehmer ihre eigenen Ideen

schriftlich fest. Nach einer ersten Ideensammlung werden alle Teilnehmer aufgefordert neben der Entwicklung eigener Ideen, die Ideen anderer zu ergänzen ohne dabei Kritik an Beiträgen zu äußern. Beim Reizbild Tsunami 2.0 fungieren die ausgesprochenen bzw. bereits dokumentierten Ideen der anderen Teilnehmer neben den Reizbildern als zusätzliche Stimuli.

Anders als bei den vorangegangenen Methoden werden den Teilnehmern bei der Durchführung der **Reizwortmethode 2.0** Wörter als Stimuli vorgesprochen. Die Teilnehmer äußern ihre Ideen nacheinander stichwortartig, die im Anschluss vom Moderator und nicht von den Teilnehmern selbst dokumentiert werden. Nach einer kurzen Sammlung der Ideen, werden diese geclustert. Daraufhin überlegen die Teilnehmer, inwiefern die generierten Impulse zur Lösung der konkreten Aufgabenstellung genutzt werden können. Im Fokus der Reizwortmethode 2.0 steht vor allem die direkte Interaktion der Teilnehmer miteinander. Ähnlich wie die 4-3-X-Methode zielt die Reizwortmethode 2.0 auf einen erhöhten Reifegrad der Ideen ab. Wie bei den Ergebnissen der beiden anderen Kreativitätsmethoden, können bei der Nachbereitung zusätzlich weitere Ideen geniert werden.

5.3 Erfolgsfaktoren und Barrieren bei der Anwendung von Kreativitätsmethoden in standortverteilten Entwicklungsteams

Die Evaluierung der drei vorgestellten Kreativitätsmethoden im Live-Lab ProVIL sowie in zwei Unternehmen ergaben große Überschneidungen hinsichtlich der Erfolgsfaktoren und Barrieren des Methodeneinsatzes, aber teilweise auch Abweichungen (vgl. Bild 1).

Im Live-Lab		Im Live-Lab und Unternehmen					Im Unternehmen		
Einsatz von Reizbildern	Gute Wissensbasis	Moderator für virtuelle Teams	Lockere Anmoderation der Kreativitätssitzung	Interaktives Schulungskonzept für Moderatoren	Detaillierte Methodenanleitungen	Anschauliche Methodenvideos	Intrinsische Motivation der Teilnehmer	Methodische Erfahrung der Teilnehmer	Konzentration der Teilnehmer
Ideenquantität	Technische Probleme	Synchrone Dokumentation von Innovationsimpulsen	Übertragung von Mimik und Gestik per Webcam	Instabile Internetverbindung und unruhige Umgebung	Sprachliche Barrieren	Zu große Gruppengröße	Vertrautheit mit verwendeten Tools	Höherer Zeitbedarf als bei physischen Treffen	

Bild 1: Erfolgsfaktoren (hell) und Barrieren (dunkel) bei der Anwendung von Kreativitätsmethoden in standortverteilten Entwicklungsteams

Im Rahmen des Live-Labs wurden 10 Erfolgsfaktoren und 4 Barrieren identifiziert, während sich in den untersuchten Industrieunternehmen 11 Erfolgsfaktoren und 4 Barrieren ergaben. Zentraler Erfolgsfaktor sowohl im Live-Lab-Kontext als auch in Unternehmen ist der Einsatz

eines erfahrenen Moderators, der insbesondere mit den erschwerten Bedingungen der Online-Einbindung von Personen an unterschiedlichen Standorten bei der Methodenanwendung umgehen können muss. Da diese Kompetenz häufig nicht verfügbar ist, bedarf es eines interaktiven Schulungskonzeptes für Moderatoren. Zudem ergab sich, dass die Erklärung der Methoden den Teilnehmern gegenüber mit Hilfe von detaillierten Methodenanleitungen und anschaulichen Methodenvideos als sehr nützlich bewertet wird. Um jederzeit für Transparenz hinsichtlich des aktuellen Geschehens zu sorgen ist es zudem entscheidend, dass die synchrone, für alle sichtbare Dokumentation von Innovationsimpulsen erfolgt. Wie zu erwarten stellen Defizite bei der Internetverbindung und in Bezug auf die Umgebung der Teilnehmer die größten Barrieren dar, die die Durchführung der Methoden jedoch nicht verhindern. Bei der Anwendung im Live-Lab wurden der Einsatz von Reizbildern sowie eine gute Wissensbasis der Teilnehmer als Erfolgsfaktoren festgestellt. Dies konnte in den Industriestudien weder bestätigt noch widerlegt werden, vermutlich da bei den beteiligten Ingenieuren bereits viel Expertise hinsichtlich der zu entwickelnden technischen Systeme bestand. Eine Barriere im Live-Lab waren zudem technische Probleme (Headsets, langsame PCs, etc.), die auf den Einsatz der sehr heterogenen, privaten Infrastruktur der Studierenden zurückzuführen sind und in dieser Form in der Industrie durch das Vorhandensein einer einheitlichen IT-Infrastruktur vermieden werden können.

Beim Einsatz der Methoden in den Industrieunternehmen wurden als zusätzliche Erfolgsfaktoren die intrinsische Motivation der Teilnehmer, deren methodische Erfahrung, eine hohe Konzentration sowie die Vertrautheit mit den verwendeten Tools identifiziert. Im Live-Lab kann die intrinsische Motivation, die konzentrierte Durchführung der Methoden sowie eine genügende Toolaffinität vorausgesetzt werden, so dass dies nicht explizit als Erfolgsfaktor auftritt. Als zusätzliche Barriere in der Industrie wurde festgestellt, dass die Teilnehmer die standortverteilte Methodenanwendung mit der Vor-Ort-Anwendung von Methoden vergleichen und sich teils über den erhöhten Zeitbedarf beklagen. Dies wird allerdings durch das Wegfallen entsprechender Dienstreisen mehr als kompensiert.

6 Diskussion und Ausblick

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages konnte die prinzipielle Umsetzbarkeit von standortverteilten Kreativitätssitzungen bei entsprechender Methodenunterstützung nachgewiesen werden. Da sich die Verbreitung standortverteilter Entwicklungsaktivitäten derzeit zunehmend ausweitert und der Einsatz von konventionellen Entwicklungsmethoden in diesen Kon-

texten meist nicht möglich ist, sind weitere Forschungsarbeiten in diesem Bereich erforderlich. Hierbei sind jeweils die integrative Betrachtung von Prozessen, Methoden und Tools sowie die Berücksichtigung sozialer und organisationaler Fragestellungen entscheidend. Aufgrund der häufig eingeschränkten Möglichkeiten, empirische Feldstudien hinsichtlich Methoden für standortverteilte Entwicklungsteams durchzuführen, ist darüber hinaus der Aufbau und Ausbau entsprechender Validierungsumgebungen erforderlich. Die in Rahmen dieser Studie verwendete Forschungsumgebung eines Live-Labs ist hierbei ein erfolgversprechender Weg.

Literatur

- [1] Konradt, U.; Hertel, G.: Management virtueller Teams. Von der Telearbeit zum virtuellen Unternehmen, Weinheim: Beltz, 2002
- [2] Sulzbacher, M.: Virtuelle Teams, Tectum Verlag Marburg, 2003
- [3] Walter, B.; Rapp, S.; Albers, A.: The application of creativity methods in virtual development teams in product development, International Design Conference - Design 2016, Dubrovnik/ Croatia, 2016
- [4] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 2009
- [5] Graner, M.: Der Einsatz von Methoden in Produktentwicklungsprojekten: Eine empirische Untersuchung der Rahmenbedingungen und Auswirkungen, Auflage: 2013. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012
- [6] Bavendiek, A.-K.; Inkermann, D.: Konzept zur Methodenbeschreibung und -auswahl auf Basis von Kompetenzen und Zusammensetzung von Entwicklungsteams, DFX 2014 Proc. 24th Symp, Des. X Bamberg, 2014.
- [7] Reiß, N.; Bursac, N.; Albers, A.; Walter, B.; Gladysz B.: Method recommendation and application in agile product development processes, International design conference – DESIGN 2016, 2016
- [8] Lubart, T. I.: Models of the Creative Process: Past, Present and Future, Creat. Res. J., Bd. 13, 2001
- [9] Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Urbanec, J.; Lüdcke, R.: Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application, Proceedings of NordDesign 2014 Conference, 2014
- [10] Oprey, L.: Entwicklungsmanagement: Methoden der Produktentwicklung, Springer Berlin, 2005
- [11] Dennis, A.; Valacich, J.: Computer Brainstorms: More Heads Are Better Than One, Journal of Applied Psychology, Vol.78, No.4, 1993
- [12] Schuler, H.: Gruppe und Organisation, Hogrefe Göttingen, 2004
- [13] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, Hanser Fachbuchverlag, München Wien, 2006
- [14] Maul, L.: Vernetzte Kreativität - Menschzentrierte Gestaltung und Integration einer Community Plattform für Innovationsimpulse, Weissach, 2015
- [15] Backerra, H.; Malorny, C.; Schwarz, W.: Kreativitätstechniken Kreative Prozesse anstoßen, Innovationen fördern. Die K 7, Hanser Fachbuch, Auflage: 2, 2002
- [16] Deigendesch, T.: Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel, Karlsruhe, 2009.

- [17] Gerschka, H.; Zirm, A.: Kreativitätstechniken, in S. Albers, O. Gassman (Hrsg.): Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement, Gabler, Wiesbaden, 2011
- [18] Walter, B.; Albers, A.; Haupt, F.; Bursac, N.: Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab, 27. DfX-Symposium, 2016
- [19] Albers, A.; Bursac, N.; Walter, B.; Hahn, C.; Schröder, J.: ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor, Eee, 2016
- [20] Walter, B.; Albers, A.; Heck, M.; Bursac, N.: ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor: Anpassung einer kollaborativen Innovationsplattform zur Nutzung eines communityorientierten Innovationsprozesses, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier (Hrsg.), 2016
- [21] Walter, B.; Wilmsen, M.; Albers, A.; Bursac, N.: Zukunftsmanagement in Zeiten der Digitalisierung: Die Szenario-Technik als Innovationsmethode in der standortverteilten Produktentwicklung, 13. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung (eingereicht), 2017

Mischreibungsmodell für die Simulation hydrodynamisch wirkender Radialgleitlager unter Einbeziehung statistischer Oberflächeneigenschaften

Stefan Zorn, Klaus Brökel

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/ CAD, Universität Rostock

Albert-Einstein-Strasse 2, 18059 Rostock

E-Mail: stefan.zorn@uni-rostock.de; Internet: <http://www.kt.uni-rostock.de>

Inhalt: Mit dem an der Universität Rostock entwickelten Simulationstool SIRIUS können sowohl hydrostatisch als auch hydrodynamisch wirkende Radialgleitlager bei vollständiger Trennung der Gleitflächen berechnet werden. Die Beschreibung der reinen Hydrodynamik erfolgt mit der erweiterten Reynoldsschen Differentialgleichung nach Wegmann. SIRIUS konnte mit den bestehenden Funktionalitäten bereits in mehreren Projekten validiert werden. Für die Betriebszustände, bei denen die kritische Spalthöhe unterschritten wird und Mischreibungsgebiete auftreten wird allerdings ein gesondertes Mischreibungsmodell benötigt. Hierfür wird ein, in das System SIRIUS implementierbares Mischreibungsmodell vorgestellt. Es erfolgt sowohl die Erläuterung des dafür gewählten statistischen Ansatzes der Oberflächenbeschreibung als auch ein kurzer Einblick in die Umsetzung des Modelles.

Stichwörter: Mischreibung, statistische Oberflächeneigenschaften, Kontaktflächenanteil; Abbott-Kurve

1 Einleitung

Für die Beschreibung der komplexen physikalischen Vorgänge im hydrodynamischen Gleitlager gibt es verschiedene Ansätze, welche sich in ihrem Grad der Idealisierung unterscheiden. Es gibt die reine Hydrodynamik (HD), mit einem ideal zylindrischen, glatten Lager als Modellannahme, die Elasto-Hydrodynamik EHD welche zusätzlich die elastische Rückwirkung aufgrund des hydrodynamischen Druckes berücksichtigt und die Thermoelasto-Hydrodynamik (T-EHD), welche zusätzliche Temperatureinflüsse berücksichtigt. Für die Mischreibungsbetrachtung beschreibt die Literatur zwei verschiedene Ansätze. Zum einen die Betrachtung über die raue EHD und zum anderen, dass Konzept der Lastaufteilung zwischen hydrodynamischen Tragdruck und dem Festkörpertragdruck (erster Ansatz JOHNSON [1] 1971). Hier werden die komplexen Vorgänge über zwei Modelle abgebildet. Es gibt ein trockenes Rauheitskontaktmodell für die Ermittlung des Festkörperkontaktdruckes. Die Berechnung des Flüssigkeitstragdruckes wird durch einen EHD-

Ansatz mit glatten Oberflächen realisiert. Die Zusammenführung der Ergebnisse erfolgt dann über die Proportionalität der Lastaufteilung beider Vorgänge.

An der Universität Rostock existiert das Simulationstool SIRIUS, welches sich in den Bereich der glatten EHD einordnen lässt. Um dessen Leistungsfähigkeit zu erhöhen, sollte das Programm um ein Modul zur Berücksichtigung partielle auftretender Mischreibungsgebiete bei der Simulation von hydrodynamischen Radialgleitlagern erweitert werden. Der Charakter als schnelles Auslegungstool für die Variantenrechnung soll bei der Umsetzung erhalten bleiben. Aufgrund dessen wurde der Ansatz der Lastaufteilung im Mischreibungsgebiet als Basis des Berechnungsmodelles gewählt.

2 Nomenklatur

b	[m]	Lagerbreite	E	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
c	[m]	Schritthöhe	F		Spaltfüllungsgrad
d	[m]	Lagerdurchmesser	F_c	[N]	Festkörperkontaktkraft
h	[mm]	Schmierspalthöhe	F_{ges}	[N]	Lagerbelastung
h_{krit}	[m]	kritische Schmierspalthöhe	F_R	[N]	Reibungskraft
			M_R	[Nm/s]	Wellenreibmoment
			P_R	[W]	Reibleistung
Δh	[m]	Eindringtiefe	Q_{erf}	[cm ³ /s]	erfor. Ölvolumenstrom
p	[Pa]	hydrodynamischer Druck	Q_{ges}	[cm ³ /s]	ges. Ölvolumenstrom
p_c	[Pa]	bezogener Kontaktdruck	W_R	[W]	Wärmeleistung
p_{cav}	[Pa]	Dampfdruck			
t	[s]	Zeit			
u	[m]	Lagerschalenumfang			
w	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit	ϑ	[°C]	Temperatur
$z(x,y)$	[m]	gemessene Rauheiten	μ		Reibkoeffizient
A_c	[m ²]	Kontaktfläche	ρ	[kg/cm ³]	Dichte
A_{rep}	[m ²]	Gitterelementfläche	η	[Pas]	Dynamische Viskosität

3 Das Simulationstool SIRIUS

Das Programm SIRIUS dient zur Berechnung der Druckverläufe und der daraus resultierenden Größen in hydrodynamisch und hydrostatisch wirkenden Gleitlagern bei stationärer

oder instationärer Belastung. Die Berechnung der Druckverläufe und der daraus resultierenden Größen kann durch Vorgabe der Lagerlast oder der Verlagerungsbahnen erfolgen. Als theoretische Grundannahmen ist neben der Reynoldssche Differentialgleichung (R-DGL) mit Gümbelscher Randbedingung auch die Erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung nach Wegmann [2] implementiert.

Die klassische R-DGL ist in der Literatur umfangreich beschrieben (Bsp. in [3] und [4]), weshalb an dieser Stelle auf ihre Darstellung verzichtet wird. Sie geht grundsätzlich von einem vollständig mit Fluid gefülltem Schmierspalt aus. Aufgrund der Kontinuitätsgleichung führt dies im sich öffnenden Schmierspalt zu negativen Schmierfilmdrücken (Sommerfeld'sche Randbedingungen, [5]). Da Schmierstoffe aber nicht in der Lage sind, nennenswerte Zugspannungen zu übertragen [6], [7], ist in diesem Gebiet mit Kavitationerscheinungen zu rechnen. Bei den Gümbel'schen Randbedingungen werden alle negativen Drücke abgeschnitten, d.h. alle Drücke $p < 0$ werden auf $p_{cav} = 0$ gesetzt. Der Übergang zwischen dem Druck- und dem Kavitationsgebiet ist unstetig. Sowohl die Kontinuitätsgleichung als auch die Masseerhaltung werden verletzt. Der zweite Ansatz der erweiterten Reynoldsschen Differentialgleichung nach Wegmann ist ein masseerhaltendes Kavitationsmodell. Die Erweiterte R-DGL nach Wegmann ist im nachfolgenden dargestellt:

$$0 = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{3}{h} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{12\eta}{h^3} \frac{p}{p+c} \left(\frac{wv}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \right) - \frac{12\eta}{h^2} \frac{c}{(p+c)^2} \left(\frac{wv}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (1)$$

Durch die Berücksichtigung von Teilfüllungszuständen im Kavitationsgebiet ist eine Bestimmung des Überganges von Druck- zu Kavitationsgebiet unter Einhaltung der Kontinuitätsgleichung möglich.

Grundlage der Berechnung ist die zweidimensionale Modellierung des Schmierspalt. Der Lagerspalt wird abgewickelt und die ebene Schmierspaltfläche wird in ein rechteckiges Gitternetz (X,Z) mit äquidistanter Schrittweite aufgeteilt. In dem nachfolgenden Bild 1 ist exemplarisch der Druckverlauf über ein grobes Gitternetz mit 200 Elementen dargestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt als Schnitt durch die Lagermittelebene, sodass nur 100 Elemente abgebildet werden.

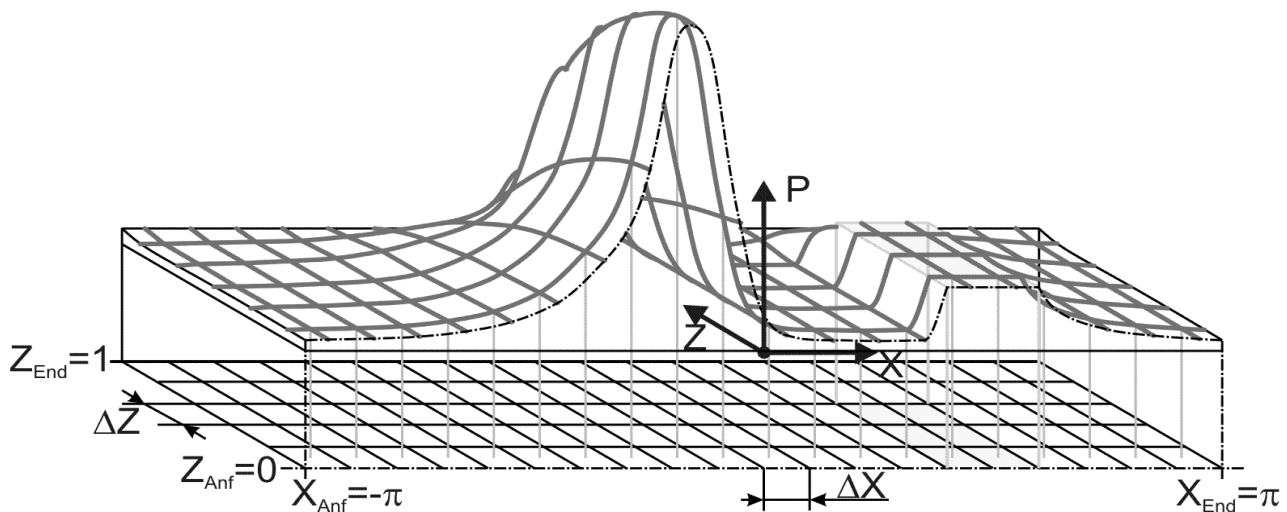


Bild 1: Druckverteilung P über dem Gitternetz (X,Z) der Schmierspaltfläche als Schnitt durch die Mittelebene in einem hydrodynamisch wirkenden Gleitlager [8]

Die numerische Lösung der erweiterten R-DGL erfolgt mit Hilfe des Linearen Differenzenverfahrens. Für jeden Gitterpunkt wird die erweiterte R-DGL aufgestellt. Als Differenzenquotient ergibt sich daraus ein lineares Gleichungssystem, dessen Lösung die Näherungslösung für $P(X,Z)$ darstellt.

Über eine extern ermittelte Steifigkeitsmatrix kann die elastische Spaltaufweitung aufgrund des hydrodynamischen Druckes berücksichtigt werden [9], [10]. Der weitere Funktionsumfang (Berücksichtigung verschiedener Formabweichungen von Lagerschale und Welle, beliebige Schmiernutenanordnung etc.) kann den Veröffentlichungen des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik entnommen werden [11], [12]

4 Statistischer Ansatz für das Mischreibungsmodell in SIRIUS

In einem hydrodynamischen Gleitlager ist Mischreibung als das gleichzeitige Auftreten von Flüssigkeits- und Festkörperreibung definiert (Bild 2). Die Lastaufteilung in diesem Bereich erfolgt demnach zwischen Festkörpertragdruck und dem hydrodynamischen Tragdruck. Mischreibung tritt auf, wenn die kritische Spalthöhe h_{krit} unterschritten wird und erste Rauheitsspitzen in Kontakt treten.

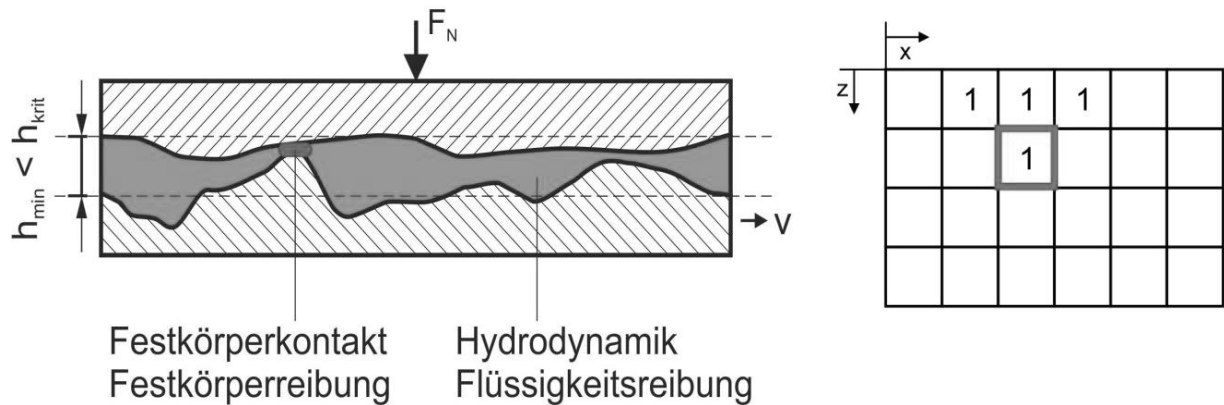


Bild 2: a) Mischreibung als Lastaufteilung zwischen Hydrodynamik und Festkörperkontakt
 b) Kontrollmatrix KMS zur Bestimmung des Mischreibungsbereiches, 1 wenn $h_{\min} < h_{\text{krit}}$

Der Abgleich der Spalthöhe (wenn $h_{\min} < h_{\text{krit}}$ dann Wert=1) liefert eine Kontrollmatrix KMS, in der die Ausdehnung der Mischreibungsbereiche abgelesen werden kann (siehe Bild 2 b). Für diese Bereiche erfolgt die Lösung des Mischreibungsmodelles. Die ideal glatte Hydrodynamik wird dabei mit Hilfe von SIRIUS beschrieben. Im ersten Schritt wird der Einfluss der Oberflächenrauheiten auf den Druckaufbau vernachlässigt.

4.1 Statistische Oberflächencharakterisierung

In SIRIUS ist die zweidimensionale Modellierung des Lagerspaltes die Grundlage der schnellen Berechnung der hydrodynamischen Vorgänge. Gleichzeitig stellt das programminterne Auflösungsvermögen der ebenen Schmierpaltoberfläche einen limitierenden Faktor dar. Mit der aktuell realisierten Gitterauflösung von 50 000 Elementen ist die exakte Auflösung der mikrogeometrischen Gestaltabweichung der Schmierpaltoberfläche mit den lokalen Höheninformationen an jedem Punkt nicht möglich. Die Oberflächenrauheit "[..]" stellt eine dreidimensionale stochastische Verteilung von "Rauheitshügeln" und "Rauheitstälern" dar" ([13] S.33), aus diesem Grund erfolgt die Charakterisierung der Oberfläche für einen repräsentativen Ausschnitt ($\Delta X \cdot \Delta Z$, siehe Bild 1) mit Hilfe der statistischen Kenngrößen von vermessenen realen Gleitlageroberflächen. Ein Kennwert der statistischen Auswertung ist beispielsweise die flächenhafte Materialanteilskurve $\text{Smr}(c)$ (Abbott-Firestone-Kurve) [13], [14]. Mathematisch stellt sie die kumulative Häufigkeitsfunktion der Höhenmesswerte $z(x,y)$ dar und gibt das Verhältnis der Fläche des Materials für eine festgelegte Höhe c zur Fläche des Auswertebereichs an (siehe Bild 3).

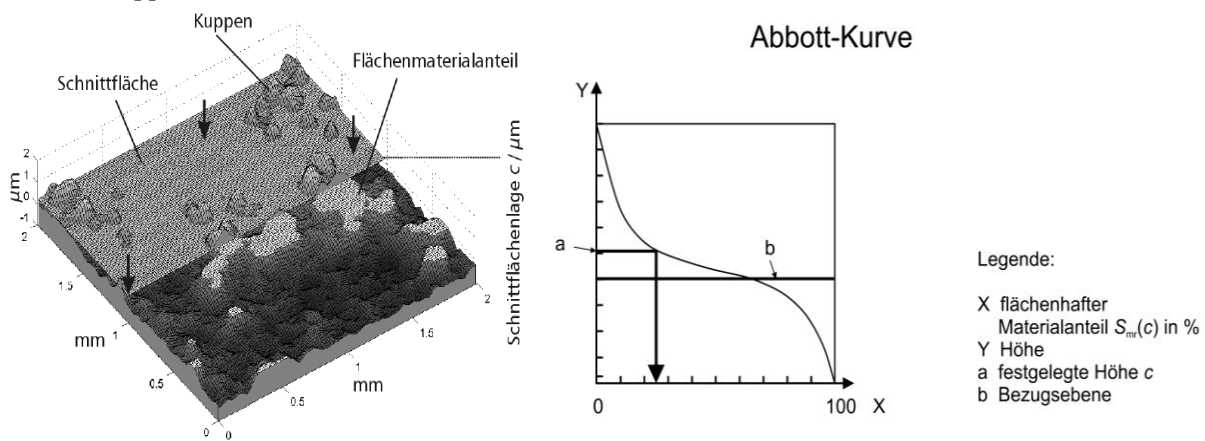


Bild 3: Beispieldarstellung des flächenhaften Materialanteils $S_{mr}(c)$ [16], (links) 3D-Darstellung an realer Oberfläche, (rechts) Abbott-Kurve in Anlehnung an [14]

Der flächenhafte Materialanteil wird mithilfe eines Konfokalmikroskopes bestimmt. Vermessen wurden dabei kleinere Proben mit unterschiedlichen Gleitlagerbeschichtungen (Bild 4). Diese Proben wurden ebenfalls für verschiedene tribologische Untersuchung verwendet, sodass auch Bereiche mit Einlaufspuren vorhanden sind.

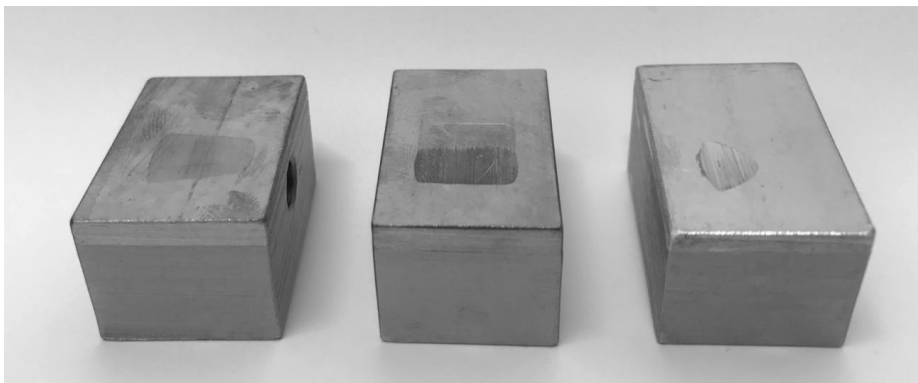


Bild 4: Stahlstützkörper mit verschiedenen Legierungen zur Gleitlagerbeschichtung (v. l. Kupfer-Bronze-, Kupfer-Aluminium- und Blei-Bronze-Legierung)

4.2 Festkörperkontaktmodell

Für das Modell mit rauer Lager- und glatter Wellenoberfläche kann der flächenhafte Materialanteil so interpretiert werden, dass bei gleichsetzen der aktuellen Schmierstalthöhe h_{min} mit c , der aktuelle Kontaktflächenanteil $S_{mr}(c) = S_{mr}(h_{min})$ bezogen auf den Auswertebereich, ausgelesen werden kann. Bezieht man $S_{mr}(c)$ auf den repräsentativen Ausschnitt eines Gitternetzelementes A_{rep} , erhält man die in Kontakt stehende Fläche A_c (siehe Bild 5). Diese Modellannahme lässt den Einfluss der in Kontakt getretenen Rauheitsspitzen auf die umliegende Oberfläche unberücksichtigt.

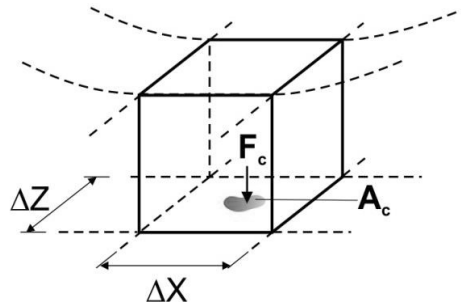


Bild 5: Prinzipdarstellung der Kontaktfläche A_c an einem Schmierspaltenelement

$$A_c = Smr(h_{min}) * A_{rep} \quad (2)$$

$$A_{rep} = \Delta X * \Delta Z = \frac{u}{NX} * \frac{b}{NZ} = \frac{\pi d}{NX} * \frac{b}{NZ} \quad (3)$$

Bei der Ermittlung der wirkenden Festkörperkontaktkraft F_c wird ein einfaches Kontaktmodell verwendet. Es wird von einem rein elastischen, eindimensionalen Ansatz ausgegangen (Hookesches Gesetz).

$$F_x = EA \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Die Ausgangslänge l_0 ist gleichzusetzen mit der kritischen Spalthöhe h_{krit} und die Wegänderung Δl entspricht der Eindringtiefe $\Delta h = h_{krit} - h_{min}$. Werden diese Werte in die Ausgangsformel (4) eingesetzt, ergibt sich die wirkende Festkörperkontaktkraft aufgrund der elastischen Verformung wie folgt:

$$F_c = EA_c \frac{\Delta h}{h_{krit}} \quad (5)$$

$$F_c = \frac{E * Smr(h_{min}) * \pi * d * b * \Delta h}{h_{krit} * NX * NZ} \quad (6)$$

Wird die Festkörperkontaktkraft auf die Fläche des repräsentativen Gitternetzausschnittes bezogen, ergibt sich der bezogene Kontaktdruck p_c .

$$p_c = \frac{F_c}{A_{rep}} \quad (7)$$

4.3 Gesamttragfähigkeit und Reibleistung

Die Gesamttragfähigkeit im Mischreibungsgebiet ergibt sich dann als Summe von Festkörpertragdruck und hydrodynamischen Tragdruck. Ebenso verhält es sich mit der in das

System eingebrachten Reibleistung. Diese ergibt sich als Summe der Reibleistung aus der Flüssigkeitsreibung und aus der Festkörperreibung.

$$P_{Rgesamt} = P_{Rhydro} + P_{RFestkörper} \quad (8)$$

Die Festkörperreibleistung ergibt sich aus der ermittelten Festkörpertragkraft, dem experimentell ermittelten Reibkoeffizienten und der Geschwindigkeit an der Wellenoberfläche.

$$P_{RFestkörper} = F_R * v_{we} = \mu * F_c * v_{we} \quad (9)$$

Die hydrodynamische Reibleistung wird mit nachfolgender Formel über das Wellenreibmoment M_R berechnet und zur Gesamtreibleistung aufsummiert.

$$P_{Rhydro} = \frac{M_R * v_{we} * 2}{d} \quad (10)$$

$$P_{Rgesamt} = \frac{M_R * v_{we} * 2}{d} + \mu * F_c * v_{we} \quad (11)$$

Die erzeugte Reibungswärme W_R wird über das Öl ($W_{\dot{O}l}$) und das Lager (W_L) abgeführt.

$$W_R = W_{\dot{O}l} + W_L \quad (12)$$

Nimmt man eine vollständige Wärmeabfuhr über das Öl und eine zulässige Erwärmung ϑ_{zul} als Werkstoffgrenze an, ergibt sich der erforderliche Öldurchsatz Q_{erf} (mit den Temperaturen am Öleintritt ϑ_E und Ölaustritt ϑ_A) wie folgt:

$$W_{\dot{O}l} = Q_{ges} \rho c (\vartheta_A - \vartheta_E) \quad (13)$$

$$Q_{erf} = \frac{P_{Rgesamt}}{\rho c (\vartheta_A - \vartheta_E)} \quad \text{mit} \quad \vartheta_{zul} = \vartheta_A \quad (14)$$

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten Erweiterung des Berechnungsprogrammes SIRIUS, wurde die Berücksichtigung auftretender Mischreibungsgebiete bei der Simulation in hydrodynamischen Radialgleitlagern ermöglicht. Die Ermittlung der zusätzlichen Festkörperreibleistung, durch die in Kontakt tretenden Mikrostrukturen ermöglicht die Bestimmung der veränderten Erwärmung des Gleitlagers und somit das Ergreifen geeigneter Maßnahmen für einen ausreichenden Wärmeabtransport.

Das Modell beruht auf dem verbreiteten Ansatz der Lastaufteilung zwischen Festkörperkontakt- und Flüssigkeitstragdruck. Die Ermittlung der realen Kontaktfläche erfolgt

durch die statistische Auswertung gemessener Oberflächeneigenschaften. Durch die Hinterlegung der Materialanteilskurven ist dieses Modell nicht auf gaußverteilte Rauheitsprofile beschränkt. Die Ermittlung des Festkörpertragdruckes erfolgte im ersten Schritt mit einem sehr einfachen Kontaktmodell für den eindimensionalen, elastischen Fall. Eine Umsetzung anderer Kontaktmodelle ist für die Zukunft geplant, ebenso ein Modell für die Berücksichtigung der mikrohydrodynamischen Effekte auf den hydrodynamischen Druckaufbau.

Aufgrund der fehlenden lokalen Höheninformationen bei der Charakterisierung der Oberfläche, ist keine Aussage zu der kontaktbedingten Deformation benachbarter Mikrostrukturen möglich. Es kann keine Aussage zum Verschleiß getroffen werden.

Der hohe Grad der Idealisierung ermöglicht es auch weiterhin, instationäre Variationsrechnungen in kurzer Zeit durchzuführen. Durch Vergleichsrechnungen mit anderen Gleitlagerberechnungsprogrammen oder anderer kommerzieller Software bleibt zu testen, ob eine ausreichende Genauigkeit der Simulationsergebnisse mit dem Mischreibungsmodule gewährleistet werden kann.

Literatur

- [1] K. L. Johnson, J. a. Greenwood, and S. Y. Poon, "A simple theory of asperity contact in elastohydrodynamic lubrication," *Wear*, vol. 19, no. 1, pp. 91–108, 1972.
- [2] R. Wegmann, "Erweiterung der hydrodynamischen Schmiertheorie durch Einbeziehung des Unterdruckgebietes in die Berechnung instationär belasteter Gleitlager," Universität Rostock, 1978.
- [3] O. Reynolds, "On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 177, no. January, pp. 157–234, 1886.
- [4] D. Bartel, *Simulation von Tribosystemen*. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag, 2010.
- [5] A. Sommerfeld, "Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung," *Zeitschrift für Math. und Phys.*, vol. 50, pp. 97–155, 1904.
- [6] H. Hofmann, "Über einige Einflußfaktoren auf die 'Festigkeit dünner Ölfilme,'" *Freib. Forschungshefte*, vol. 251, p. 99, 1962.
- [7] M. Kornfeld, *Elastizität und Festigkeit der Flüssigkeiten*. Berlin: Verlag Technik, 1952.
- [8] R. Wegmann, "Dokumentation SIRIUS- Teil 2: physikalische Grundlagen, dimensionsbehaftete Daten," 2016. [Online]. Available: www.rolandwegmann.de/downloads. [Accessed: 23-Jun-2016].
- [9] C. Titscher, "Analyse des aktuellen Standes der Forschung zur Modellierung hydrodynamisch geschmierter Gleitlager unter Berücksichtigung von Verformungen , Einsatz niedrig viskoser Schmiermittel und Mischreibung," University Rostock, 2013.

- [10] C. Titscher, "Erweiterung der Berechnung von Verformungen auf Lager unter Ausnutzung verschiedener Symmetriebedingungen," Universität Rostock, 2012.
- [11] S. Zorn and K. Brökel, "Hydrodynamisch und hydrostatisch wirkende Radialgleitlager in Schiffsantrieben - Erweiterte Simulationsansätze im System SIRIUS," in Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, 2013.
- [12] R. Wegmann and K. Brökel, "Aktuelle Probleme der numerischen Simulation des hydrodynamischen und hydrostatischen Verhaltens von Spaltströmungen," in 6. Gemeinsames Kolloquium Aachen, 2008.
- [13] H. Czichos and K. Habig, Tribologie-Handbuch, Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 4. Auflage. Wiesbaden: SpringerVieweg, 2015.
- [14] Norm "DIN EN ISO 25178 - 2 - Geometrische Produktspezifikationen (GPS)- Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen," no. September. 2012.
- [15] Norm "DIN EN ISO 4287 Geometrische Produktspezifikation - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennung, Definition und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit." 2010.
- [16] C. Wiehr and J. Seewig, "3D-Kenngrößen nach ISO 25178," in 45. Materialographie-/Metallographie-Tagung DGM, 2011.

Effizientere Validierung und Funktionsabsicherung von Fahrerassistenzsystemen auf dem Rollenprüfstand

Sebastian Lutz, Albert Albers, Rolf Hettel*, Matthias Behrendt

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

Kaiserstr. 10, D-76131 Karlsruhe

*AVL Deutschland GmbH, Karlsruhe Greschbachstraße 3, 76229 Karlsruhe

E-Mail: Sebastian.lutz@kit.edu, Albert.Albers@kit.edu, Rolf.Hettel@avl.com, Matthias.Behrendt@kit.edu;

Internet: <http://www.ipek.kit.edu>

Inhalt: Vor dem Hintergrund der modernen Fahrzeugentwicklung zeigt dieser Beitrag Ansätze, wie Fahrerassistenzsysteme (FAS) mithilfe einer flexiblen und universellen Validierungsumgebung abseits der Prüfstrecke untersucht werden können. Die hierbei durchgeführten Untersuchungen widmen sich Prüfaufbauten mit möglichst geringem Eingriff in den Versuchsträger auf einem Rollenprüfstand, wobei die Stimulation der im Fahrzeug verbauten Sensoren, durch geeignete Aktoren und Stimulatoren erfolgt.

Die dabei gewonnen Erkenntnisse werden im Anschluss beispielhaft anhand zweier Fahrerassistenzsysteme demonstriert, wobei die Vorteile des IPEK X-in-the-Loop Ansatzes gezeigt werden. Auf diesem universellen Weg ist kein direkter Zugriff auf die Fahrzeugelektronik notwendig, sodass flexibel auf unterschiedliche verbaute Lösungen reagiert werden kann. Die so aufgebaute Validierungsumgebung ermöglicht es Assistenzsysteme schnell auf ihre gewünschte Funktion hin zu untersuchen. Der Rollenprüfstand bietet dabei kontrollierte und reproduzierbare Bedingungen für Tests und Studien am Gesamtfahrzeug.

Abstract: On the background of the modern vehicle development process, this paper demonstrates how ADAS can be tested off the test track using a flexible and universal validation environment. The investigations are aimed to get along with as far as possible interference into the vehicles electric, whereby the sensors installed in the vehicle are stimulated by suitable actuators and stimulators.

The results obtained are then demonstrated with two ADAS which show advantages of the IPEK X-in-the-Loop environment. In this way, no direct access to the vehicle electronics is necessary, so that it is possible to react flexibly to different installed solutions. An environment like this provides a new tool which enables the developer to quickly test assistance systems for their desired function. For these purposes the roller test bed provides controlled and reproducible conditions with testing on the entire vehicle.

Stichwörter: Fahrerassistenzsysteme, Rollenprüfstand, IPEK X-in-the-Loop Ansatz

Keywords: Advanced driver assistant systems (ADAS), roller test bed, IPEK X-in-the-Loop Approach

1 Einleitung

Der generelle Trend zu mehr Automatisierung in der Fahrzeugsteuerung wird durch immer leistungsfähigere und preiswertere Mikroprozessoren möglich gemacht. Diese neuen Chips können die weiter steigenden Datenmengen verarbeiten, welche zum Beispiel durch hochauflösende Kameras oder durch immer mehr Umgebungssensoren erzeugt werden. Gleichzeitig können durch den sinkenden Preis die entwickelten Lösungen einer breiten Kundschaft angeboten werden.

Neben dem Fortschritt in der Datenverarbeitung und Sensorik steigt die Komplexität solcher Systeme aufgrund eines immer größeren Funktionsumfangs und einer tieferen Integration zwischen einzelnen Assistenzsystemen. Selbstverständlich nehmen diese Systeme auch bei der zeitaufwändigen Phase der Funktionsentwicklung und Absicherung einen immer größeren Platz im Entwicklungsprozess ein.

In diesem Spannungsfeld hat die heutige Entwicklung fortschrittlicher Fahrerassistenzsysteme zwei grundsätzlich unterschiedliche Stufen der Validierung [1]. Zuerst die Komponentenprüfung, die dem Entwickler eine einfache Umgebung für das Entwerfen und Testen neuer Fahrzeugfunktionen gibt. Die zweite Stufe der Validierung stellt die Fahrt auf der Straße oder Teststrecke dar, die einen kompletten Pkw-Prototyp erfordert und begrenzte Möglichkeiten der Reproduktion auf der Straße hat.

Eine Lösung für die Kosten- und Komplexitätsprobleme dieses Vorgehens ist der Testaufbau auf dem Rollenprüfstand. Er verbindet die schnellen und reproduzierbaren Eigenschaften eines Komponenten-Tests mit der Aussagekraft, die der Test auf der Straße bieten kann.

2 Der Rollenprüfstand als effizientes Validierungswerkzeug für die Fahrzeugentwicklung



Bild 1: Fahrzeug mit Fahrerassistenzsystemen auf dem Rollenprüfstand

Bei der Entwicklung von Fahrzeugen werden die entwickelten Teile und Systeme wiederholt auf die Erfüllung der Funktionen auf verschiedenen Ebenen des Systemverbunds getestet. Als Testumgebung werden verschiedene Prüfstände eingesetzt, welche gezielt, gut reproduzierbare Umgebungszustände einzelner Komponenten ermöglichen. [2] Aus diesem Grund erweitert das Institut für Produktentwicklung (IPEK) kontinuierlich sein IPEK X-in-the-Loop-Framework und damit begründeten Entwicklungs- und Validierungsumgebungen an die sich verändernden Bedürfnisse. [3] Es spielt dabei keine Rolle, ob ein einzelnes Subsystem wie der Motor oder ein komplexes Gesamtsystem, beispielsweise das ganze Fahrzeug, in einer virtuellen oder realen Umgebung getestet werden soll. Das „X“ in diesem Ansatz steht dabei immer für das System, welches sich in der Entwicklung befindet. Auf dieser Basis wird eine permanente Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung über verschiedene Manöver und mehrere Testfälle hinweg ermöglicht. Dabei können Teile der Validierungsumgebung sowohl virtuell, als auch real ausgeführt sein. Die so geschaffene Umgebung wie bspw. der IPEK-Allrad-Akustik-Rollenprüfstand bietet dabei neben der guten Reproduzierbarkeit auch einen sicheren Betrieb - auch von Prototypenfahrzeugen - hinsichtlich der Auswirkungen von Systemfehlern- und ausfällen. Außerdem lässt sich über die weitestgehend kontrollierbaren Randbedingungen der Rollenprüfstand auch für Untersuchungen der Kundenakzeptanz gut nutzen.

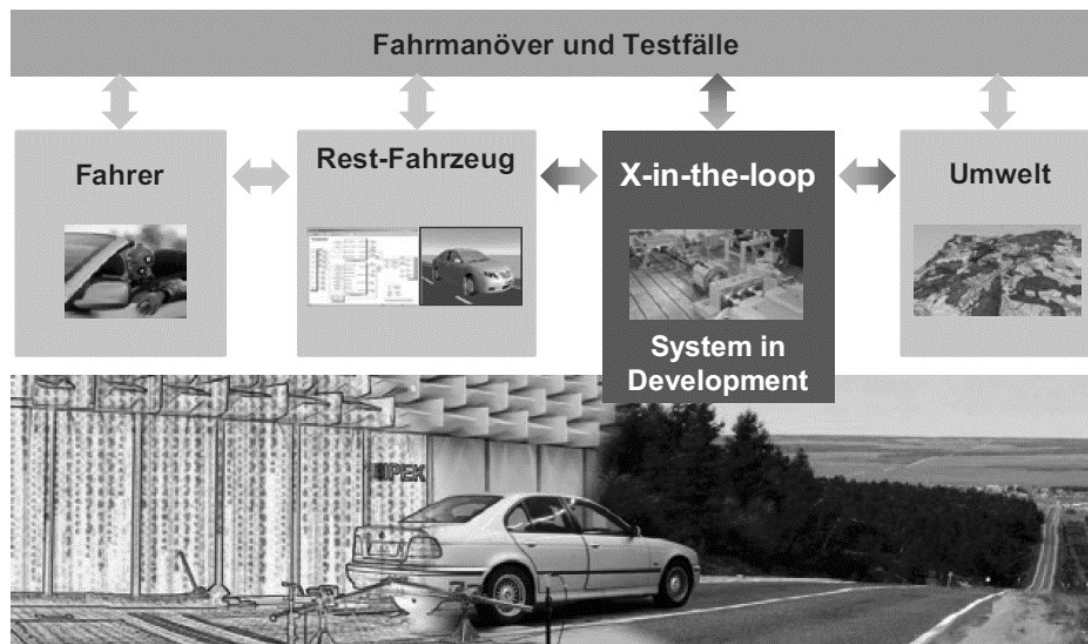


Bild 2: IPEK X-in-the-Loop-(XiL)-Ansatz [3]

Um das Gesamtfahrzeug zu testen und komplexe Zusammenhänge zwischen einzelnen Komponenten beobachten zu können, kommen bereits häufig Rollenprüfstände zum Einsatz. [1] Dabei können Manöver wie Stau-Situationen leicht ermöglicht werden, wodurch beispielsweise die Haltbarkeit von Antriebsstrangkomponenten untersucht werden kann. Die hohe Flexibilität des Rollenprüfstandes wird dabei durch die Integration von virtuellen Umgebungssimulationen erweitert. Eine mögliche Software-Lösung zum Entwickeln von Fahrerassistenzsystemen mit Hilfe einer virtuellen Umgebung stellt dabei die Software AVL InMotion powered by IPG CarMaker dar.

3 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen auf dem Rollenprüfstand

Zentrale Bedeutung für die Steuerung eines Fahrzeugs stellt die Entfernung zu den umliegenden Objekten dar. Die relevanten Entfernungen können in den Nahbereich und Fernbereich unterteilt werden. Ersterer deckt den Bereich bis zu 5 m ab und sollte immer in alle Richtungen überwacht werden, so dass sichergestellt werden kann, dass die Zone an der Rückseite oder der tote Winkel bei Bedarf frei ist. Um die Position von Objekten im weiter entfernten Bereich um das Fahrzeug (bis zu 200 m) besonders bei höheren Geschwindigkeiten zu kennen, müssen auch größere Abstände erfassbar sein. Mit den zuvor erwähnten Informationen kann allerdings nur ein bedingt sicherer Fahrbetrieb realisiert werden, so dass es notwendig ist, das Fahrzeug mit Kameras auszustatten, die eine detailliertere Sicht auf

umgebende Objekte ermöglichen und zusätzlich die Daten von anderen Sensoren überprüfen. Hierdurch nimmt die Komplexität der Systeme jedoch weiter zu, was deren Validierung erschwert. [4] Die Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen führt dazu, dass nach Strategien gesucht werden muss, wie der Validierungsaufwand systematisch vermindert werden kann. Betrachtet man den Aufbau von Fahrerassistenzsystemen abstrakt, so gibt es drei Schichten mit unterschiedlicher Komplexität, was in Bild 3 zu sehen ist. Die oberste Schicht repräsentiert Fahrerassistenzsysteme. Diese basieren auf Sensoren und Aktoren, welche an verschiedenen Stellen im Fahrzeug verteilt liegen. Diese Sensoren und Aktoren verwenden wiederum physikalische Prinzipien, die als Schnittstelle zur Umwelt dienen. Wenn es das Ziel ist, die Funktion eines Sensors zu testen, ohne dabei in die Fahrzeugelektronik einzugreifen, ist ein umfassendes Verständnis der angewandten physikalischen Prinzipien des Sensors erforderlich.

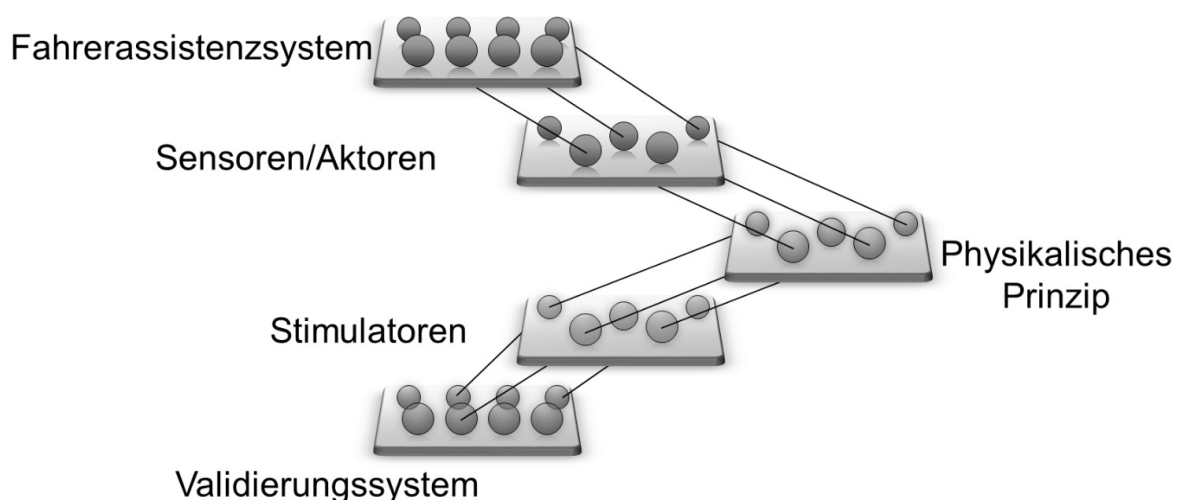


Bild 3: Schichten Modell zur Validierung von Fahrerassistenzsystemen

Um den Sensoren des Fahrzeugs die notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen, sind Sensor-Stimulatoren erforderlich. Diese Geräte für die Schnittstelle zwischen virtueller und realer Welt erweitern das zuvor vorgestellte Modell um eine zusätzliche Schicht. Der komplette Informationsfluss wird durch die Verschaltung der verschiedenen Stimulatoren zum Validierungssystem erreicht, wobei diese Systeme das Gegenstück zum Fahrerassistenzsystem auf der Validierungsseite darstellen, womit beispielsweise das Validierungssystem „Einpark-Tester“ das Gegenstück zur Einparkhilfe ist.

Das Modell hilft dabei wie ein Validierungssystem mit seinen unterschiedlichen Schnittstellen entworfen werden muss. Somit lässt sich eine Entwicklungsstrategie für Stimulatoren ableiten. Die im Fahrzeug installierten Sensoren ermöglichen die Erfassung von relevanten

Informationen der Umwelt. Wenn das Fahrzeug in einer Validierungsumgebung wie dem Rollenprüfstand betrieben wird, ist es nicht immer möglich, alle Umgebungseinflüsse nach zu stellen, welche die Sensoren im regulären Betrieb aus dem Umfeld aufnehmen. Um jedoch die Systeme auf ihre Funktionalität hin untersuchen zu können, müssen die verschiedenen Sensoren mit den für sie relevanten Informationen versorgt werden. Je nachdem, welche Informationen der Sensor erfasst, werden passende Gegenstücke in Form von Stimulatoren verwendet. Beispielsweise kann ein Stimulator, der das Fahrzeugsensorsignal empfängt und anschließend eine Antwort in der gewünschten Weise abgibt, selbst aus einem Sender/Sensor-Einheit aufgebaut werden. Der so stimulierte Sensor sendet in aller Regel ein Signal aus und erfasst daraufhin die Veränderungen des Signals durch die Umgebung. Beispiele hierfür sind der Regensensor, der Infrarotlicht in die Windschutzscheibe abgibt und beobachtet, wieviel Licht das Glas reflektiert, oder der Ultraschall-Abstandssensor, der Ultraschall-Impulse aussendet und die Reflexionen wieder detektiert. Ein, im Gegensatz dazu nur passiver Sensor-Typ, beschränkt sich darauf nur Informationen aus der Umgebung aufzuzeichnen und sie in elektrische Signale zu übersetzen, was beispielsweise bei einem Thermometer oder dem Helligkeitssensor der Fall ist. Um diese Sensoren zu stimulieren, muss die physikalische Größe, wie die Temperatur in der Umgebung des Sensors entsprechend dem Validierungsziel beeinflusst werden.

4 Validierungsbeispiele

4.1 Ultraschallbasierte Einparkhilfe

Heutzutage ist das Einparken mit einem „Abstandswarner“ beinahe alltäglich.

Als Bestandteil einer universellen Validierungsumgebung auf dem Rollenprüfstand leistet die Stimulation der Ultraschall-Parkhilfe einen Beitrag zur Entwicklung von Validierungssystemen. Dabei hilft sie auch neue Ansätze der Entwicklungsmethodik für Fahrerassistenzsysteme zu erarbeiten. Aus diesem Grund wird die Stimulierung der Ultraschall-Sensoren im Folgenden erläutert.

Dabei wird ersichtlich, welche Umgebungsbedingungen für das Assistenzsystem eingestellt, und welche Schnittstellen beim Testen stimuliert werden müssen. Um virtuelle Objekte aus der Simulation den Sensoren des Fahrzeugs vorzugeben nimmt der Stimulator zuerst den Messimpuls vom Fahrzeugsensor auf und erzeugt nach einer gewünschten Verzögerung ein Antwortsignal, welches die gleichen Charakteristiken haben muss, die der Ultraschall-Impuls des Autos besaß. Der Impuls erreicht dann nach der Laufzeit des ursprünglichen

Schallimpulses wieder den Fahrzeug-Sensor. Diese Umsetzung kommt ohne bewegliche Teile aus und lässt sich sehr einfach auf unterschiedliche Fahrzeuge anpassen.

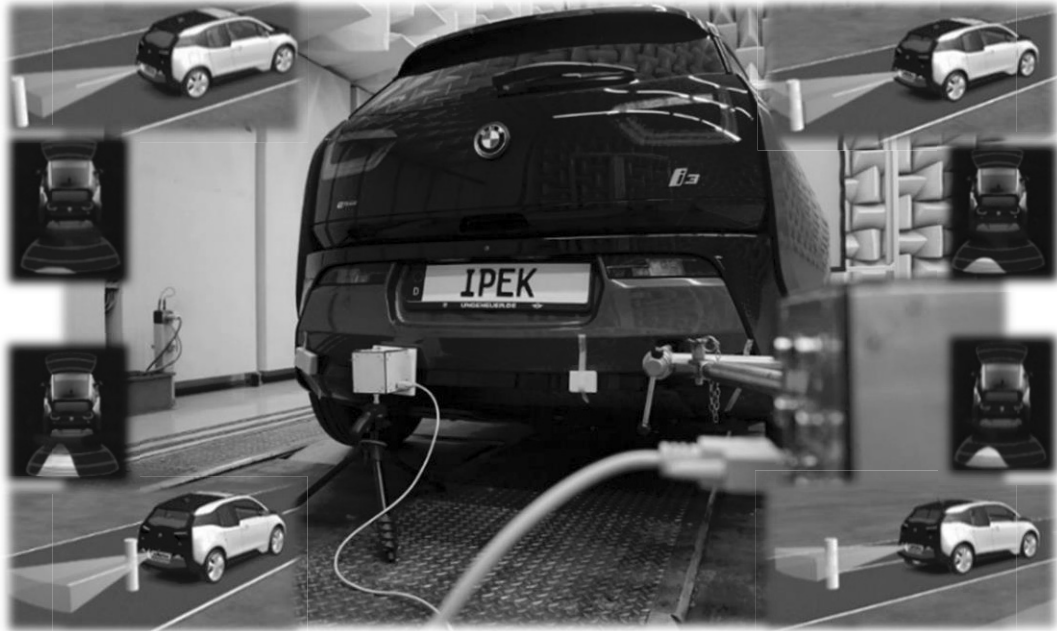


Bild 4: Ultraschallstimulation auf dem Rollenprüfstand

Durch die Verschaltung mehrerer Stimulatoren zu einem Netzwerk, ist es möglich, ein Auto mit Ultraschall-Parkhilfe auf einem Prüfstand zu betreiben, ohne durch Reflexionen der Prüfstandsumgebung ein Fehlverhalten des Assistenzsystems zu erzeugen. Daneben ist es auch denkbar, Parkassistenten mit automatisiertem Lenkeingriff auf dem Prüfstand zu validieren, ohne dass umfangreiche Aufbauten in einer realen Umwelt erforderlich sind oder teure Prototypen durch Funktionsfehlern gefährdet werden. Damit es für das Fahrzeug auf dem Prüfstand jedoch möglich wird zu lenken, ohne den Lenkwinkel am Rad zu verstellen, wäre eine Kombination aus Sensoren und Aktor an der Lenkung denkbar.

4.2 Monokamerabasierter Abstandsregeltempomat

Damit ein detaillierteres Bild von der Umgebung des Fahrzeugs erstellt werden kann, ist es notwendig Kameras als Sensoren einzusetzen. Heute werden deshalb bereits Monokameras zur Realisierung von adaptiven Geschwindigkeitsreglern eingesetzt. Das Kamerasystem beobachtet den Verkehr vor dem Fahrzeug und regelt mit Hilfe von Bilderkennungsalgorithmen den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ein.



Bild 5: Kamerastimulation auf dem Rollenprüfstand

Soll nun diese Funktion auf dem Rollenprüfstand validiert werden, muss der Rollenprüfstand um zwei Bestandteile erweitert werden. Einmal bringt eine Bildquelle vor der Kamera die Eindrücke der virtuellen Umwelt auf dem Prüfstand. Dies kann entweder als kleines Display direkt vor der Kamera, oder als Leinwand vor dem Fahrzeug realisiert werden, wobei letzteres die Ausrichtung auf die Kamera deutlich vereinfacht, da ergänzend ein Mensch auf dem Fahrersitz überprüfen kann, ob der Eindruck straßenähnlich ist. Neben dem physischen Aufbau bedarf es, wie auch bei der Ultraschallstimulation, noch der virtuellen Umweltsimulation, welche die Szenarien und Manöver bereithält, die vom Fahrzeug abgefahren werden sollen.

Durch das so aufgebaute Validierungssystem können deutlich einfacher komplexe Manöver überprüft werden. Beispielsweise das Auffahren auf ein Fahrzeug, welches langsamer als das eigene Fahrzeug fährt. In diesem Zusammenhang stellt ein komplexes Geschwindigkeitsprofil des vorausfahrenden Fahrzeugs auch kein Problem dar und lässt sich dank der Prüfstandsumgebung beliebig oft, reproduzierbar durchlaufen. Auf diesem Weg können somit spezielle Charakteristika des Fahrzeugs, etwa die Reaktionszeit des Gesamtsystems, oder eingeregelte Sicherheitsabstände, schnell und einfach bestimmt werden. Außerdem kann durch eine Variation einzelner Parameter eine gewünschte Funktion gezielt angesprochen und auf ein gewünschtes Verhalten hin optimiert werden.



Bild 6: Aktivierte Abstandsregelung auf dem Rollenprüfstand aus Sicht des Fahrers (1: Vorausfahrendes Fahrzeug wurde erkannt, 2: Eigengeschwindigkeit soll bei freier Fahrt auf maximal 32 mph erhöht werden)

Bild 5 zeigt in diesem Zusammenhang den Prüfstands Aufbau mit Leinwand, während in Bild 6 die Instrumententafel im Fahrzeug zu sehen ist. Diese zeigt dem Fahrer an, dass ein vorausfahrendes Fahrzeug auf der Straße erkannt wurde (kleines Auto-Symbol über der Eigengeschwindigkeit, Bild 6 Kreis 1) und außerdem auf dessen Geschwindigkeit eingeregelt wird (Bild 6 Kreis 2).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt eine Methode zur Umsetzung einer flexiblen Validierungsumgebung für Fahrerassistenzsysteme. Mit Hilfe einer so aufgebauten Umgebung können neue Funktionen validiert und Studien unter kontrollierten sowie reproduzierbaren Bedingungen ermöglicht werden. Die Methode kann auf aktuelle Fahrerassistenzsysteme angewendet werden, wobei immer ein Betrieb des Fahrzeugs ohne aktive Eingriffe in die Fahrzeugkommunikation angestrebt wird.

Als Werkzeug für die reproduzierbare Funktionsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen muss die Validierungsumgebung mit Rollenprüfstand durch spezielle Aufbauten erweitert werden, die die Umgebungssensoren des Fahrzeugs geeignet stimulieren. Aus diesem Grund zeigt die hier vorgestellte Methode, wie die entsprechenden Informationen aus einer virtuellen Umgebung extrahiert und dann durch ihr individuelles physikalisches Prinzip auf

unterschiedliche Autosensoren angewendet werden können. Als Beispiel bietet die Implementierung der Stimulation einer Ultraschall-Parkhilfe einen Einblick in die praktische Umsetzung, wohingegen der Aufbau zur Entwicklung von kamerabasierten ACC-Funktionen eine mögliche Umgebung für kamerabasierte Fahrerassistenzfunktionen aufzeigt. Der Fokus lag vor allem deshalb auf diesen Assistenzsystemen, da diese beiden Vertreter sowohl die Längsführung, als auch Querführung von Fahrzeugen übernehmen was beispielsweise bei automatisierten Parksituationen notwendig ist. Neben den Vorteilen, welche sich durch den Betrieb einer solchen Umgebung ergeben, werden auch die Herausforderungen bei Aufbau und der Verwendung diskutiert.

Schließlich zeigt dieser Beitrag die Anwendbarkeit des IPEK X-in-the-Loop-Ansatzes für Fahrerassistenzsysteme auf dem Rollenprüfstand und gibt einen Ausblick wie zukünftige Untersuchungen Stimulationslösungen für andere Sensoren hervorbringen können.

Literatur

- [1] Düser, Tobias: Forschungsbericht 47, X-in-the-Loop - ein durchgängiges Validierungs-framework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen; Institut für Produktentwicklung, 2010
- [2] Düser, Tobias; Olms, Hans; Haase, Anita; von Gavel, Roland; Schmidt, Christoph; Schmidt, Uwe: Fahrzeugrollenprüfstände, München: Süddeutscher Verlag onpact, 2011
- [3] Lindemann, Udo: Handbuch Produktentwicklung Kapitel 6: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess, München: Carl Hanser Verlag, 2016
- [4] Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3.Auflage, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015

Auswirkungen hochvernetzter Systeme auf die Modellarchitektur der virtuellen Inbetriebnahme

Benjamin Illmer^{a,b}; Michael Vielhaber^b

^a ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH
Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken
Email: b.illmer@zema.de; Internet: <http://www.zema.de>

^b Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität des Saarlandes
Campus, Gebäude E2 9, 1.OG, 66123 Saarbrücken
Email: vielhaber@lkt.uni-saarland.de; Internet: <http://www.lkt.uni-saarland.de>

Inhalt: Die Herausforderungen produzierender Unternehmen in Form von steigender Produktvarianz, kürzeren Produktlebenszyklen sowie die kontinuierliche Reduzierung der Anlagenentwicklungszeit beschreiben die Notwendigkeit der Intensivierung der produktionstechnischen Einführung von neuen Technologien, die zukünftig in der Lage sind diese teilweise gegensätzlichen Eigenschaften durch erhöhte Flexibilität, Skalierbarkeit und Selbstorganisation zu kompensieren. Aufgrund umfangreicher Umsetzungshemmnisse beim Anwender empfiehlt es sich neue Umsetzungsstrategien mit etablierten Methoden kombiniert anzuwenden, um hochkomplexe neue technische Strukturen sukzessive in das Unternehmen einführen zu können. Diese Veröffentlichung bietet daher einen ersten Ansatz, um technische und methodische Auswirkungen auf etablierte Prozesse zur produktionstechnischen Einführung von hochvernetzten Systemen darzustellen und einen Einblick zu geben wie neue Technologien in Zukunft unter Berücksichtigung der Benutzerakzeptanz effektiv ins Unternehmen eingebunden werden können.

Abstract: Increasing product variants, shorter product life cycles and the continuous time reduction of the production planning phase are major challenges of original equipment manufacturers (OEM) and their suppliers that force the implementation of new technologies to provide modern technical abilities, such as a higher flexibility, scalability and self-organization. Due to extensive realization obstacles on user's site, developers are held to design new implementation strategies that can be used along with conventional methods to implement highly complex and interconnected technical structures into the company's workspace, step-by-step. Therefore, this paper discuss the major challenges of the implementation of networked systems and their technological and methodological impacts on conventional processes, followed by an approach that describes an economic integration into the company's work area, such as manufacturing or assembly to ensure a higher level of user acceptance.

Stichwörter: Virtuelle Inbetriebnahme, Cyber-Physische Systeme, digitale Produktionsentwicklung

Keywords: Virtual Commissioning, Cyber-Physical Systems, digital production planning

1 Einleitung

Wie in der Vergangenheit wird auch in Zukunft das herzustellende Produkt die Anforderungen und Fähigkeiten der Produktionsanlagen bestimmen. Kürzere Produktlebenszyklen, steigende Produktvarianz bis Losgröße 1 [1,2] und die Reduzierung der Anlagenentwicklungszeit bei gleichzeitig höheren technologischen Entwicklungsaufwand beschreiben aktuelle Herausforderungen der Hersteller.

Um diese gegenläufigen Eigenschaften innerhalb einer umfassenden Produktionsplanung abbilden zu können, erzielen Ingenieure durch die Implementierung innovativer Technologien im Kontext der vierten industriellen Revolution, in der bisher hochautomatisierte Anlagen zu einer smarten digitalen Fabrik vernetzt [3] werden, entscheidende Entwicklungsschritte. Die produktionstechnische Einführung von Cyber-Physischen Systemen zur durchgängigen Vernetzung der Anlagen bietet neue Möglichkeiten in der Produktion der Zukunft sowie umfassende Auswirkungen auf die virtuelle Produktionsentwicklung [4]. Bereits etablierte Prozesse, wie die virtuelle Inbetriebnahme, die sich durch die Vorverlagerung von entscheidenden konstruktions- und funktionstechnischen Entwicklungsmerkmalen in den Bereich der Anlagenplanung auszeichnet, werden umfangreiche Veränderungen erfahren. Zur Darstellung der Auswirkungen wird die Gesamtmodellarchitektur des virtuellen Inbetriebnahme Prozesses zunächst in Teilmodelle separiert und nach modellweiser Betrachtung der Cyber-Physischen Einflüsse im späteren Prozess wieder zusammengeführt und als einheitlich durchgängiges Methodenkonzept vorgestellt.

Neben der Darstellung der Auswirkungen von Cyber-Physischen Systemen auf die Architektur der virtuellen Inbetriebnahme liegt der Fokus der Arbeit bei der Erarbeitung von Möglichkeiten zur frühzeitigen virtuellen Absicherung dezentral gesteuerter Prozesse und Betriebsmittel zur Steigerung der Benutzerakzeptanz durch digitale Visualisierungsvorgänge und bildet gleichermaßen eine Grundlage für die Einführung hochvernetzter Komponenten in die Fabrik der Zukunft.

2 Stand der Technik

Um die Vorgehensweise und Lösungsansätze dieser Veröffentlichung besser nachvollziehen zu können werden nachfolgend die Begrifflichkeiten „Cyber-Physische Systeme“ und „virtuelle Inbetriebnahme“ im Rahmen des Stands der Technik erläutert.

2.1 Cyber-Physische Systeme

Der Begriff „Cyber-Physisches System“ (CPS), geprägt von Hellen Gill, wurde von Edward A. Lee als technisches Bindeglied zwischen realen und virtuellen Objekten sowie zwischen realen und virtuellen Prozessen, die jeweils untereinander offen und global kommunizieren können, definiert [5]. Durch ihre umfangreiche Sensorik und Aktorik zur Erfassung und Beeinflussung ihrer physikalischen Umwelt sowie umfassenden lokalen und globalen Kommunikationstechnologie, durch Nutzung interdisziplinärer Übertragungsmethoden und Plattformen, beispielsweise dem Internet der Dinge, gelten CPS als eine der Schlüsseltechnologien [6] auf dem Weg zur vierten industriellen Revolution.

Die Integration von CPS in bestehende oder neue Arbeitsbereiche in der produzierenden Industrie führt dazu, dass sich bisherige Produktionsmaschinen zu Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) [7] mit hochvernetzter digitaler Einbindung in den Cyber Space entwickeln und neue Funktionalitäten in Form von standortübergreifenden selbstorganisierenden Prozessen ermöglichen.

2.2 Virtuelle Inbetriebnahme

Der Prozess der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) beschreibt die Vorverlagerung von entscheidenden konstruktions- und funktionstechnischen Entscheidungs- und Optimierungsmerkmalen in den Bereich der frühen Produktionsplanungsphase [8]. Dabei wird auf Basis eines dreidimensionalen Konstruktionsmodells eine durchgängige virtuelle funktionstechnische und geometrische Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel sichergestellt [9]. Der Prozess der virtuellen Inbetriebnahme ist bereits in vielen Unternehmen etabliert und bildet ein wichtiges Entscheidungskriterium für, in der Produktionsplanung nachgelagerte, Projektierungen. Unternehmen wie die BMW AG und Daimler AG verwenden die Vorgehensweise bei der virtuellen Anlagenplanung seit 2006 beispielweise im Rohbau [10] oder zur geometrischen und funktionstechnischen Absicherung der sehr komplexen Automobilhochzeit [11]. Die virtuelle Inbetriebnahme technologischer Einrichtungen hat sich innerhalb des letzten Jahrzehnts von der Erstellung fortgeschrittener Simulationsumgebungen speziell für Roboterzellen [12] zur vollständig integrierten digitalen Simulationsumgebung [13] für Produkt, Prozess und Betriebsmittel entwickelt. Die Architektur der virtuellen Inbetriebnahme besteht aus verschiedenen aufeinander aufbauenden Teilmodellen, wobei je nach

Ausrichtung und Komplexität entschieden werden muss, welcher Detaillierungsgrad der Teilmodelle erzielt werden soll. Die einzelnen Teilmodelle werden im Folgenden separiert vorgestellt.

Das mechatronische Geometriemodell bestehend aus mechanischer, elektrischer und fluidischer Konstruktion [14] dient der Absicherung der virtuellen geometrischen Verbaubarkeit und verfolgt das Ziel eine durchgängige interdisziplinäre digitale Visualisierung der zukünftigen technischen Einrichtung zu erhalten. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die geometrische Materialzuführung zu bestimmen, den zelleninternen Material- und Produktverlauf zu definieren und die (ideale) Positionierung von Sensoren und Aktoren festzulegen, wodurch die Basis für die anschließende Kinematisierung geschaffen wird.

Die Kinematisierung erfolgt durch die Erstellung und Integration von Bewegungsreferenzen in das mechatronische Geometriemodell, wobei rotatorische oder translatorische Bewegungen [15] durch numerische Grenzwerte angegeben werden. Ziel des Kinematikmodells ist es neben der Absicherung der geometrischen Erreichbarkeit der Produkte durch die Betriebsmittel [16] technologische und geometrische Konstruktionsfehler frühzeitig zu erkennen, um mechanische Kollisionen zu vermeiden oder bei der realen Inbetriebnahme zeitaufwändige Prozesse in Form von Nacharbeitungen zu entgehen.

Das anschließende Verhaltensmodell beschreibt das logische und zeitliche Verhalten eines realen Betriebsmittels gegenüber einer emulierten oder physikalischen Steuerung und bildet gleichzeitig eine erste simulationsgestützte Visualisierung von Prozessen zwischen Produkt und Betriebsmittel sowie der Materialzuführung und dem stationsinternen Materialfluss. Im Verhaltensmodell werden die im Kinematikmodell erstellten Grenzwerte der Bewegungsreferenzen in Bewegungsgleichungen eingefügt, um zeitliche Gelenkparameterveränderungen mathematisch beschreiben und anschließend visuell darstellen zu können [17]. Die Fertigstellung und anschließende Vernetzung des Verhaltensmodells mit dem Geometriemodell ermöglicht dem Anwender die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme im Rahmen einer Modell-in-the-Loop-Simulation.

Das Softwaremodell umfasst alle programmtechnischen Steuerungsfunktionen einer in Betrieb zu nehmenden technischen Einrichtung zur physikalischen Beeinflussungen von Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Die Prozesse der technischen Einrichtung virtuell simulieren zu können ermöglicht Programmierern Zugang zu umfassenden Kenntnissen der Systeme und Komponenten sowie deren Beziehung zueinander [11]. Die erstellte Steuerungssoftware kann nach Abschluss virtuell validiert werden, indem sie innerhalb einer Software-

in-the-Loop-Simulation oder bei Verwendung von physikalischen Komponenten innerhalb einer Hardware-in-the-Loop-Simulation funktional abgesichert wird.



Bild 1: Modellarchitektur der Virtuellen Inbetriebnahme

3 Auswirkungen von CPS auf VIBN

Während sich Cyber-Physische Systeme noch im Forschungsstadium befinden, hat sich die Methode der virtuellen Inbetriebnahme bereits als geeignetes Mittel zur produktionstechnischen Einführung komplexer Systeme in den Unternehmen etabliert. Aufgrund der aufeinander aufbauenden detaillierten Teilmodelle der virtuellen Inbetriebnahme steigt deren Eignung mit zunehmender Anlagen- und Systemkomplexität. Deshalb ist es notwendig die Möglichkeiten der Nutzung des Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme zur Integration Cyber-physischer Systeme in Unternehmen zu prüfen und deren Auswirkungen auf die virtuelle Inbetriebnahme zu diskutieren. Aus Gründen des Bearbeitungsumfangs wird sich auf das mechatronische Geometriemodell und das Kinematikmodell beschränkt. Um darstellen zu können welche Auswirkungen Cyber-Physische Systeme auf die kinematische Modellbildung der virtuellen Inbetriebnahme haben ist zunächst die Gestaltung des mechatronischen Geometriemodells zu betrachten, da dieses Modell die Grundlage der nachgelagerten Kinematisierung bildet. Zu Beginn wird der Einfluss Cyber-Physischer Systeme auf die Abbildung der Datenerfassung im mechatronischen Geometrie- und Kinematikmodell betrachtet. Nachfolgend werden die Auswirkungen auf die Betriebsmittel und Aktorik sowie auf den Produkt- und Materialfluss diskutiert.

3.1 Datenerfassung

Im Bereich der Datenerfassung steigt die Anzahl verbauter Sensoren im Zuge der Technologie- und Anwendungsvielfalt. Innerhalb des mechatronischen Geometriemodells wird sich, neben der geometrisch optimalen Positionsbestimmung der Sensoren, der Aufwand darzu-

stellender elektrischer Vernetzungen erhöhen. Bisher eingesetzte zustandserfassende Sensoren werden durch die Verwendung von virtuellen Sensorsystemen ergänzt, die aus einem Zusammenschluss von mehreren Sensoren zur Erfassung unterschiedlicher physikalischer Größen bestehen. Durch die umfangreichere Sensorik steigt der Modellierungsaufwand im mechatronischen Geometriemodell durch die notwendige Visualisierung von Komponenten zur Vermeidung von Projektierungsfehlern in komplexen Datenerfassungs- und Kommunikationsstrukturen.

3.2 Betriebsmittel und Aktoren

Betriebsmittel und Aktoren mit Cyber-Physischen Eigenschaften bedürfen neben der geometrischen Verbaubarkeitsprüfung zusätzlich der Darstellung von elektrischen und fluidischen Komponenten zur Absicherung des interdisziplinären Konstruktionsansatzes. Darüber hinaus werden die Grenzwerte in denen sich ein Betriebsmittel bewegen darf nicht mehr ausschließlich durch die Aktionspunkte am Produkt bestimmt. Durch den Einsatz Cyber-Physischer Systeme besteht die Möglichkeit über einen steuerungstechnischen Algorithmus die Grenzwerte eines Aktors auf die maximalen geometrischen Abmessungen der Bearbeitungszelle zu definieren. Die integrierte Funktion zur Kollisionsvermeidung zwischen Betriebsmittel und Produkt wird mit intelligenten Funktionen und Fähigkeiten erweitert, so dass zukünftig Mensch-Roboter-Kooperationen und -Kollaborationen prozesssicher in die (Fließ-) Produktion eingeführt werden können.

3.3 Produkt- und Materialfluss

In einigen Unternehmen ist die Produktförderung auf geometrisch unbestimmten Wegstrecken bereits etabliert. Dabei befindet sich das Produkt auf einem fahrerlosen Transportsystem, das über Induktionsschleifen im Fabrikboden oder umfangreicher Sensorik am System selbst ausgestattet und in der Lage ist, den Weg zur nächsten Bearbeitungsstation zu finden. Durch den Einsatz dieser mit der Umwelt interagierenden Technologie ist es notwendig umfangreiche Kenntnisse der Fabrikbeschaffenheit zu besitzen, um ein entsprechendes Layout bereits bei der Erstellung des mechatronischen Geometriemodells zu ermöglichen. Durch die Implementierung einer dezentralen Steuerung ist es notwendig die modelltechnische Variantenflexibilität vor der realen Inbetriebnahme umfassend abzusichern. Aufgrund der vielen Varianten ergibt sich ein aufwändigeres Simulationsmodell, da alle Varianten auf ihre Produzierbarkeit abgesichert werden müssen.

4 Anwendungsfall

Um die Auswirkungen von Cyber-Physischen Systemen auf die Architektur der virtuellen Inbetriebnahme darzustellen wird eine Arbeitsstation betrachtet, die aus einem dezentral gesteuerten Betriebsmittel in Form eines Roboters (UR10) mit variabler Werkzeug Nutzung besteht. Darüber hinaus besteht die Arbeitsstation aus modularen Gurtförderern für den Transport von drei Produktvarianten mit integriertem Produktgedächtnis zur Implementierung der produktspezifischen Bearbeitungsprozesse. In diesem Anwendungsbeispiel werden die drei Produktvarianten durch Elektronikkomponenten innerhalb eines zu verschraubenden Gehäuses realisiert. Die Gehäuse der drei Produktvarianten sind durch ihre geometrische Form und dem daraus resultierenden Schraubbild zu differenzieren. Die dezentrale Steuerung wird durch die Implementierung eines Produktgedächtnisses erreicht, welches über Radio-Frequency-Identificaion (RFID - Technologie) mit einer separaten, ebenfalls an der Arbeitsstation montierten, RFID-Komponente kommuniziert. Durch die Anbindung an eine Steuerung (SPS Controller) wird die Bearbeitungsinformation als ausführbarer Prozess mit Information des benötigten Bearbeitungswerkzeugs an den Roboter weiterleitet. Im ersten Prozess ist der Roboter nun in der Lage die entsprechende obere Gehäusehälfte, wie in Bild 2 zu erkennen, auszuwählen und auf die untere Gehäusehälfte der Elektronikbox zu setzen.

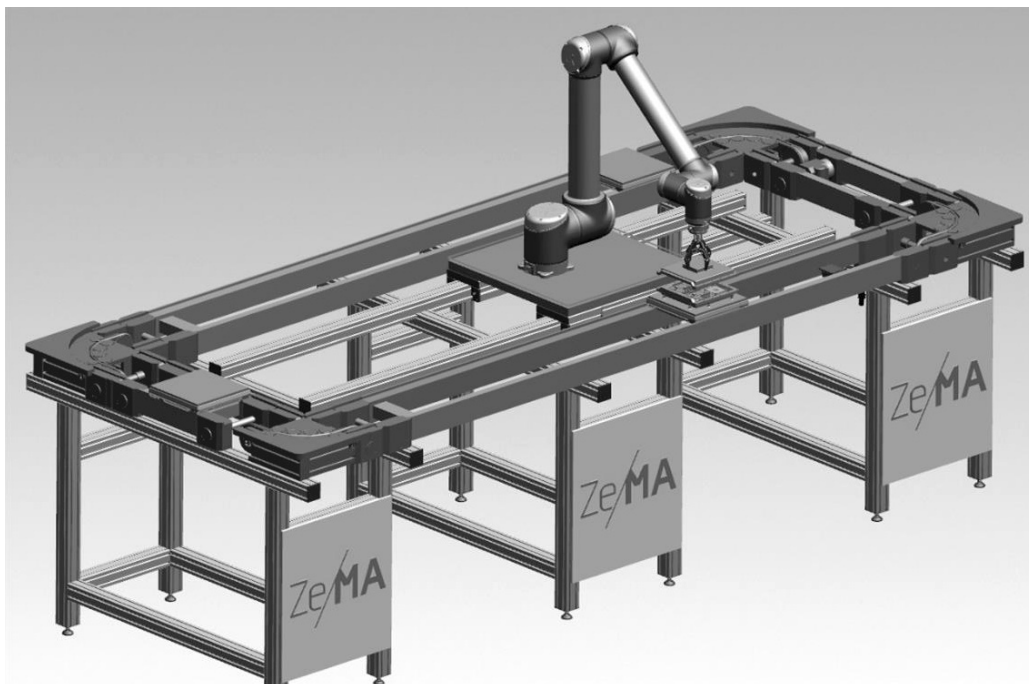


Bild 2: Ansicht Arbeitsstation mit vormontiertem Greiferwerkzeug

Anschließend wird die Verschraubung nach dem Werkzeugwechsel vom Greiferwerkzeug zu einem Schraubwerkzeug durchgeführt. Nachdem der Bearbeitungsprozess durchgeführt wurde ist ein im Prozess nachgelagertes RFID-Schreibelement dazu in der Lage eine aktualisierte Information auf das digitale Produktgedächtnis zu schreiben und bietet somit die Möglichkeit der durchgängigen Informationsaktualisierung hinsichtlich der Produktbearbeitung. Mit der Implementierung der dezentralen Betriebsmittelsteuerung und der variablen Werkzeugnutzung entstehen neue Möglichkeiten der variantenreichen Produkthandhabung sowie Optimierungspotenziale hinsichtlich der Energieeffizienz und des geometrischen Raumbedarfs. Zusätzlich besteht die Möglichkeit durch die Montage des Roboters auf einem Schlittensystem den Prozess in die Fließmontage der Produktion zu integrieren. Die Visualisierung mehrerer Varianten innerhalb einer Simulationsstudie wird durch die Kopplung zwischen der Steuerung und dem zeitlichen Verhaltensmodell erreicht, wobei während der Variantensimulation andere Produktvarianten sowie deren zugehörige Roboterprozesse durch zeitlich definierte Aktionspunkte ausgeblendet und deaktiviert werden, wodurch eine gegenseitige Sperrung der Varianten erreicht wird (Bild 3).

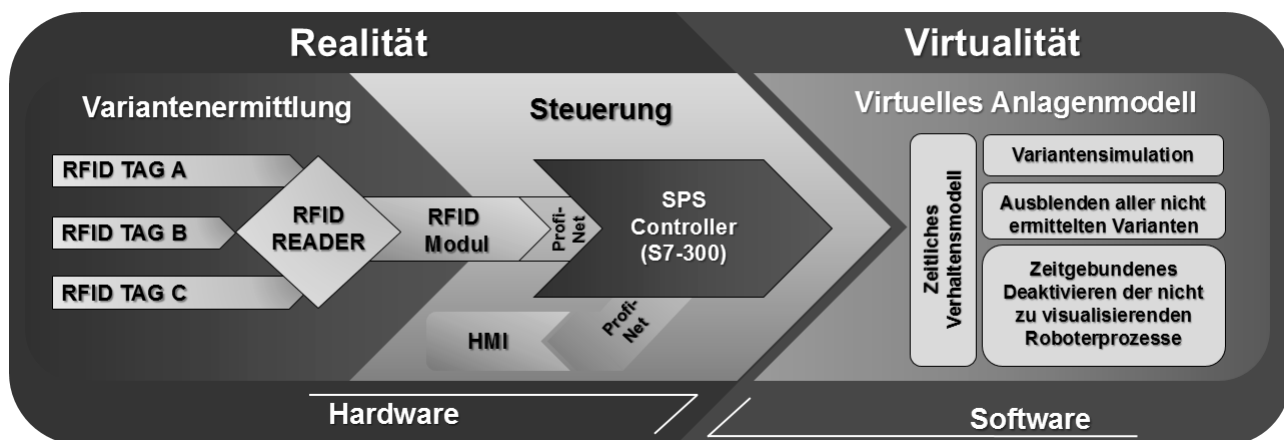


Bild 3: Schematischer Aufbau des Informationsflusses während der Variantensimulation

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen von Cyber-Physischen Systemen, mit Fokus auf eine dezentrale Betriebsmittelsteuerung und variable Werkzeugnutzung, auf die Modellarchitektur der virtuellen Inbetriebnahme dargestellt. Aufbauend auf der separaten Modellbetrachtung und deren teilweisen Anpassungen besonders im Hinblick auf das mechatronische Geometriemodell und das Kinematikmodell konnte ein System entwickelt werden das in der Lage ist sich selbst zu konfigurieren, um die Produzierbarkeit von Produkten mit hoher

Variantenvielfalt innerhalb einer Bearbeitungszelle zu realisieren. Grundsätzlich lässt sich durch die steigende Vernetzung von Produktionsanlagen erkennen, dass neue Möglichkeiten bei der Prozessgestaltung realisiert werden können und gleichermaßen Auswirkungen auf den Produktionsplanungsprozess im Allgemeinen und die Erstellung eines Simulationsmodells für die virtuelle Inbetriebnahme im Besonderen entstehen, die es zu berücksichtigen gilt.

Als nächstes wird der Aufbau einer Hardware-in-the-Loop-Simulation vorbereitet und die Übertragung der Erkenntnisse der hier angefertigten Arbeit auf weitere Anwendungsfälle geprüft. Im Bereich der automobilen Unterbodenmontage entstehen aufgrund der zunehmenden Modellvielfalt verschiedene Produktvarianten, die es durch geeignete Prozesse zu automatisieren gilt. Um diese komplexen Prozesse vor der produktionstechnischen Einführung umfassend virtuell abzusichern, wird eine dezentral gesteuerte automatisierte Bearbeitung angestrebt.

Literatur

- [1] Andelfinger, Volker P.; Hänisch, Till: Industrie 4.0 - Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2017, ISBN 978-3-658-15556-8, S. 16 und 26.
- [2] Sandler, Ulrich: Industrie 4.0 - Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM, 1. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2013, ISBN 978-3-642-36916-2, S.23.
- [3] Heuser, Birgit V.; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael: Handbuch Industrie 4.0 Bd.1 – Produktion, 2.Aufl. Deutschland: Springer Vieweg, 2017, ISBN 978-3-662-45278-3, S. 15.
- [4] Broy, Manfred: Cyber-Physical Systems - Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme, 1.Aufl. Berlin: Springer, 2010, ISBN 978-3-642-14901-6.
- [5] Lee, Edward A.; Seshia Sanjit A.: Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach- First Edition, Berkeley, Available at: <http://LeeSeshia.org>, 2016.
- [6] Wahlster, Wolfgang: Industrie 4.0: Das Internet der Dinge kommt in die Fabriken, Beitrag: Zukunft der Industrie, IHK Darmstadt, 2015, S. 3 und 8.
- [7] Huber, Walter: Industrie 4.0 in der Automobilproduktion - Ein Praxisbuch, 1.Auflg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, ISBN 978-3-658-12731-2, S. 43.
- [8] Hoffmann, Peter; Schumann, R.; Maksoud, T.M.A. und Premier, G.C.: Virtual Commissioning of Manufacturing Systems a review and new approaches for simplification, Available at: <http://his.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1033237&dswid=6298>, Kuala Lumpur, 2010, S. 1.
- [9] Binnberg, Dennis; Johansson, Viktor: Virtual Commissioning – Emulation of a production cell, Skövde, 2016, S. 21.
- [10] Kochan, A.: BMW innovates at new Leipzig assembly plant, Assembly Automation, Vol. 26, No. 2, 2006, DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/01445150610658086>.

- [11] Move-up 2/2006: Virtuell verheiratet – Virtuelle Inbetriebnahme komplexer Fertigungszellen, http://www.automation.siemens.com/wcmsnewscenter/details.aspx?xml=/content/10001666/de/sixcms/Pages/SIXCMS_Virtuellverheiratet.xml?NoRedirect=true&xsl=publication-en-www4.xsl, 2006.
- [12] Kiefer, Jens; Borutta, H.: Virtuelle Inbetriebnahme im Rohbau Werk Wörth, Beitrag: 6. Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, Fulda, 2010, S. 8.
- [13] Brinkmeier, Bernd: Closed-Loop Manufacturing auf Basis einer digitalen Enterprise Plattform, Beitrag: 9. Montage - Tagung, Saarbrücken, 2017, S. 10.
- [14] Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentjes, Joachim: Digitale Produktion, Berlin: Springer, 2013, ISBN 978-3-642-20259-9, S.178.
- [15] Eigner, Martin; Roubanov, Daniil; Zafirov, Radoslav: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Berlin: Springer, 2014, ISBN 978-3-662-43816-9, S. 110.
- [16] Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid: Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele, 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2011, ISBN 978-3-540-89038-6, S. 118.
- [17] Bergert, Martin; Höme, Stephan; Hundt, Lorenz: Verhaltensmodellierung für die virtuelle Inbetriebnahme, etz, Vol.9, http://www.etz.de/files/e00922zfe_uni_magdeburg.pdf, 2010, S. 6.

Zweischritt-Glättungsalgorithmus als Basis eines vollautomatisierten Produktentwicklungsprozesses

Kevin Deese, Max Geilen, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth

Email: kevin.deese@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de>

Inhalt: In diesem Beitrag wird ein Zweischritt-Glättungsalgorithmus entwickelt, der topologieoptimierte Strukturen unter Beibehaltung fertigungsrelevanter Features glättet und somit eine direkte Fertigung nach der Optimierung ermöglicht.

Der Algorithmus nutzt als ersten Schritt das Marching Cubes Algorithmus, um die Dichteverteilung des optimierten Ergebnisses auf die weitere Verarbeitung vorzubereiten. Der zweite Schritt besteht aus dem „implicit fairing“, einem impliziten Verfahren zur Glättung von Oberflächen.

Die resultierenden geglätteten Beispielm Modelle werden mit Glättungsergebnissen einer kommerziellen Lösung verglichen, um eine Aussage über die Güte treffen zu können. Hierbei wird gezeigt, dass der Algorithmus ähnlich gute Werte erreicht und eine direkte Fertigung nach der Optimierung ermöglicht.

Abstract: In this paper we develop a two-step smoothing algorithm, which smoothes topology optimization results while keeping features relevant for production. The algorithm thus allows a direct production after the optimization.

As first step, the marching cubes algorithm is used in order to prepare the density distribution resulting from the optimization for the further processing. The second step consists of the “implicit fairing”, an implicit method for smoothing surfaces.

We compare the resulting smoothed examples to results of a commercial solution to make a statement about the quality of the results of the algorithm. We show that the algorithm achieves similarly good results and allows a direct production after the optimization.

Stichwörter: Glättung, Strukturoptimierung, Automatisierte Produktentwicklung, Marching Cubes, Implicit Fairing

Keywords: Smoothing, Structural optimization, Automated product development, Marching cubes, Implicit fairing

1 Einleitung

In der modernen Entwicklung neuer Produkte nimmt Leichtbau eine immer größer werdende Rolle ein. Große Materialeinsparungen und eine damit verbundene Gewichtsreduktion bedeuten effizientere Nutzung von Ressourcen und somit eine bessere Umweltverträglichkeit

und geringere Betriebskosten. Die Topologieoptimierung ist ein ideales Werkzeug, um Leichtbaustrukturen für verschiedene Anwendungsfälle zu entwickeln. Problematisch dabei ist jedoch, dass die topologieoptimierten Strukturen aufgrund der Diskretisierung mit Finiten Elementen sehr zerklüftet sind, dadurch nicht fertigbar sind und deshalb manuelle Nacharbeit nötig ist.

Um diese Nacharbeit zu vermeiden und eine direkte Fertigung aus dem virtuellen Modell zu realisieren, ist eine Glättung der Optimierungsergebnisse nötig. Hierdurch wird eine hohe Automatisierung des Prozesses der Optimierung und anschließender Fertigung erreicht.

Aktuell verwendete Algorithmen zur Glättung sind beispielsweise die explizite Euler Methode [1, 2] oder das λ/μ -Verfahren [1, 2]. Problematisch an der expliziten Euler Methode ist, dass bei großen Strukturen sehr kleine Zeitschritte gewählt werden müssen, um ein akzeptables Ergebnis zu erhalten. Dadurch wird die Berechnungsdauer schnell sehr hoch [2, 3]. Das λ/μ -Verfahren verhindert zwar bei Glättungsalgorithmen häufig auftretende Schrumpferscheinungen, allerdings müssen hierfür die Parameter λ und μ aufwändig vom Benutzer bestimmt und festgelegt werden [2].

Darüber hinaus bleibt das Problem bestehen, dass die Geometrie durch die Glättung teilweise verfälscht wird und dadurch von der Optimierung vorgeschlagene Features (bspw. gerade Kanten) verloren gehen [4]. Hierdurch ist eine direkte Fertigung nach der Optimierung nicht möglich. Unter Umständen würden fertigungsrelevante Features durch die Glättung entfernt werden.

Der in diesem Beitrag vorgeschlagene Zweischnitt-Glättungsalgorithmus soll Schrumpferscheinungen vermeiden, leicht einzustellen sein, auch bei großen Strukturen immer noch in akzeptabler Zeit funktionieren und darüber hinaus von der Optimierung vorgegebene fertigungsrelevante Features bewahren.

2 Beschreibung des Algorithmus

Als Grundlage für die Glättung dient ein optimiertes Maschinenbauteil. Dieses Bauteil wird in der Regel aus der Topologieoptimierung gewonnen und liegt als Finite-Elemente-Netz mit einer Dichteverteilung vor. Das heißt zu jedem Element gibt es einen Wert zwischen 0 und 1 (relative Dichte), der angibt, ob das Element im optimierten Ergebnis enthalten ist oder nicht. Ein Element mit einer relativen Dichte von 1 wäre enthalten, ein Element mit einer relativen Dichte von 0 stellt ein Loch dar, wäre also nicht enthalten. Für Elemente mit einer relativen Dichte zwischen 0 und 1 muss entschieden werden, ob sie enthalten sind oder

nicht. In der vorliegenden Arbeit werden zunächst Hexaeder-Netze betrachtet (siehe Abbildung 1).

1	1	0,6
1	0,6	0

Abbildung 1: Dichteverteilung am Beispiel von Hexaederelementen

Für den ersten Schritt des Zweischritt-Glättungsalgorithmus werden die Dichtewerte aus der Optimierung an den einzelnen Knoten benötigt. Um diese zu erhalten, werden für jeden Knoten i die Dichtewerte der den Knoten enthaltenden Elemente $E(i)$ miteinander verrechnet. Hierfür werden für jedes relevante Element zunächst die Vektoren ausgehend vom betrachteten Knoten zu den direkt benachbarten Knoten gebildet (siehe Abbildung 2).

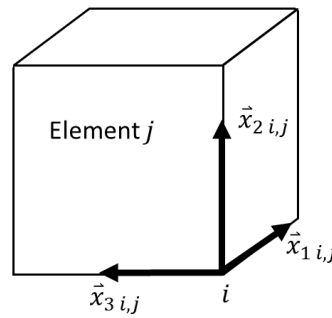


Abbildung 2: Vektoren vom betrachteten Knoten zu den Nachbarknoten

Anhand dieser Vektoren wird der Raumwinkel $\Omega_{i,j}$, den das Element j um den Knoten i einnimmt, nach Gleichung 1 berechnet [5]:

$$\tan\left(\frac{1}{2}\Omega_{i,j}\right) = \frac{\langle \vec{x}_{1\,i,j}, \vec{x}_{2\,i,j}, \vec{x}_{3\,i,j} \rangle}{x_1 x_2 x_3 + (\vec{x}_{1\,i,j} \cdot \vec{x}_{2\,i,j})x_3 + (\vec{x}_{1\,i,j} \cdot \vec{x}_{3\,i,j})x_2 + (\vec{x}_{2\,i,j} \cdot \vec{x}_{3\,i,j})x_1} \quad (1)$$

$$\text{mit } x_n = |\vec{x}_{n\,i,j}|$$

Der Raumwinkel wird mit der relativen Dichte d_j des betrachteten Elements multipliziert. Dieses Produkt wird mit der Summe aller auf die gleiche Weise gebildeten Raumwinkel der relevanten Elemente normiert. Um die relative Knotendichte zu erhalten, wird dieser Vorgang für jedes relevante Element wiederholt und summiert (siehe Formel 2).

$$\rho_i = \frac{1}{\sum_{k \in E(i)} \Omega_{i,k}} \sum_{j \in E(i)} d_j \Omega_{i,j} \quad (2)$$

Nach der Vorbereitung des Modells wird der eigentliche erste Schritt der Glättung durchgeführt. Dieser besteht aus einer leichten Abwandlung des sogenannten Marching Cubes Algorithmus [6]. Anhand der Knotendichten wird bestimmt, welcher Knoten Bestandteil der optimierten Struktur sein soll und welcher wegfallen soll. Hierfür wird eine vorher bestimmte Grenze verwendet. Alle Knoten mit einer Dichte unterhalb der Grenze werden durch den Marching Cubes Algorithmus entfernt, indem Dreiecke an entsprechender Stelle durch die Hexaeder gelegt werden (siehe Abbildung 3).

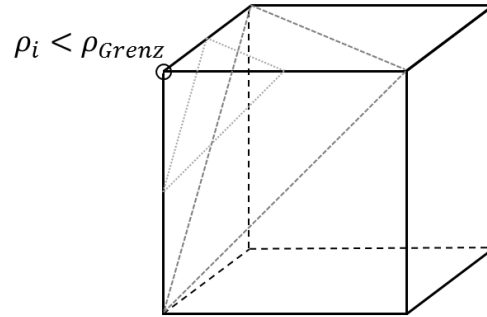


Abbildung 3: Klassischer Marching Cubes (grau gepunktet) und abgewandelter Marching Cubes (grau gestrichelt)

Der erste Schritt des Glättungsalgorithmus dient dazu, aus der Dichteverteilung innerhalb des Designvolumens ein Bauteil mit klar definierter Oberfläche zu erzeugen. Ausgabe des ersten Schritts ist nicht mehr ein FE-Netz aus Hexaedern, sondern die Oberfläche des Teils als STL.

Als zweiter Schritt wird das sogenannte „implicit fairing“ nach Desbrun [1] verwendet. Dieser Ansatz beruht auf der Laplace-Glättung und wird mit impliziter Integration gelöst, wodurch die Zeitschritte zur Lösung im Vergleich zur expliziten Euler Methode deutlich größer gewählt werden können. Die zugrunde liegende Gleichung sieht wie folgt aus:

$$(I - \lambda dt L) X^{n+1} = X^n \quad (3)$$

Hierbei ist X das Netz (Oberfläche), das die Knoten x_i enthält. λdt ist der Zeitschritt, der vom Benutzer vorgegeben wird, n ist die aktuelle Iteration und L der sogenannte „umbrella operator“, der wie folgt berechnet wird [3, 7]:

$$L(x_i) = \frac{1}{|N_1(i)|} \sum_{j \in N_1(i)} x_j - x_i \quad (4)$$

$N_1(i)$ ist die Menge der Nachbarn von Knoten x_i , also der im FE-Netz direkt mit x_i in Verbindung stehenden Knoten.

Bei einem zu groben Netz werden durch die Glättung eventuell relevante Features entfernt. Um dem entgegenzuwirken, wird die Oberfläche nach einer definierten Anzahl an Schritten verfeinert. Abbildung 4 zeigt das Vorgehen anschaulich im zweidimensionalen Fall.

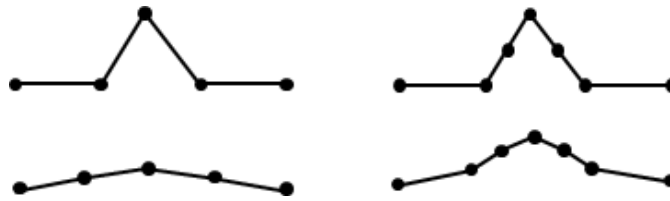


Abbildung 4: Verfeinerung zur Bewahrung geometrischer Features im 2D Fall

Nach erfolgreicher Glättung wird das Teil wieder als STL ausgegeben.

3 Modelle

Der Zweischnitt-Glättungsalgorithmus wird an zwei Modellen vorgeführt, um die Wirkungsweise beurteilen zu können. Das erste Modell ist in Abbildung 5 dargestellt.

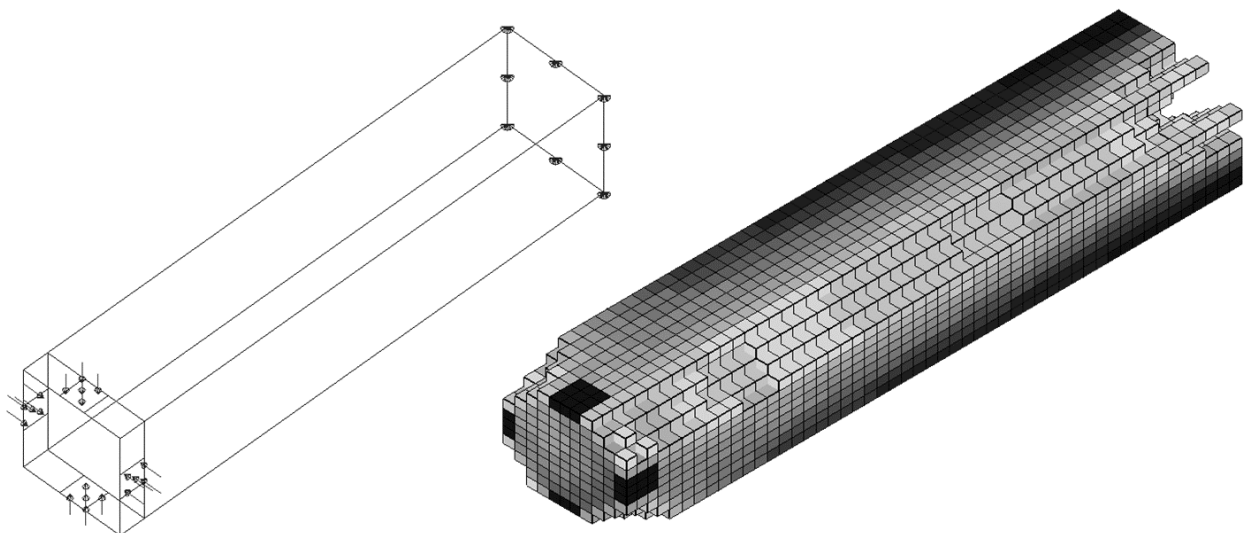


Abbildung 5: Modell 1: Balkenmodell mit Druckbelastung (links) und das resultierende Optimierungsergebnis (rechts)

Hierbei handelt es sich um einen Balken, der am einen Ende festgehalten wird und am anderen Ende mittig zu jeder Seitenfläche mit Druck belastet wird (Abbildung 5 links). Die Optimierung wurde mit Tosca [8] mit dem SIMP-Verfahren [9] durchgeführt. Das Ergebnis ist auf der rechten Seite dargestellt. Elemente mit einer relativen Dichte unter 0,25 werden nicht angezeigt.

Das zweite Modell (siehe Abbildung 6 links) ist ebenfalls ein Balken. Die Festhaltung wurde wie beim ersten Modell auf einer Stirnfläche aufgebracht, während auf die gegenüberliegende Oberkante eine Kraft aufgegeben wurde. Die Optimierung wurde mit Tosca mit dem SIMP-Verfahren durchgeführt (Abbildung 6 rechts). Dargestellt werden Elemente mit einer relativen Dichte über 0,15.

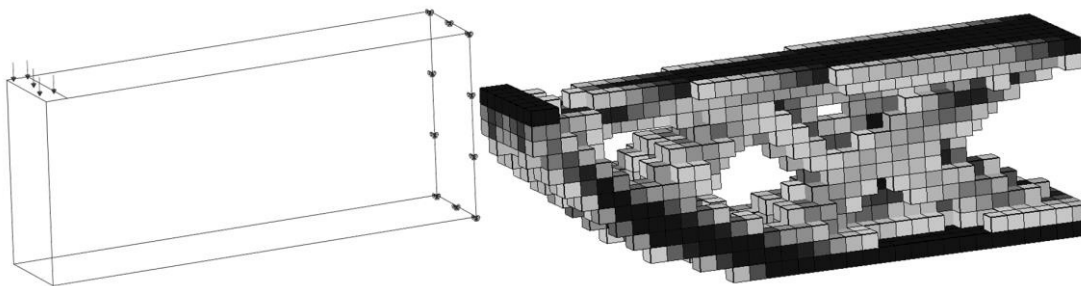


Abbildung 6: Modell 2: Balkenmodell mit Kraftbelastung (links) und das resultierende Optimierungsergebnis (rechts)

4 Ergebnisse

Die Resultate der Glättung des Modells 1 mit dem Zweischritt-Glättungsalgorithmus sind in Abbildung 7 dargestellt. Das Zwischenergebnis nach dem ersten Schritt ist auf der linken Seite zu sehen. In der Mitte ist das Endresultat abgebildet. Zum Vergleich ist das Glättungsergebnis aus Tosca in Abbildung 7 rechts dargestellt.

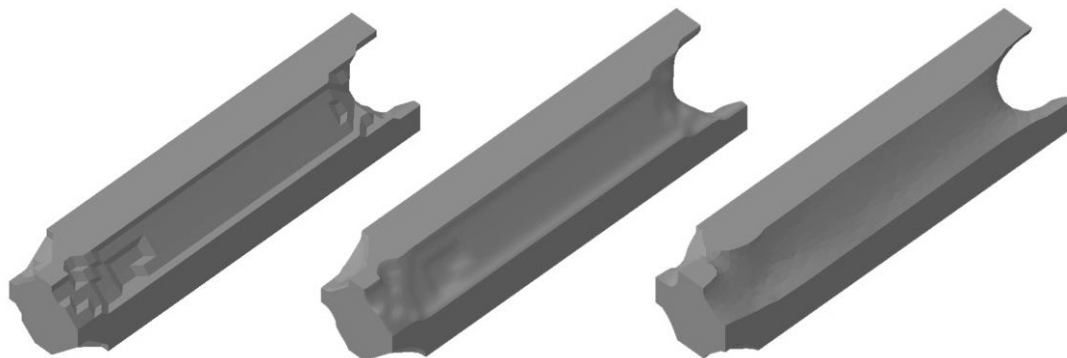


Abbildung 7: Modell 1 geglättet mit Zweischritt-Algorithmus, erster Schritt (links), zweiter Schritt (Mitte), geglättet mit Tosca (rechts)

Unter der Annahme, dass Elemente des optimierten Ergebnisses mit einer relativen Dichte ρ_{rel} auch zu diesem Anteil im geglätteten Ergebnis enthalten sein sollen, lässt sich eine Aussage darüber treffen, wie gut das geglättete Ergebnis das optimierte Bauteil abbildet. Hierfür wird das Glättungsergebnis mit dem optimierten Bauteil überlagert und in vier Bereiche eingeteilt:

- Volumen, das nach der Optimierung enthalten sein soll und nach der Glättung enthalten ist (Innen / Innen)
- Volumen, das enthalten sein soll, aber nicht enthalten ist (Innen / Außen)
- Volumen, das nicht enthalten sein soll und auch nicht enthalten ist (Außen / Außen)
- Volumen, das nicht enthalten sein soll, aber enthalten ist (Außen / Innen)

Idealerweise tendieren die Anteile „Innen / Außen“ und „Außen / Innen“ gegen 0. Die Glättung würde damit kein benötigtes Volumen entfernen und auch kein unnötiges Volumen hinzufügen. Abbildung 8 zeigt die jeweiligen Anteile sowohl nach der Glättung mit Tosca als auch mit dem Zweischritt-Glättungsalgorithmus.

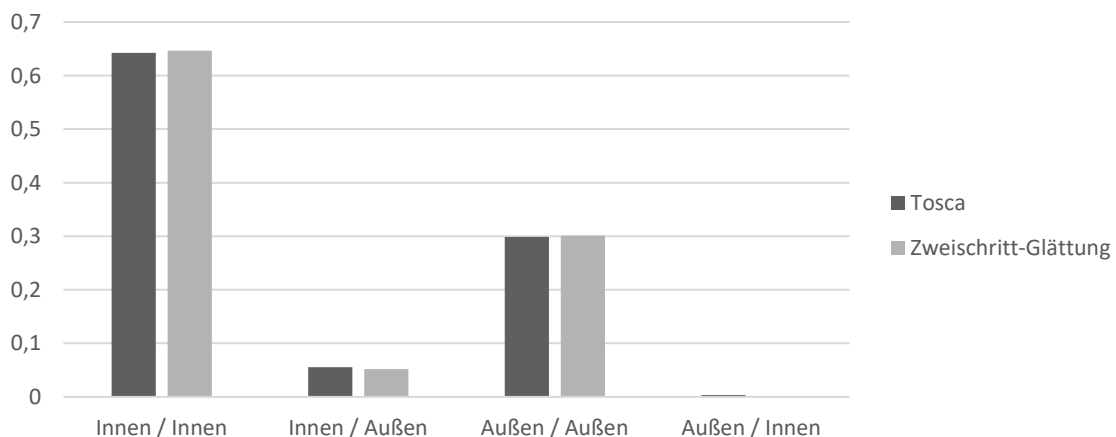


Abbildung 8: Volumenabbildung des optimierten Ergebnisses durch die Glättung am Modell 1

Der Grund für die Unterschiede der geglätteten Ergebnisse, obwohl die Volumenabbildung praktisch identisch ist, liegt darin, dass für den Vergleich der optimierten und der geglätteten Struktur ausschließlich die relative Dichte des Elements und das Volumen des geglätteten Bauteils im Bereich des Elements herangezogen wird. Wie das Volumen angeordnet ist, wird beim Vergleich nicht berücksichtigt. Abbildung 9 verdeutlicht diesen Sachverhalt.

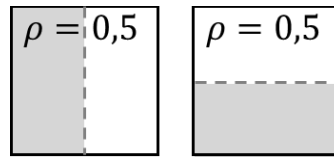


Abbildung 9: Zwei mögliche Volumendarstellungen eines Elements mit vorgegebener relativer Dichte

Im Folgenden sind die Ergebnisse des Modells 2 dargestellt.

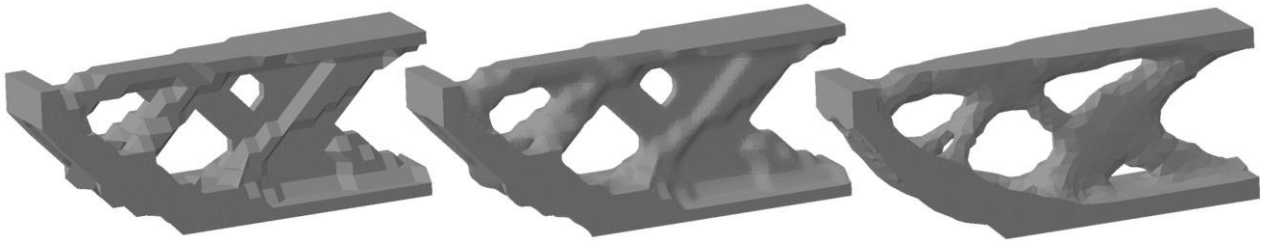


Abbildung 10: Modell 2 geglättet mit Zweischritt-Algorithmus, erster Schritt (links), zweiter Schritt (Mitte), geglättet mit Tosca (rechts)

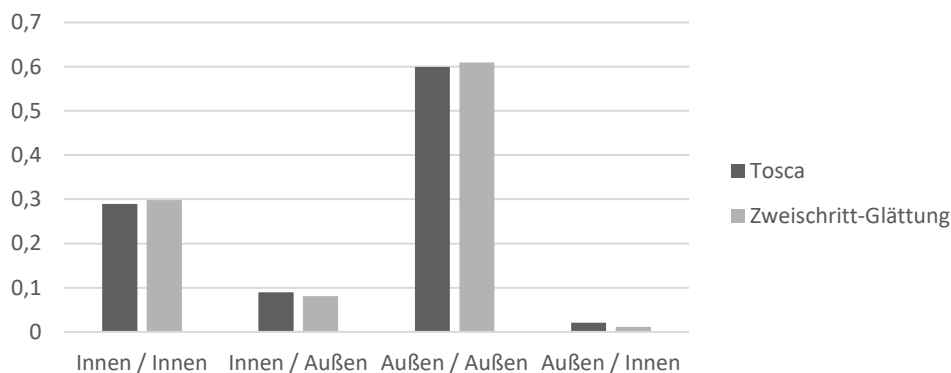


Abbildung 11: Volumenabbildung des optimierten Ergebnisses durch die Glättung am Modell 2

5 Diskussion

Bei dem dargestellten Zweischritt-Glättungsalgorithmus handelt es sich um ein implizites Verfahren. Das heißt, dass für jede Iteration ein lineares Gleichungssystem gelöst werden muss. Was zunächst als Nachteil erscheint, wirkt sich bei großen Systemen gegenüber einer expliziten Methode positiv aus, da der Zeitschritt groß gewählt werden kann. Dagegen muss bei einem expliziten Verfahren der Zeitschritt klein gewählt werden, wodurch die Berechnungsdauer steigt [1].

Der dargestellte Algorithmus ist leicht in der Handhabung, da nur zwei Parameter zur Konfiguration benötigt werden. Zum einen die Größe des Zeitschritts λdt (siehe Gleichung 3) und zum anderen die Anzahl der Iterationen, die durchgeführt werden sollen. Die Auswahl

der Parameter ist darüber hinaus nicht sehr kompliziert, da der Algorithmus gegenüber Änderungen der Parameter robust ist.

Wie in den Ergebnissen zu erkennen ist, werden Features des optimierten Bauteils gut erhalten. Insbesondere geradlinige Kanten werden gut dargestellt und erfordern somit kaum bzw. gar keine Nacharbeit. Dies ist besonders gut im Vergleich zu den Ergebnissen der Glättung mit Tosca zu erkennen. Wurde die Optimierung unter Beachtung von Fertigungsrestriktionen durchgeführt, werden die daraus resultierenden Features beibehalten, wodurch das geglättete Ergebnis ebenfalls fertigungsgerecht ist.

Der dargestellte Zweischritt-Glättungsalgorithmus stellt somit eine Möglichkeit dar, optimierte Ergebnisse für das menschliche Auge leichter interpretierbar zu machen und darüber hinaus direkt an die Fertigung zu übergeben. Dadurch wird die Lücke zwischen Optimierung und Fertigung geschlossen und ein vollautomatisierter Produktentwicklungsprozess ermöglicht.

Literatur

- [1] Desbrun, Mathieu; Meyer, Mark; Schröder, Peter; Barr, Alan H.: Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. In SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1999. S. 317-324
- [2] Taubin, Gabriel: A signal processing approach to fair surface design. In SIGGRAPH '95: Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1995. S. 351-358
- [3] Kobbelt, Leif; Campagna, Swen; Vorsatz, Jens; Seide, Hans-Peter: Interactive multi-resolution modeling on arbitrary meshes. In SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1998. S. 105-114
- [4] Fiebig, Sierk; Sellschopp, Jürgen; Manz, Holger; Vietor, Thomas; Axmann, Joachim K.; Schumacher, Axel: Future challenges for topology optimization for the usage in automotive lightweight design technologies. In Proc. of 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Sydney, 2015.
- [5] Van Oosterom, Adriaan; Strackee, Jan: The solid angle of a plane triangle. IEEE transactions on Bio-medical Engineering, Aufl. 2, 1983. S. 125-126
- [6] Lorensen, William E.; Cline, Harvey E.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. ACM siggraph computer graphics, Aufl. 21, Nr. 4, ACM, 1987. S. 163-169
- [7] Kobbelt, Leif: Iterative Erzeugung glatter Interpolanten. Shaker, 1994.
- [8] <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/tosca/> (abgerufen am 20.5.2017)
- [9] Bendsøe, Martin P.: Optimal shape design as a material distribution problem. Structural and multidisciplinary optimization, Aufl. 1, Nr. 4, 1989. S. 193-202

Ein alternativer Ansatz zur numerischen Simulation der Genese von Hirnödemen

Hans-Peter Prüfer

Ruhr-Universität Bochum, im Ruhestand

Email: hp@itm.rub.de

Inhalt: Die Therapieplanung bei schwerem Schädel-Hirn-Trauma kann durch die numerische Simulation der Ödemgenese deutlich unterstützt werden. Dazu ist es erforderlich, geeignete Modelle zu entwickeln und Lösungsalgorithmen zu finden. Ausgehend von der klassischen FEM wird hier als Alternative die MPM vorgeschlagen, die eine vereinheitlichte konsistente Vorgehensweise verspricht. Anhand eines einfachen Beispiels wird die Vergleichbarkeit der Methoden demonstriert.

Abstract: To cope with severe traumatic brain injuries reliable prognosis is needed. This can be achieved by numerical simulation of brain damage. Geometric and physical modelling is usually done by means of the FEM. In this paper we propose and evaluate an alternative approach with material point methods which are better suited for the description of complex material distributions and mutiphysical effects.

Stichwörter: Schädel-Hirn-Trauma, Ödemgenese, Modellbildung, FEM, MPM

Keywords: traumatic brain injury, damage, brain model, FEM, MPM

1 Remotivation

Schädel-Hirn-Traumata (SHT) treten häufig als Unfallfolge auf. Hier sind besonders Sportunfälle zu nennen - traurige Berühmtheit hat der Skiunfall einer deutschen Sportikone erlangt - ebenso wie in den letzten Jahren das SHT-Risiko in den Football- und Eishockeyligen in den USA in den medizinischen Fokus gerückt ist [1]. Für das schwere SHT ist bei stark ansteigendem Hirndruck trotz einiger Kritik nach wie vor die Kraniektomie die Therapie der Wahl [2,3]. Eine realistische Prognose des Schadenverlaufs und des Therapieoutcomes bleibt dabei durchaus ein interessantes Ziel für Simulationen, da Vergleichsstudien *in vivo* ethisch anfechtbar sind. Angesichts der Tatsache, dass die bisherigen Simulationsversuche mit Hilfe der Finiten Elemente stets nur Teilbereiche der physikalischen Phänomene abdecken konnten, können alternative Werkzeuge wie die Materialpunktmethode eine ganzheitliche Sicht liefern. Was hierbei möglich sein kann und um welchen Preis dies erreichbar ist, soll im Folgenden dargestellt werden.

2 Welche Erwartungen werden an eine Simulation gestellt?

Das ursprüngliche von der Neurochirurgie ins Auge gefasste Simulationsziel war die Verbesserung der Therapieplanung bei schwerem SHT. Dies umfasst Vorhersagen der Ödementwicklung und die Planung von Ort und Ausdehnung einer gegebenenfalls erforderlichen Kraniektomie. Ausführliche Studien der einschlägigen Literatur sowie Testrechnungen haben gezeigt, dass diese Ziele zwar grundsätzlich erreichbar sein können, in der Praxis jedoch durch eine Vielzahl wenig bekannter Einflussgrößen unrealistisch werden.

Als erstes Problem hat sich dabei die Wahl des geeigneten Materialgesetzes und der zugehörigen Parameter erwiesen. Biologische Materialien weisen eine erhebliche Schwankungsbreite auf. Das zweite Problem ist die Beschreibung der komplexen Hirngeometrie mit Furchen (*sulci*) und Hohlräumen (*Ventrikel*), verbunden mit der Zuordnung unterschiedlicher Materialeigenschaften. Das dritte Problem ist die Definition eines akzeptablen Versagenskriteriums. Bei welchem Zustand ist eine (chirurgische) Intervention erforderlich?

Angesichts der Tatsache, dass der Interventionszeitraum auf wenige Stunden beschränkt ist, muss eine klinisch einsetzbare Simulation sehr schnell erfolgen. Hier werden wir den zur Zeit größten Schwierigkeiten begegnen.

3 Welche Effekte müssen im Modell erfasst werden?

Betrachtet man die Mechanismen, die zur Schädigung des Hirngewebes führen, so erkennen wir unmittelbar die Verlagerung von Hirngewebe mit Einklemmung und die Druckverteilung innerhalb des Hirns. Das sind klassische mechanische Effekte. Sie sind mit einer Volumenzunahme verknüpft sind. Auch diese lässt sich noch recht gut mit Mitteln der Mechanik beschreiben; eine typische Vorgehensweise ist die ersatzweise Beschreibung durch Wärmedehnungen.

Die Hirngeometrie erfordert die Berücksichtigung von Kontaktbedingungen: Insbesondere Selbstkontakt in den Ventrikeln und Kontakt mit der umgebenden Hirnhaut und dem Cranium. Auch damit wird die Domäne der Mechanik noch nicht verlassen.

Bis hierhin kann man prinzipiell einen statischen (sic!) Zustand beschreiben. Für die Prognose ist es jedoch wesentlich, Änderungen beobachten und bewerten zu können. Ödeme entstehen durch diffusive und perfusive Effekte. Bei unfallbedingten schweren SHT trägt vor Allem die Diffusion zur Ödemgenese bei. Ihre Berücksichtigung macht aus der mechanischen Aufgabenstellung ein multiphysikalisches Problem.

An dieser Stelle kommt wieder die Geometrie ins Spiel. Die Materialeigenschaften müssen um Diffusionstensoren erweitert werden, und deren Zuweisung zu Hirnbereichen erweist sich insofern als schwierig, als es hier keine großen Bereiche mit einheitlichen Diffusions-eigenschaften gibt, sondern nur eng begrenzte Diffusionsbahnen [4].

4 Der erste Modellansatz: Finite Elemente

Beschränkt man sich auf die rein mechanischen Effekte, so ist die Methode der Finiten Elemente grundsätzlich der Goldstandard. Die bekannten Berechnungsansätze zum mechanischen Verhalten von Hirngewebe greifen alle auf die FEM zurück [5,6]. Im Sinne der Vergleichbarkeit wurden die eigenen Berechnungsversuche [7] ebenfalls mit der FEM durchgeführt. Obwohl die erreichten Ergebnisse durchaus akzeptabel erscheinen, wurde es offensichtlich, dass man hier in eine Sackgasse gerät. Die zentrale Schwierigkeit stellt die ausgesprochen komplexe Geometrie des Hirns dar, verbunden mit einem ebenfalls komplexen Materialmix. Die sonst üblichen Vereinfachungen sind hier kaum möglich, da die ödeminduzierten Schädigungen gerade durch Ventrikel und membranartige Begrenzungen bedingt sind. Vereinfachungen machen die notwendige patienten-individuelle Vorhersage unmöglich.

Dennoch hat die FEM auch hier ihre Berechtigung. Immerhin ist sie ein validiertes Verfahren, und sie ist sehr gut geeignet für Voruntersuchungen, wie sie beispielsweise die Auswahl eines passenden Materialgesetzes betreffen. Man möchte die durch die Volumenzunahme hervorgerufenen Effekte einschätzen können, wie etwa das Kollabieren der Ventrikel, die zunächst noch als Reserveausweichräume dienen, oder der Kontakt zwischen Hirngewebe und Falx, aus dem mögliche Einklemmungen resultieren. In diesen Fällen erweist es sich als günstiger, zunächst eine drastisch vereinfachte Geometrie zu nutzen. Dieses Vorgehen reduziert die Möglichkeit von späteren Fehlinterpretationen.

5 Was die FEM nicht gut kann

Unabhängig von den Schwierigkeiten, eine hinreichend feine Elementierung für die Hirngeometrie zu erzeugen, gibt es drei weitere Probleme. Das Erste betrifft den Einfluss der Diffusion bei der Ödemgenese. Wir haben hier mehrere gekoppelte physikalische Effekte, und für derartige Multiphysik ist die FEM nicht besonders geeignet, auch wenn dank XFEM [8] mögliche Lösungen existieren. Mit der Diffusion hängt das zweite Problem unmittelbar zusammen: Die Diffusionsbahnen sind eindimensional. Sie entsprechen im Wesent-

lichen den Nervenfaserbündeln. Die mechanische Kopplung eindimensionaler „Nervenfaserelemente“ mit der dreidimensionalen Matrix aus inhomogenem Hirngewebe ist extrem schwierig, zudem muss noch die physikalische Kopplung von Diffusion und Dehnung beachtet werden. Das dritte Problem ist schließlich die Betrachtung großer Verlagerungen. Hierfür ist ein iteratives Remeshing erforderlich.

6 Der alternative Modellansatz: Materialpunktmethode

Die Materialpunktmethoden (MPM) sind als Diskretisierungsverfahren gewissermaßen dual zu den Finiten Elementen. Die zu untersuchende Struktur wird mit einem üblicherweise regelmäßigen Muster aus materialassoziierten Punkten überdeckt, der interessierende Bereich durch ein weiteres raumfestes Punktraster beschrieben. Die Beschreibungsgleichungen werden ebenso wie die physikalischen Eigenschaften an die Materialpunkte gebunden, wobei die Gleichungen dann auf dem diskreten Raumraster gelöst werden. Dabei sind die Materialpunkte innerhalb des Rasters frei verschiebbar, nur eingeschränkt durch mögliche Interaktionen [9].

Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, inhärent multiphysikalisch zu sein. Da für die Materialpunkte Bewegungsgleichungen gelöst werden können, gibt es zeitabhängige Lösungen. Schließlich ermöglicht die freie Verschiebbarkeit große Verlagerungen ebenso wie Bruchvorgänge. Damit wäre prinzipiell das ideale Lösungsverfahren gefunden – allerdings wird es durch einen erheblichen Zeitaufwand erkauft, und damit steht die Eignung für den klinischen Einsatz wieder in Frage.

7 Ein Validierungsversuch

Die Beschreibung aus dem vorausgegangenen Abschnitt lässt die MPM für unsere Aufgabenstellung grundsätzlich als attraktive Alternative zur FEM erscheinen. Ihr großer Nachteil besteht darin, dass sie bislang vorwiegend in der Forschung eingesetzt worden ist und kaum praktische Erfahrungen vorliegen, mit denen ein zuverlässiger Abgleich mit der FEM möglich wäre. Aus diesem Grunde wurde die einfache Hirnersatzmodellierung aus dem letztjährigen Beitrag übernommen, jedoch zunächst in ein zweidimensionales Modell überführt, um die prinzipielle Funktionsweise näher untersuchen zu können.

Dieses Modell ist insoweit interessant, als das mit der FEM bestimmte Verhalten durch die MPM bestätigt werden konnte. Bild 1 zeigt sowohl bei der Vergleichsspannung als auch dem Druck die gleiche Verteilung, wenn auch aufgrund der deutlich geringeren Auflösung

(größere Diskretisierung) der MPM nur eingeschränkt. Ebenso ist es sicher anfechtbar, einen Schnitt durch ein 3d-Modell mit einer zweidimensionalen Modellierung zu vergleichen. Man kann jedoch davon ausgehen, dass das grundsätzliche Verhalten sehr gut reproduziert wird.

Die Ergebnisse sind also vergleichbar. Allerdings stellte sich schon bei dem einfachen zweidimensionalen Modell ein deutlich erhöhter Rechenzeitbedarf heraus. Der reine Analyselauf benötigte etwa eine Minute, eine Größenordnung mehr als die FEM! Ein weiterer Versuch mit einem dreidimensionalen Modell ähnlicher räumlicher Auflösung benötigte zweieinhalb Tage, wobei mangels geeigneter Postprocessingsoftware die Resultate kaum zu beurteilen sind. Einen deutlichen Hinweis auf den erforderlichen Zeitbedarf gibt eine Beispielrechnung [10]. Ein Modell aus $102 \times 102 \times 85$ Materialpunkten benötigte dabei mit einem üblichen Vierkernprozessor 2.4 Stunden Analysezeit.

Als erste Erkenntnis folgt einerseits aus diesen Untersuchungen, dass die MPM funktioniert. Die erforderliche Rechenzeit ist jedoch kaum für den klinischen Einsatz geeignet; hierzu sei noch einmal auf den Interventionszeitraum von wenigen Stunden verwiesen. Eine deutliche Reduktion der Rechenzeit ist andererseits durch den Einsatz besserer Hardware möglich. Die MPM ist sehr gut parallelisierbar. Daher ist der Einsatz von Mehrprozessorsystemen, insbesondere auch von GPU, in dieser Hinsicht erfolgversprechend.

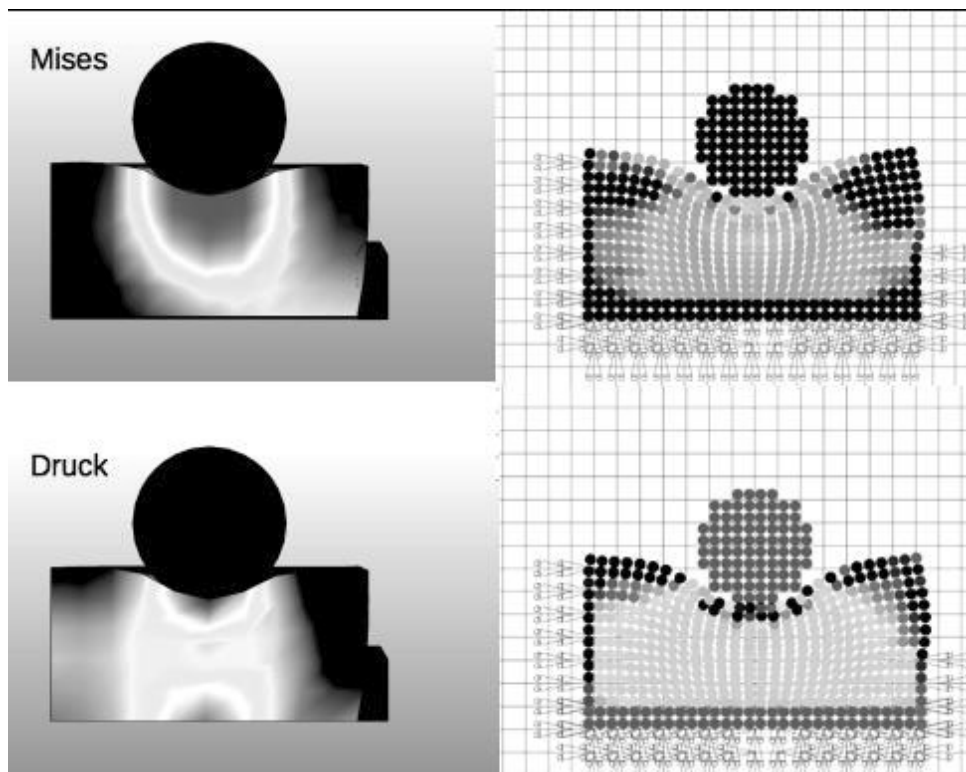


Bild 1: Ergebnisvergleich FEM (links) mit MPM (rechts)

8 Softwarevergleich

Zur Zeit sind im Wesentlichen drei MPM-Softwaresysteme verfügbar, die den gesamten Workflow abbilden können, davon ein kommerzielles System.

MPMsim [11]

Es handelt sich um ein kommerzielles System, das von seinen Entwicklern als praktikable Alternative zur FEM angeboten wird. MPMsim verfügt über eigene Pre-/Postprozessoren. Dabei nutzt der Preprocessor ausschließlich den CAD-Import zur Modellbildung, verbunden mit editorischen Möglichkeiten. Als Vorteil gegenüber der FEM werden besonders die multiphysikalischen Fähigkeiten und die einfache Bearbeitung von Aufgaben der Bruchmechanik hervorgehoben.

Es gibt ein mehrstufiges Lizenzmodell; die Software wird für die drei Standardplattformen Windows, MacOSX und Linux angeboten.

Vorteilhaft ist die für kommerzielle Produkte ausgiebige Validierung, nachteilig dagegen die ausschließliche Nutzung von CAD-Modellen; dies ist ein Ausschlusskriterium für die hier betrachtete Aufgabenstellung.

NairnFEAMPM [12]

Hier finden wir eine typische Hochschulsoftware, die zur Lösung sehr spezifischer Aufgaben konzipiert worden ist. Im Wesentlichen ist das die Modellierung von Holzmikrostrukturen unter extremen Belastungen – Holzspalten, Waldbrände, Verpressen von Spänen. Interessant ist die Integration eines FEM-Moduls. Pre- und Postprocessing sind recht rudimentär, rein textuell/skriptbasiert. Der Preprocessor kann Elementargeometrien verknüpfen, ansonsten ist nur die – hier jedoch sehr wünschenswerte – Nutzung von Schichtbildern vorgesehen.

Die Software ist frei verfügbar. Die angebotene Registrierung soll die Kommunikation unterstützen. Binär liegt die Software für MacOSX vor; eine Portierung auf andere Plattformen ist mit Einschränkungen möglich. Da eine Reihe einschlägiger Tagungen stattgefunden hat und alle relevanten Ergebnisse veröffentlicht sind, kann man von einer hinreichenden Validierung ausgehen. Nachteilig ist die eher mäßige Dokumentation, die ausschließlich online angeboten wird.

Uintah [13]

Hier liegt ebenfalls eine Hochschulsoftware vor, mit ähnlichen Eigenschaften wie NairnFEAMPM. Die Uintah-Suite ist allgemeiner, für eine größere Klasse von Aufgaben konzipiert. Das Preprocessing weist keine wesentlichen Unterschiede zu NairnMPM auf. Das Postprocessing ist demgegenüber durch die Nutzung von VisIT erheblich komfortabler; der Funktionsumfang von VisIT ähnelt dem von ParaView.

Uintah ist ausschließlich als Quelltext verfügbar. Installationshinweise gibt es für alle oben genannten Plattformen. Das in der Suite enthaltene ergänzende Produkt VisIT ist für alle praktisch interessierenden Plattformen sogar als ausführbares Programm vorhanden.

Uintah wird in der Forschung deutlich intensiver eingesetzt als NairnFEAMPM und kann deshalb ebenfalls als validiert angesehen werden. Interessant ist der ausdrückliche Hinweis auf die massive Parallelisierbarkeit des Algorithmus, die eine Portierung auf GPU nahelegt. Die Dokumentation ist sehr ausführlich, und es wird eine Vielzahl von Beispielrechnungen mitgegeben.

Vorläufige Bewertung

Liegt ein CAD-Volumenmodell der interessierenden Struktur vor, dürfte das kommerzielle System MPMsim am besten geeignet sein. Die auch für Hochschulen erschwingliche Ausbildungslizenz lässt allerdings maximal 25 Millionen Materialpunkte zu. Das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von 292 Punkten. Für detaillierte Studien reicht das eher nicht. Die beiden Hochschulsysteme sind tendenziell gleich gut geeignet. Uintah hat allerdings nicht nur einen noch erheblich größeren Funktionsumfang, sondern auch das bessere Postprocessing. Für NairnFEAMPM spricht die einfachere Handhabbarkeit und vor Allem die Verfügbarkeit eines Kompilats für die hier genutzte Hardware unter MacOSX, was letztlich für die in diesem Beitrag gezeigte Untersuchung den Ausschlag gegeben hat, da die Erzeugung eines lauffähigen Programms unter MacOSX in der Regel problematisch ist.

9 Von der Diagnose zum Modell

Als eine Quelle von Schwierigkeiten bei der Anwendung der FEM haben wir die geometrische Komplexität des Hirns identifiziert. Für die Elementierung wird üblicherweise ein CAD-Modell benötigt, das vom Preprocessor importiert wird. Bezogen auf die zukünftige Nutzung in einer klinischen Umgebung würde dies bedeuten, dass mit Hilfe der eingesetzten bildgebenden Verfahren ein Volumenmodell erstellt wird. Das ist in der Tat möglich,

aber mit einem erheblichen Aufwand verbunden, zu dem auch noch ein großer Anteil manueller Nachbearbeitung kommt.

Hier sind wir nun in der theoretisch glücklichen Situation, dass die mittels CT oder MRT erzeugten Schichtbilder prinzipiell hervorragend zu den Modellierungsmöglichkeiten der MPM passen. Im zweidimensionalen Fall werden die Bilder entsprechend der gewählten Diskretisierungsfeinheit gerastert, und den Materialpunkten können anhand der Farbinformation aus dem Bild Eigenschaften zugewiesen werden. Dieser Vorgang ist gut automatisierbar. Für dreidimensionale Modelle wird das Prinzip verallgemeinert. Die Schichtbilder haben einen nominellen Abstand, den man auf das Punkteraster abbilden kann, etwa dadurch, dass jeder der Punktschichten ein Teilbild zugeordnet wird. Wegen der Regularität der Rasterung ist das fast trivial. Der unbestreitbare Vorteil liegt in der möglichen unmittelbaren Erzeugung des MPM-Modells aus Originaldatensätzen, wogegen das traditionelle Vorgehen die Umwandlung dieser Datensätze in ein CAD-taugliches Volumenmodell mit anschließender Elementierung erfordert. Wie derartige inhomogene Strukturen aussehen, ist in [14] beispielhaft dargestellt.

An dieser Stelle ist jedoch deutliche Kritik zu üben. Der hier so entscheidende große Vorzug der beiden Hochschulsysteme, Schichtbilder nutzen zu können, wird durch die gerade in Bezug auf diese Eigenschaft besonders schlechte und unvollständige Dokumentation konterkariert. Das geforderte Dateiformat wird nur recht global als *uncompressed 8-bit grayscale bitmap* beschrieben; Erzeugungsvorschriften gibt es nicht. Praktische Beispiele werden ausschließlich als Ergebnisse demonstriert. Im Falle von NairnFEAMPM sind die Fehlermeldungen ebenso wenig hilfreich wie reproduzierbar. Ein Versuch, den – offen zugänglichen – Quellen weitergehende Informationen zu entnehmen, ist ebenso gescheitert wie die Kontaktaufnahme mit dem Autor/Entwickler.

10 Fazit

Die Simulation der Hirnödemenese kann mittels MPM durch ihren multiphysikalischen Ansatz vereinfacht werden. Das gilt im Prinzip auch für die Modellbildung, die unmittelbar auf die medizinischen Bilddaten zurückgreifen kann. Die ersten Vergleichsrechnungen liefern Ergebnisse, die mit den FEM-Resultaten kompatibel sind. Für den klinischen Einsatz sind nicht nur weitere Untersuchungen notwendig – entscheidend ist hier der Zeitbedarf der MPM. Sollen in dieser Hinsicht Fortschritte erzielt werden, so ist leistungsfähige massiv parallele Hardware, z.B. GPU, unverzichtbar, ebenso ein Tuning der Algorithmen.

Die bei Nutzung der Hochschulsoftware aufgetretenen Schwierigkeiten lassen allerdings eine praxistaugliche Realisierung zur Zeit noch als Zukunftsmusik erscheinen.

Literatur

- [1] McIntosh, A S; McCrory, P: Preventing head and neck injury. Br J Sports Med 2005;39:314–318
- [2] Hutchinson PJ, Kolias AG, Timofeev IS et al. Trial of decompressive craniectomy for traumatic intracranial hypertension. N Engl J Med 2016; 375: 1119 – 30
- [3] Oberhofer, Elke: Traumapatienten mit kritischem Hirndruck laminektomieren?
<https://www.springermedizin.de/neurochirurgie/hirntraumen/> (abgerufen 05.07.2027)
- [4] Basser, Peter J.; Pajevic, Sinisa; Pierpaoli, Carlo; Aldroubi, Akram: Fiber tract following in the human brain using DT-MRI data. IEICE Trans. Inf. & Syst. E85-D, 1 (2002) 15-2
- [5] Miller, Karol; Chinzei, Kiyoyuki: Mechanical properties of brain tissue in tension. J. Biomech. 35 (2002) 483-490
- [6] Clatz, Olivier; Delingette, Hervé; Bardinet, Eric; Dormont, Didier; Ayache, Nicholas: Patient specific biomechanical model of the brain: Application to Parkinson's disease procedure. Lecture Notes Comp. Sci. 2673 (2003) 321-331, INRIA Sophia Antipolis
- [7] Prüfer, Hans-Peter: Berechnungsmodelle im Sinne von Prognose und Therapieplanung bei schweren Schädel-Hirn-Traumata. KT 2014, Bayreuth, 16.-17. Oktober 2014, 417-426
- [8] Moës, Nicolas; Dolbow, John; Belytschko, Ted: A finite element method for crack growth without remeshing. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 46(1): 131–150
- [9] Nairn, J. A.: Material Point Method Calculations with Explicit Cracks. Computer Modeling in Engineering & Science, 4:649–664, 2003
- [10] Guilkey, Jim e.a.: Uintah User Guide. Version 1.6, 257-258
- [11] <https://www.mpmsim.com> (abgerufen 10.05.2017)
- [12] <http://people.oregonstate.edu/~nairnj/> (abgerufen 10.05.2017)
- [13] <http://uintah.utah.edu> (abgerufen 10.05.2017)
- [14] Aimene, Y. E.; Nairn, J. A.: Simulation of transverse wood compression using a large-deformation, hyperelastic-plastic material model. Wood Sci & Tech., 49, 21-39 (2015)

Der reibungsarme Radnabenmotor mit Radialrillenkugellagern

Andreas Zörnig, Ralf Hinzelmann*, Roland Kasper*

Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH

Otto-von-Guericke-Allee 12, 39179 Barleben

Email: andreas.zoernig@emb-online.de; Internet: <http://www.emb-online.de>

*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>

Inhalt: Im Forschungsschwerpunkt Automotive der OvGU werden Elektroantriebe mit eisenloser Luftspaltwicklung erforscht. Seit 2012 wurden mehrere Varianten von Radnabenmotoren für PKWs entwickelt und getestet. Sie zeichnen sich durch eine zentrale Hauptlagerung mit angestellten Wälzlager aus, welche die Radlasten aufnimmt. Typische Elektromotoren sind beidseitig gelagert und mit Radialrillenkugellagern ausgestattet. Unter Nutzung dieses Lagerprinzips wird die mechanische Entwicklung von Radnabenmotoren mit den heute zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten vorgestellt. Dazu werden Konzepte und Entwürfe erläutert. Dabei hat die Wahl der Felgengeometrie und -befestigung einen wesentlichen Einfluss auf das Gewicht sowie den Luftspaltdurchmesser, wovon das erzielbare Drehmoment abhängt. Der Außenläufer ermöglicht vielfältige Bremsenkonzepte. Anhand von Kriterien wird die Eignung von Radiallagern als Festlager untersucht.

Abstract: In the automotive main research field of the OvGU electric drives with ironless air gap winding are researched. Since 2012 a few variants of wheel hub motors for cars were developed and tested. They are characterised by a central main bearing with prestressed rolling bearings, which carry the wheel load. Typical electrical motors have bearings on each side and are equipped with deep groove ball bearings. Using this bearing type, the mechanical development of wheel hub motors by use of technical capabilities from nowadays is presented. Technical concepts and designs are explained. Thereby the choice of geometry of the rim and the mounting has an effectual influence to the weight as well as to the diameter of the air gap. The achievable torque depends on this. The outer rotor enables various concepts of brakes. By means of criterions the usability of radial bearings as a locating bearing is analysed.

Stichwörter: Radnabenmotor, Luftspaltwicklung, Direktantrieb, Radialrillenkugellager, Felge

Keywords: wheel hub motor, air gap winding, direct drive, deep groove ball bearing, rim

1 Einleitung

Mit direktgetriebenen elektrischen Radnabenmotoren wird eine enorme Reduzierung der Teilevielfalt gegenüber herkömmlichen Antriebssystemen erreicht. Um ein geringes Gewicht des Radmoduls zu erwirken, ist die eisenlose Radialfluss Luftspaltwicklung und die

Kombination aus Luftspalt- und Nutenwicklung hervorzuheben, welche an der OvGU erforscht werden [1, 2]. Die bisherigen Radnabenmotoren der OvGU sind seit 2012 mit zentraler Hauptlagerung und Nebenlagerung versehen [3]. Diese Hauptlagerung überträgt die Radlasten und kann aus Einzellagern oder einer fahrzeugtypischen Radlagereinheit bestehen, welche im LEIRAMO-Projekt der OvGU angewendet wird [4]. Radlagereinheiten der 3. Generation erfüllen viele Zusatzfunktionen, wie die Lebensdauerschmierung, die Abdichtung, die Flanschbefestigung und die Zustandsüberwachung. Die beidseitige dezentrale Lagerung kann mit zwei Radialwälzlager und somit reibungsärmer ausgeführt werden. Radialrillenkugellager (RRKL) gelten als besonders reibungsarm und kostengünstig [5]. Auf Basis der Anforderungen und der Funktionsstruktur des Entwicklungsprozesses des ersten Radnabenmotors der OvGU sollen Anordnungskonzepte und Gesamtentwürfe von dezentral gelagerten Motoren vorgestellt werden [6, 7]. Räderbauarten, Bremsenkonzepte und Wälzlagerarten werden verglichen.

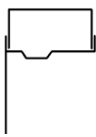
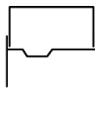
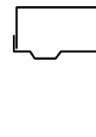
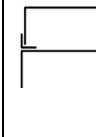

2 Radnabenmotoren mit dezentraler Lagerung

Elektromotoren ohne nennenswerte Radiallasten sind häufig mit RRKL versehen [8]. Ferdinand Porsche hat 1899 einen Radnabenmotor für ein Elektromobil entworfen. Sein Außenläufer-Elektromotor nutzt RRKL beidseitig. Für die heckgetriebenen Mercedes Electrique-Wagen entstehen später reibungsarme Radnabenmotoren mit berührungslosem Dichtsystem [9, 10]. Heutige Vertreter der dezentralen Lagerung in Automobilen sind bspw. die Firmen Quanshun Motor und Ziehl-Abegg [11, 12].

3 Rad- und Felgenvarianten

Die Hauptaufgaben einer Felge bestehen darin den Reifen in Form zu halten, die Luft zu speichern und eine Montage des Reifens zu ermöglichen. Die Radvarianten in Tabelle 1 unterscheiden sich in der Befestigung am Radnabenmotor, die mittels Radschüssel und Radbolzen als Scheibenrad mit unterschiedlichen Teilkreisen erfolgen kann oder unter Verzicht auf die Radschüssel. Hierbei kann die Felge mit dem Rotor lösbar verbunden oder in den Rotor integriert sein. Das Felgenbett kann als Tiefbett ausgeführt sein, um eine einfache Reifenmontage zu ermöglichen. Eine Flachbettfelge muss mit einem demontierbaren Seitenring versehen sein. Die Schüssel, der lösbare Seitenring und das Tiefbett können seitlich getauscht angeordnet sein [13].

Tabelle 1: Konzepte von Rädern

					
Radschüssel	kleiner Teil- kreis	großer Teilkreis			keine Schüssel
Felgenbett	Tiefbett			Flachbett	Tiefbett

4 Bremsenarten

Betriebsbremsanlagen bauen dauerhaft Energie ab. Neben der typischen Reibungsbremse können u.a. auch die Windbremse, die Wirbelstrom bzw. Induktionsbremse und die hydrodynamische Bremse in Fahrzeugen genutzt werden. In Tabelle 2 sind mehrere Varianten von Reibungsbremsen und eine Konfiguration einer Wirbelstrombremse dargestellt. Das Ordnungsschemata enthält einige Variantenkombinationen der Reib- und Gegenkörper und stellt daher eine Vorauswahl dar.

Tabelle 2: Bremsenkonzepte

	Bezeichnung	Reibkörper	Lage Reibkörper	Reibklotz	Lage Reibklotz
	Trommelbremse	Trommel	horizontal	runde Backe	innen
	Konusbremse	Konus	schräg	konische Backe	seitlich
	Scheibenbremse	Scheibe	vertikal	ebener Klotz	beidseitig (Sattel außen)
	innenumgriffene Scheibenbremse	Scheibe	vertikal	ebener Klotz	beidseitig (Sattel innen)
	Trommelzangen- bremse	Trommel	horizontal	runder Klotz	beidseitig
	Mehrscheiben- bremse	Scheibe	vertikal	ebener Klotz	an allen Seiten
	Wirbelstrom- bremse	Trommel	horizontal	Spule	beidseitig

Die Trommelzangenbremse besteht aus einer Trommel, deren Gegenstück ein Bremssattel ist. Die Bremsklötzer müssen rund sein. Durch diese Konfiguration kann der radiale Bauraum für Fahrwerkslenker vergrößert werden. Die Wirbelstrombremse nutzt ebenfalls die Trommel als Grundkörper. Die Unabhängigkeit der Bremskraftentwicklung vom Oberflächenzustand dieses Grundkörpers und der fehlende Verschleiß sind die Vorteile dieser Bremse. Die fehlende Bremskraft bei geringen Geschwindigkeiten kann durch eine zusätzliche Reibungsbremse ausgeglichen werden [14, 15].

5 Anordnungskonzepte der Motorkomponenten

Die Konzeption von Motoren umfasst die Verknüpfung von Wirkprinzipien, um die Funktionsstruktur in eine Wirkstruktur umzusetzen. Die Bildung von prinzipiellen Gesamtlösungen erfolgt durch die Platzierung der Wirkprinzipien. In den Tabellen 3 und 4 sind Gesamtlösungen gegenübergestellt, die das Resultat aus Wirkstrukturen und Anordnung der bereits vorausgewählten Einzellösungen der Bremsenarten und Radvarianten sind. Alle Motorvarianten haben die beidseitige Lagerung zur Aufnahme der Radlasten und das Prinzip der Radialflusswicklung gemeinsam. Einige Funktionen, wie die Ausführungsart der Wälzlager, die Kühlung oder die Leitung der Energie werden in nachfolgenden Konzeptuntersuchungen und in der Entwurfsphase getätigt.

Die Motorvarianten mit Tiefbettfelge garantieren einen sicheren Halt der Luft, denn die mehrteiligen Flachbettfelgen benötigen umlaufende Dichtstellen, welche bei Schlagbeanspruchung des Felgenhorns nachgeben könnten. Demgegenüber erhöht sich der Luftspaltdurchmesser bei Flachbettfelgen. Abnehmbare Felgen bzw. Scheibenräder ermöglichen einen Reifenwechsel und Auswuchtvorgang, ohne den Motor mit abzunehmen. Schlagartige Beanspruchungen werden aufgefangen, ohne den Motor zu beschädigen. Ein kostengünstiger Austausch des Scheibenrades genügt. Scheibenräder mit kleinem Radbolzenteilkreis genügen dem Anspruch konservativer Geschmäcker und sind etwas elastischer als solche mit großem Teilkreis. Je größer der Teilkreis, desto leichter wird das Scheibenrad und zudem kann die fahrzeugaußenseitige Wand des Rotors leichter gestaltet werden, denn die einwirkenden Kräfte der Radbolzen verringern sich. Eine integrierte Felge ermöglicht einen sehr leichten Motor, dessen Luftspaltdurchmesser in Kombination mit einem Flachbett sehr hoch ist. Die geringste Teileanzahl in Verbindung mit geringen Herstellkosten hat der Motor mit integrierter Tiefbettfelge. Die Umsetzung eines Außenläufers mit Scheibenrad und großem Lagerdurchmesser bedingt entweder einen massiven

Flansch der Radnabe oder einen großen Lager- und Dichtungsdurchmesser. Das Konzept der integrierten Felge ist nicht sinnvoll umsetzbar.

Die Varianten mit Trommelbremse sind unempfindlicher gegen Nässe. Liegt die Trommel fahrzeugaußenseitig, so ist diese durch den Fahrtwind gut gekühlt, mit der Einschränkung einer durch Menschhand leicht erreichbaren heißen Oberfläche. Die Bremse ist schnell wechselbar, es ist mehr Platz für die Fahrwerkslenker vorhanden und das Drehmoment wird je nach Gesamtkonzept nicht mehr über den Zylinderbereich des Rotors geleitet. Eine zweite dynamische Dichtung bei den Außenläufern kommt hinzu. Die Variante mit Wirbelstrombremse erlaubt wegen des trommelartigen Grundkörpers eine freiere Platzierung der Fahrwerkslenker. Eine hydraulische Rückfallebene und Betriebsbremse bei geringen Geschwindigkeiten sowie Haltebremse muss durch eine Zusatzbremse realisiert werden, die den Grundkörper mitnutzen könnte. Die Varianten mit großem Lagerdurchmesser eignen sich zur Integration einer Mehrscheibenbremse oder Konusbremse. Der Bauraum im Radmodul kann günstiger ausgenutzt werden. Es sind zwei dynamische Dichtungen erhöhten Durchmessers vonnöten und zudem muss eine gute Wärmeisolierung zu den Lagern geschaffen sein.

Tabelle 3: Motorkonzepte

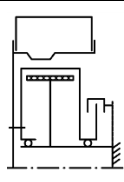
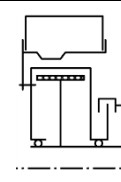
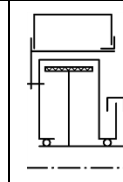
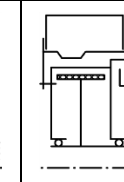
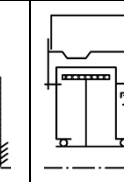
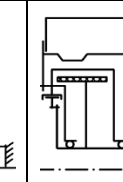
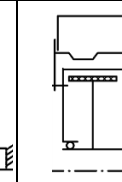
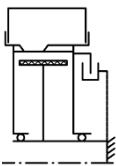
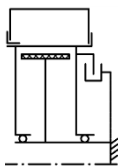
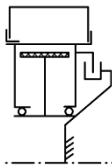
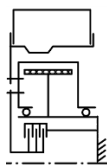
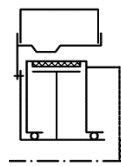
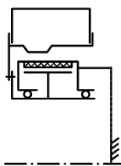
							
Felgenbett	tief		flach	tief			
Felgen- befestigung	kleiner Teilkreis	großer Teilkreis					
Lagerung	Außenläufer						
Lagerdurch- messer	klein						
Bremsenart	Scheibenbremse			innen- umgriffene S.	Trommelbremse		Wirbelstrom- bremse





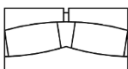
Tabelle 4: Motorkonzepte

						
Felgenbett	tief	flach		tief		
Felgenbefestigung	in Rotor integriert			großer Teilkreis		
Lagerung	Außenläufer				Innenläufer	
Lagerdurchmesser	klein		groß		klein	groß
Bremsenart	innenumgriffene Scheibenbremse			Mehrscheibenbremse		

6 Wälzlagerauswahl

Die alles dominierende mechanische Last eines Radnabenmotors ist die Radlast, welche aus dem Fahrzeuggewicht resultiert. Konzeptionell kann diese Last zentral durch eine Hauptlagerung oder durch zwei dezentrale Lagerstellen beidseitig der elektrisch aktiven Bauteile aufgenommen werden [6]. Beide Lagerkonzepte können über eine Festlager-Loslager-Anordnung, eine schwimmende oder eine angestellte Lagerung realisiert werden. Bei der Hauptlagervariante ist eine angestellte Schräglagerung günstig, um eine hohe Stützweite zu erreichen. Bei der dezentralen Variante ist der Lagerabstand per se groß genug, um eine angemessene Stützweite zu erreichen, so dass Radiallager mit geringem Nenndruckwinkel genutzt werden können. Wenn die radiale Ausdehnung der Seitenflächen des Rotors beim Außenläufer oder des Stators beim Innenläufer sehr groß ist, dann können dezentrale einseitig wirkende Schräglager eine Ausbauchung der Struktur bewirken, wenn maximale Radlasten wirken. Der Ausbauchung folgt ein seitliches Abrutschen der Lagerschalen auf den Wälzkörpern, so dass sich der Luftspalt verengt. Bei der schwimmenden Lagerung leiten beide Lager einseitige Axialkräfte in die Seitenflächen des Rotors, welche beide stabil ausgeführt sein müssen. Im folgenden Konstruktionsprozess soll die dezentrale Festlager-Loslager-Anordnung angewandt werden.

Tabelle 5: Radial-Wälzlager

					
Lagerart	Radialrillen- kugellager	Schräg- kugellager	Rillenkugel- rollenlager	Zylinder- rollenlager	Radialpendel- rollenlager
Lastaufnahme axial	beidseitig (geringe Last)	einseitig	(einseitig)	beidseitig	
geringe Reibung radial	ja	erhöht	ja (sehr ge- ring)	ja	erhöht
hohe Steifigkeit radial	mäßig	ja			

Für die Wahl eines geeigneten Festlagers folgt ein Vergleich, der in Tabelle 5 ausschnittsweise nachzuvollziehen ist. Wegen der beidseitigen Axiallast müssen beidseitig wirkende Lager oder Schräglager in Doppelausführung genommen werden. Es muss kein Winkelfehler ausgeglichen und kein Moment aufgenommen werden. Die axiale Baulänge des Lagers ist je nach Gesamtbauraumsituation kurz zu halten. Das Lagergewicht muss in Verbindung mit dem gesamten Radmodulgewicht bewertet werden. Da ein Radnabenmotor außen am Fahrzeug sitzt, ist ein geräuscharmer Lauf angebracht. Ein ruhiger Lauf wird durch eine federnde axiale Anstellung unterstützt. Eine beidseitige Spaltdichtung sollte zur einfachen Handhabung bei der Montage und konstruktiven Vereinfachung integriert sein. In Betracht aller Anforderungen stellt das Radialrillenkugellager eine favorisierende Lösung dar. Die Reibung ist gering und die Kosten sind dank der einfachen Fertigung und der hohen Stückzahlen gering. Das RRKL, das Vierpunktlager und das Pendelkugellager haben die geringste radiale Steifigkeit. Eine höhere Lebensdauer, Steifigkeit und verringerte Reibung ermöglichen Kugelrollenlager und Keramiklager. Schräggugellager und Spindellager besitzen wie die Kugelrollenlager aufgrund des höheren Füllgrades der Wälzkörper eine höhere Steifigkeit. Bei gleicher Baugröße haben Wälzlager mit Linienkontakt eine weitaus höhere Steifigkeit und Lebensdauer. Infrage kommende Typen sind das Zylinderrollenlager mit vierseitiger Bordwand, das Kegelrollenlager, das Tonnenlager und das Radialpendelrollenlager. Je höher der Nenndruckwinkel, desto ungeeigneter sind die Wälzlager für die radiale Lastaufnahme [8, 16, 17].

7 Motorentwürfe

Die vorgestellten Entwürfe in den Abbildungen 1 und 2 sind Außenläufer mit Scheiben- oder Trommelbremse, welche in Hinsicht auf eine geringe Reibung und geringe Wälzlagerkosten keinen großen Lagerdurchmesser haben. Der Rotor ist mit stabilen Rippen versehen, um die Radlasten zu leiten. Das 15-Zoll Scheibenrad, der Rotor und der Steg sind aus Aluminium, wobei der Rotoreisenrückschluss aus Baustahl ist. Die sehr steife Hohlwelle ist aus Stahl und mit Bohrungen für die Leitungen versehen. Der Steg besitzt integrierte Kühlkanäle für die Wicklung und die Leistungselektronik. Dynamische Dichtstellen bestehen aus einem mit integrierten Dichtungen versehenem RRKL, einem reibungsarmen V-Ring und einer berührungslosen Labyrinthdichtung.

Die Variante Scheibenbremse besitzt ein abnehmbares Scheibenrad. Der Rotor wird mit einem Deckel, der gleichzeitig die Scheibenbremse trägt, verschlossen. Der Wellendurchmesser richtet sich nach dem Mindestplatzbedarf der Kabel- und Schlauchanschlüsse und dem Teilkreis der Schraubenverbindung des Radträgers.

Die Platzierung der Trommelbremse innerhalb der Felgenschüssel zieht eine Verschiebung des Festlagers und Kröpfung dahinterliegender Bauteile nach sich. Das Festlager wird stärker belastet, da es näher an der Felgenmitte ist. Die Trommel ist schwimmend gelagert und somit thermisch vom Rotor und der Felge getrennt.

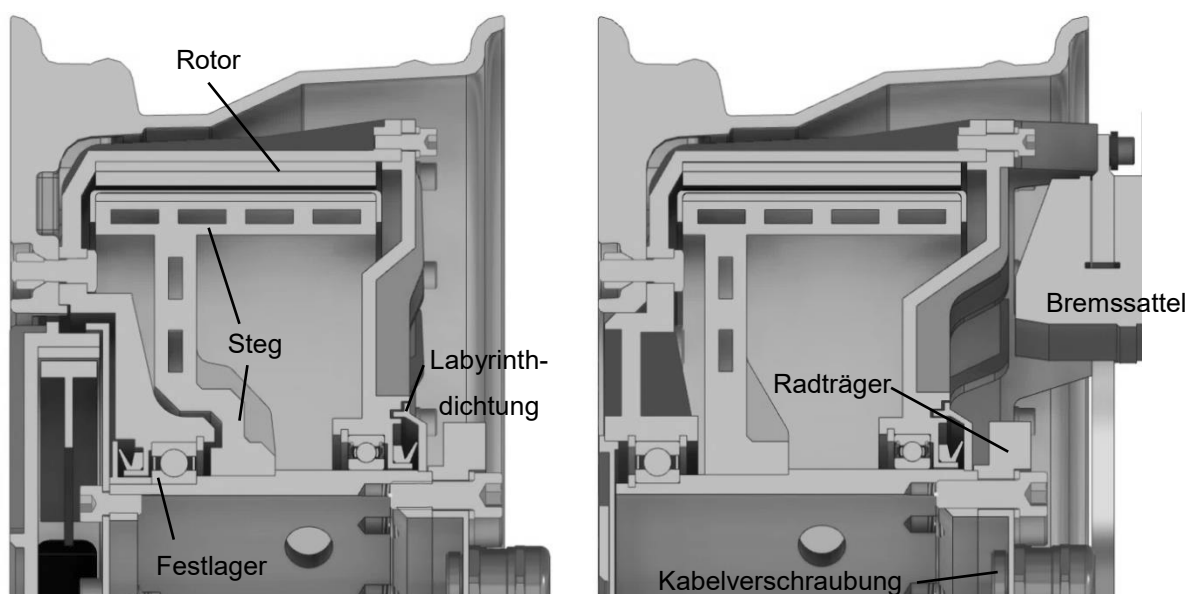


Bild 1: Entwurfsvarianten mit Scheibenrad, mit Trommelbremse (links), mit Scheibenbremse (rechts)

Die Entwürfe mit integrierter Felge ermöglichen eine deutliche Zunahme des Hebelarms der elektromotorischen Kraft und der elektrisch aktiven Materialmenge. Unter der Voraus-

setzung eines konstanten Drehschubs erzeugt die Tiefbettvariante 19% und die Flachbettvariante 37% mehr Drehmoment. Eine Nutmutter zur Befestigung des Radträgers gestattet eine Vergrößerung des Freiraums für die Leitungsanschlüsse in der Welle und vereinfacht den Montagevorgang.

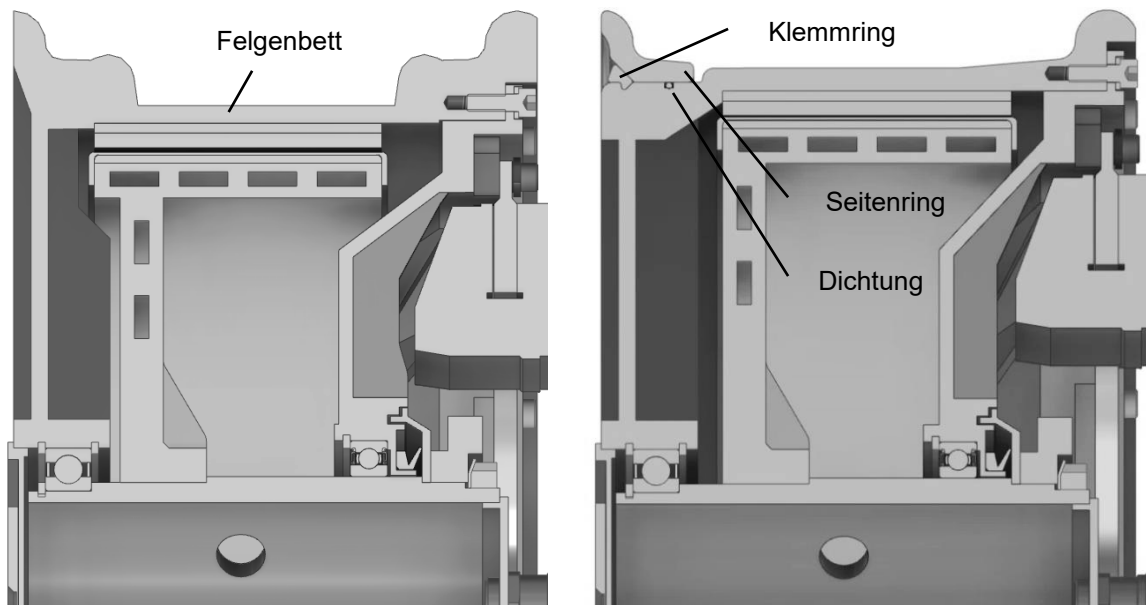


Bild 2: Entwurfsvarianten mit Integralfelge, Tiefbettfelge (links), Flachbettfelge (rechts)

8 Zusammenfassung

Anhand der Gesamtkonzepte und Entwürfe von dezentral gelagerten Motoren konnte die Nutzung von Radialrillenkugellagern bestätigt werden. Die Kombination aus RRKL mit integrierter Spaltdichtung und V-Ring lässt geringe Reibungsverluste erwarten. Dezentral gelagerte Außenläufermotoren ermöglichen drehmomentstarke und kostengünstige Integralfelgenvarianten sowie vielfältige Platzierungen für Bremsen.

9 Ausblick

Um die Entwürfe prototypisch umzusetzen, müssen weitere Funktionselemente, wie die Leistungselektronik und das Fahrwerk gestaltet werden. Zudem sind mechanische Berechnungen zur Reibleistung, der Lebensdauer und Steifigkeit des Gesamtsystems erforderlich. Ein rechnerischer Vergleich verschiedener Lagertypen und Dichtungen ist sinnvoll. Es können schadenstolerante Motoren mit Integralfelge entwickelt werden.

Literatur

- [1] Kasper, Roland: Lightweight E-Motors for In-Wheel and other Mobile Drives. 15th International CTI Symposium, Berlin, 2016
- [2] Borchardt, Norman; Penzlin, Bernhard; Zörnig, Andreas; Heinemann, Wolfgang; Kasper, Roland: Entwicklung und Validierung eines BLDC Radnabenmotors mit Luftspaltwicklung. 11. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 2013
- [3] Zörnig, Andreas; Kasper, Roland: Konstruktion elektrischer Radnabenmotoren mit Luftspaltwicklung für Kraftfahrzeuge. Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Springer, VDI-Verlag, 6/2015
- [4] Zörnig, Andreas; Hinzelmann, Ralf; Perekopskiy, Sergey; Kasper, Roland: Vergleich der Berechnung und Messung der Verluste in Wälzlagern und Dichtungen der Radnabenmotoren der OvGU. 13. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 2017
- [5] Hinzelmann, Ralf: Wälzlagerungen in Radnabenantrieben, unveröffentlichte Diplomarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2013
- [6] Zörnig, Andreas; Hinzelmann, Ralf; Kasper, Roland: Methodische Konstruktion eines Radnabenmotors mit Radialfluss-Luftspaltwicklung für Kleinwagen. 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016, Rostock
- [7] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 6. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2005
- [8] FAG Kugelfischer Georg Schäfer KGaA: Wälzlager in Elektromaschinen. Publ.-Nr. WL 01200 DA, Schweinfurt, 1988
- [9] Köppen, Thomas: Ferdinand Porsche, Ludwig Lohner und Emil Jellinek - frühe Innovatoren im Elektromobilbau. Eine Fallstudie über eine gescheiterte Innovation. TU Berlin, Fachbereich Kommunikations- und Geschichtswissenschaften, Magisterarbeit, 1987
- [10] Ludvigsen, Karl: Ferdinand Porsche- Genesis des Genies: Straße, Rennen und Luftfahrtinnovationen 1900 bis 1933. Bielefeld : Delius Klasing Verlag, 2010
- [11] QS Motor/Taizhou Quanshun Motor Co., Ltd.: <http://www.cnqsmotor.com/en> (Stand 20.11.2016)
- [12] ZIEHL-ABEGG SE: <https://www.ziehl-abegg.com/de/de/> (Stand 21.07.17)
- [13] Kermelk, Werner: Fahrzeugräder: Aufbau, Konstruktion und Testverfahren / Werner Kermelk. Landsberg/Lech : Verlag Moderne Industrie, 1999
- [14] Breuer, Bert ; Bill, Karlheinz: Bremsenhandbuch. 4. Auflage, Springer Verlag, 2013
- [15] Spannagel, Hans ; Rücker, Nikolaus v.: Scheibenbremse für Fahrzeuge, insbesondere Kraftfahrzeuge. Stuttgart-Zuffenhausen, Dr.-Ing. h. c. F. Porsche K.G., Patentschrift DBP 1137329. Anmeldetag: 30.05.1959
- [16] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: <http://medias.schaeffler.de/medias/de> (Stand 19.07.2017)
- [17] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: Wälzlagerpraxis. 4. Auflage, Mainz: Vereinigte Fachverlage GmbH, 2015

Simulationsfreie Auslegung von Freiläufen

Prof. Dr.-Ing. A. Lohrengel, V. Martinewski M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. A. Rienäcker*, Dr.-Ing. G. Ochse*, Dipl.-Ing. B. Qian*

Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal

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

Email: info@imw.tu-clausthal.de; Internet: <https://www.imw.tu-clausthal.de>

*Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik, Universität Kassel

Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel

Email: sekretariat-mt@uni-kassel.de; Internet: <https://www.uni-kassel.de/maschinenbau/institute/iaf/>

Inhalt: Als richtungsbetätigte Kupplungen werden Freiläufe bereits seit vielen Jahren im industriellen Umfeld als Schaltfreiläufe, Rücklaufsperrern oder Überholkupplungen eingesetzt. Trotz des jahrelangen Einsatzes gibt es durch immer neue Einsatzgebiete Randbedingungen, die in der Auslegung von Freiläufen derzeit nicht berücksichtigt werden. Eine dieser Randbedingungen ist eine funktionsbedingt auftretende radiale Zusatzlast, welche gemeinsam mit dem zu übertragenden Drehmoment eine kombinierte Belastung des Freilaufs darstellt. Im Rahmen des IGF-geförderten und von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik begleiteten Projektes FVA 694 (Freilauf – kombinierte Lasten) wurden radiale Zusatzlasten erstmals in Bezug auf die erreichbaren Lebensdauern untersucht. Eine radiale Zusatzbelastung führt im Freilauf zu einer Ungleichverteilung der Belastung der Klemmkontakte. Für die korrekte Bestimmung der Lebensdauer ist daher die Bestimmung des Traganteils jedes Einzelkontaktes relevant. Im Rahmen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass ein rein formeller Weg in Bezug auf die umfangreichen Simulationen zu einer sehr guten Übereinstimmung führt und damit zur Lastverteilungsbestimmung verwendet werden kann. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde das bestehende Berechnungsverfahren erweitert.

Abstract: A machine element, which enables a directional torque transmission, is called a freewheel. Currently, in terms of stress and lifetime, freewheels are designed using the FVA-calculation programs LD and JFRED. This programs only consider the mostly aimed condition of a pure torque load. In practical applications, structurally unavoidable additional loads such as radial forces are disregarded. As part of this research project the aim was to close this knowledge gap and make the calculation of freewheels regarding additional loads possible. An additional radial load leads to an overcharging of loading on the one side while the opposite side is relieved. The damage to the higher loaded body causes a greater impact on the service life than the relief on the opposite side causes an increase in service life. With the help of simulation and experiments, insights regarding the mechanisms of action and the load distribution of combined load freewheels were determined. Based on the experimental and simulation results, the existing calculation model has been adjusted so that the influence of supplementary radial loads can be considered. The adjusted model can now be implemented by the users in the usual calculation programs.

Stichwörter: Freilauf, Radiallastverteilung, Lebensdauerberechnung, Klemmrollenfreilauf

Keywords: freewheel, load distribution, radial load

1 Einleitung

Der Freilauf ist eine drehrichtungsabhängige Schalkkupplung, welche grundlegend aus vier Komponenten besteht: dem Außenring, dem Innenring, den Klemmelementen (Klemmrollen oder Klemmkörper) und einer Feder (vgl. Bild 1).

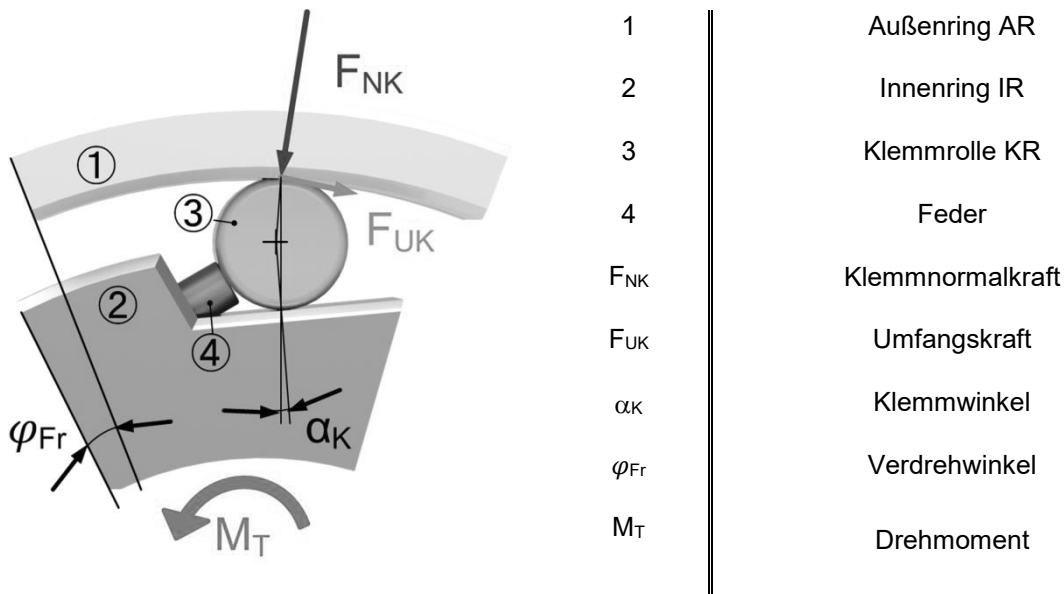


Bild 1: Aufbau eines Freilaufs mit Belastungsgrößen

Eine Verdrehung in Freilaufrichtung führt dazu, dass die Klemmrolle durch den angetriebenen Ring in die ausgeformte Tasche gegen die Feder gedrückt wird und eine kraftübertragungsfreie Bewegung resultiert. In umgekehrter Drehrichtung führt der als Rampe ausgeformte Innenring zu einem Verkeilen der Klemmrolle zwischen den beiden Ringen. Hieraus resultieren Normal- und Tangentialkräfte, welche die Drehmomentübertragung ermöglichen. Das Verhältnis von Normal- zur Tangentialkraft wird durch den Klemmwinkel α_K ausgedrückt, welcher den Winkel zwischen den Berührungspunkten und der Rollenachse beschreibt. Der Klemmwinkel bzw. das Kraftverhältnis ist entscheidend für die Funktion des Freilaufs (vgl. Formel (1)).

$$\mu > \tan(\alpha_K) = \frac{F_{UK}}{F_{NK}} \quad (1)$$

Übersteigt das Kraftverhältnis den im Klemmkontakt vorliegenden Reibwert, so kann das Drehmoment nicht übertragen werden und es kommt zu einem Haftverlust im Klemmkontakt, die Funktion des Freilaufs ist nicht mehr gewährleistet. Diese Kenngrößen (F_{NK} , F_{UK} ,

α_K, φ_{Fr}) und die sich hieraus errechenbaren Größen wie die Hertzsche Pressung p_{Hertz} bestimmen unter der Annahme einer Gleichverteilung der Last in der derzeitigen Auslegung die Lebensdauer von Freiläufen. Die Berechnungsvorgänge sind im Freilaufdimensionierungsprogramm JFRED hinterlegt.

Derzeit unberücksichtigt bleiben die Einflüsse die aus einer radialen Zusatzbelastung (F_R), wie sie z.B. in einem PKW-Generatorfreilauf auftritt, resultieren. Durch die radiale Komponente findet eine Ungleichverteilung der Klemmkräfte je Kontakt statt, sodass die derzeitigen Auslegungsgrundlagen ihre Annahmegrenzen überschreiten. Diese Lücke in der Auslegung zu schließen war das Ziel des IGF geförderten Vorhabens „Freilauf – kombinierte Lasten“. Die bei kombinierter Belastung ($M_T + F_R$) resultierenden Beanspruchungen können durch umfangreiche numerische Simulationen ermittelt werden. Mit dem Hintergrund die Projektergebnisse im analytisch rechnenden Dimensionierungsprogramm zu implementieren bestand ein Hauptaugenmerk darin, eine Methode zu finden, welche bei guter Ergebnisqualität die Notwendigkeit umfangreicher Simulationsmodelle umgeht. Die Kombination von Berechnungsverfahren aus dem Bereich der Freiläufe und der Wälzlager führte zu einer guten Übereinstimmung der Ergebnisse und stellt die im Folgenden dargestellte Lösung des Ausgangsproblems dar.

2 Darstellung der Einflüsse einer radialen Zusatzlast

Im anzustrebenden Betriebsfall eines Freilaufs, nämlich wenn dieser nur durch die aus dem übertragenen Drehmoment resultierenden Klemmkräfte (F_{NK}, F_{UK}) belastet wird, herrscht für jeden Kontakt bei Annahme guter Fertigungstoleranzen die gleiche Belastung. Eine radiale Zusatzbelastung bewirkt im Bereich der Krafteinleitung eine Erhöhung der Belastungsgrößen, während sie gegenüberliegend eine Reduktion dieser hervorruft, es entsteht eine Lastverteilung. Das Maximum der aus der Radiallast resultierenden Verteilung wird im Krafteinleitungspunkt durch Q_{max} dargestellt (vgl. Bild 2).

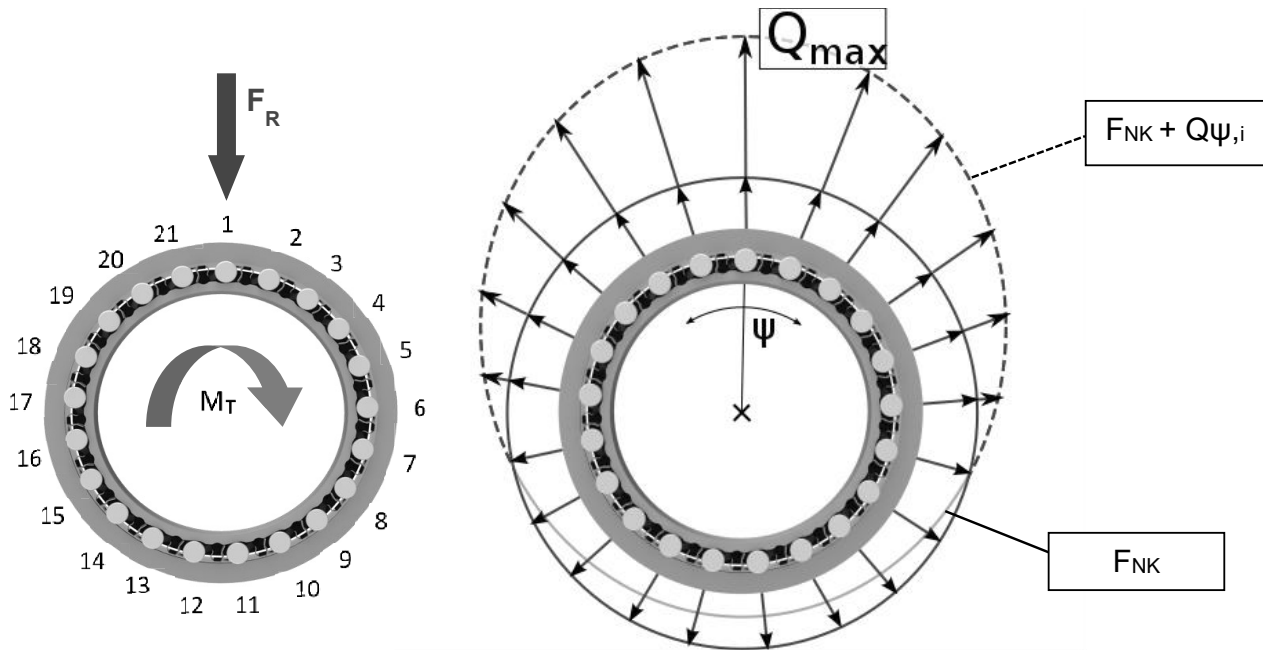


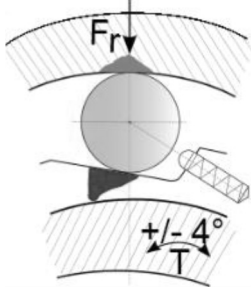
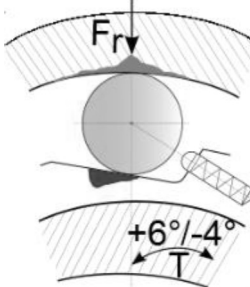
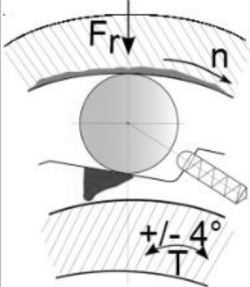
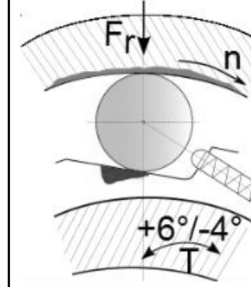



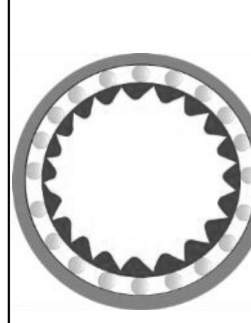
Bild 2: Kombinierte Belastung eines Freilaufs (schematisch)

Neben dem reinen Einfluss auf die sich ausbildenden Beanspruchungen im Klemmkontakt weist eine radiale Zusatzbelastung weitere Effekte auf.

Bei Annahme einer reinen Drehmomentbelastung ist die Position von Innenring und Außenring zueinander während der Schaltvorgänge in Bezug auf die Lebensdauer nahezu irrelevant. Bei radialer Krafteinleitung entsteht eine ortsfeste Überbeanspruchung des Klemmkontaktes. Hierdurch wird die Schaltabfolge bzw. der Anteil des betrachteten Klemmkontaktes im Bereich der Spitzenbelastung für die Lebensdauer relevant. Tabelle 1 stellt die Belastungszonen und die Belastungsintensität für vier verschiedene Lastfälle schematisch dar. Durch die verschiedenen Betriebsfälle variiert die Schädigungsintensität am Außen- und Innenring. Im Betriebsfall 1 und 3 ist der zu erwartende Hauptversagensort der Innenring des Freilaufs. Begründet wird dies durch die stets gleichen lokalen Beanspruchungen der Rampe, wenn der Innenstern alternierend um den gleichen Verdrehwinkel in Last- und Freilaufrichtung geschaltet wird (φ_{Schalt} z.B. $\pm 4^\circ$). Ist die Rücklaufbewegung größer als der Verdrehwinkel in Sperrrichtung (Betriebsfall 2, φ_{Schalt} z.B. $+6^\circ, -4^\circ$) und findet keine umlaufende Bewegung des Außenrings statt, so liegt die Vermutung nahe, dass der Außenring größere Schädigungen aufweist als im Normalfall. Dieser Betriebsfall ist insofern interessant, da bisherige Annahmen stets von einem Versagen des Innenrings (kontraformer Kontakt) ausgehen. Der 4. Betriebsfall beschreibt sowohl am Außen- als auch am Innenring eine umlaufende Belastung. Da ähnlich wie in den Betriebsfällen 1 und

3 die höchsten Beanspruchungen an den Rampen des Innenrings liegen, wird hier der Hauptversagensort vermutet. Dieser Betriebsfall weist aufgrund der gleichmäßigen Belastung die höchste zu erwartende Lebensdauer auf.

Tabelle 1: Schädigungsintensität der Freilaufkomponenten bei radialer Zusatzlast

Fall	1	2	3	4
Einzelkontakt				
Klemmsatz				
Schädigungsintensität Innenring			Schädigungsintensität Außenring	

Die Kombination des Wissens über die Lastverteilung und des Schaltverhaltens lässt die Möglichkeit zu, ein Belastungskollektiv für jeden Kontakt zu erstellen und dieses in der Auslegung zu berücksichtigen.

3 Darstellung der Simulations- und Versuchsergebnisse

Zur Bestimmung der lokalen Beanspruchungsgrößen wurde ein numerisches Simulationsmodell erstellt. Als Vollmodell ausgeführt wurden hiermit bei vorgegebenem Verdrehwinkel und radialer Zusatzlast die Klemmnormalkräfte und die resultierenden Hertzschen Pressungen ermittelt. Mithilfe dieses Modells wurden umfangreiche Variationsrechnungen durchgeführt, um den Einfluss einer radialen Zusatzbelastung eines Freilaufs zu analysieren und für die Definition eines analytischen Berechnungsansatzes bereitzustellen. Die zuvor getroffenen Annahmen der Pressungsüberhöhung im Krafteinleitungsbereich konn-

ten bestätigt werden. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der numerischen Ergebnisse und der Ergebnisse des analytischen Berechnungsablaufs (Kapitel 4).

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse: numerisch (iaf-mt) und analytisch (IMW)

Kräfte und Beanspruchungen am Innenring Belastung: Drehmoment und Radiallast							
M_T [Nm]	F_R [N]	FEM (iaf-mt)		Analytisch (IMW)		Abweichung	
		F_N [N]	p_{Hertz} [MPa]	F_N [N]	p_{Hertz} [MPa]	F_N [N]	p_{Hertz} [MPa]
100	3965	4599,6	3862	4369	3604	5,3%	7,2%
110	4346	5041,2	4046	4803	3779	5,0%	7,1%
120	4727	5482,8	4221	5237	3946	4,7%	7,0%
130	5135	5956,8	4394	5676	4108	5,0%	7,0%
140	5516	6398,4	4536	6110	4262	4,7%	6,4%
150	5924	6872,4	4721	6549	4413	4,9%	7,0%
160	6305	7314	4954	6982	4556	4,7%	8,7%

Die analytische Bestimmung der Beanspruchung von Freiläufen weist zur Numerik eine Abweichung von im Mittel 7% auf. Die errechneten Kräfte und Pressungen liegen etwas tiefer. Dieses kann durch die fehlende Berücksichtigung von Deformationsvorgängen und den tangentialen Kraftanteilen bei Drehmomentübertragung begründet werden. Unter Verwendung der nachfolgend dargestellten Vorgehensweise kann während der Auslegung eines radial belasteten Freilaufs die auftretende Verteilung der Beanspruchung schnell und einfach analytisch abgeschätzt werden. Der Bereich oberhalb $p_{\text{Hertz}} = 4500$ MPa weist im Bereich der Freiläufe meist keine technische Relevanz auf.

4 Darstellung des Berechnungsvorgangs

Zur Definition der für die Auslegung von Freiläufen relevantesten Größe, der Hertzschen Pressung, ist das vorherige Bestimmen der aus der Belastung resultierenden Normalkräfte für jeden Kontakt essentiell.

$$F_N = \frac{2 \cdot M_T}{z \cdot d_a \cdot \tan(\alpha_K)} \quad (2)$$

Die Klemmnormalkraft ist demnach abhängig von dem aufgebrauchten Drehmoment, der Rollenanzahl z , dem Außenringinnendurchmesser d_a und dem Klemmwinkel α_K . Der Klemmwinkel ist in den meisten Freiläufen eine Funktion des Verdrehwinkels, welcher ebenfalls das Drehmoment beeinflusst. Hier muss die belastungsspezifische Kombination

von Drehmoment und Klemmwinkel zuvor bestimmt werden. Der Klemmwinkel für den in diesem Vorhaben untersuchten Freilauf beträgt über den Verdrehwinkel konstant $\alpha = 3,98^\circ$ (Spezialfall Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe).

Die Verteilung einer radialen Belastung auf die sich im Kontakt befindlichen Rollen ist im Bereich der Wälzlager empirisch ermittelt worden [2].

$$Q_{\max} = 4,06 \cdot \frac{F_R}{z} \quad (3)$$

Ist der Winkel ψ der Rolle zur Krafteinleitung bekannt, ist der Traganteil für jede Position am Umfang bestimmbar [3].

$$Q_{\psi,j} = Q_{\max} \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} (1 - \cos(\psi)) \right] \quad (4)$$

Der Beiwert ε beschreibt hierbei ein Maß für die Lagerluft. Bei ordnungsgemäßer Drehmomentübertragung ist jede Freilaufrolle im Eingriff, sodass die Lagerluft hier mit dem Wert null angenommen wird und ein Beiwert $\varepsilon = 0,5$ resultiert.

Die Kombination der Radiallastverteilung mit der errechneten Klemmnormalkraft ergibt die resultierende Kontaktbelastung $F_{N,Res,j}$ für jeden Kontakt j .

$$F_{N,Res,j} = \begin{cases} F_N + Q_{\psi,j} & \text{für } \psi = 0 \dots 90^\circ \\ F_N - Q_{\psi,j} & \text{für } \psi = 90 \dots 270^\circ \\ F_N + Q_{\psi,j} & \text{für } \psi = 270 \dots 360^\circ \end{cases} \quad (5)$$

Die Lebensdauerberechnung von Freiläufen beruht auf einem Ansatz von Lundberg und Palmgren, wonach die Erlebenswahrscheinlichkeit S eines Volumenelements V_j abhängig ist von der Belastungsanzahl N , der maximalen Orthogonalschubspannung τ_0 und deren tiefe z_0 , korrigiert um empirisch ermittelte Lebensdauerbeiwerte U , d und h [1].

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) = U \cdot N^d \cdot \tau_0 \cdot \frac{V_j}{z_0^{h,j}} \quad (6)$$

Dieser Ansatz findet für Wälzlager noch heute Anwendung. Durch die vergleichsweise hohen auftretenden Tangentialkräfte im Freilauf wurde dieser Ansatz durch Ioannides und Harris angepasst [1].

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) = U \cdot N^d \int_0^A \sigma^c dA_j \quad (7)$$

Als lebensdauerrelevante Größe wird demnach nicht mehr die in der Tiefe auftretende Orthogonalschubspannung hinzugezogen, sondern die oberflächennahe Pressung verwendet.

Werden die geometrischen Größen und die Lastverteilung berücksichtigt, ist die Erlebenswahrscheinlichkeit eines einzelnen Kontakts eine Funktion vieler bestimmbarer Parameter.

$$\ln\left(\frac{1}{S_i}\right) = f(z_{KR}, b, r_{Ar}, \varphi_{Frl}, N, U, d, c) \quad (8)$$

Auch wenn der Innenring durch den kontraformen Kontakt die höchstbelastete Stelle darstellt, weisen der Außenring und der Klemmrollensatz ebenfalls einen Anteil in der Erlebenswahrscheinlichkeit auf. In aktueller Annahme einer Belastungs-Gleichverteilung wurden die Einzelerlebenswahrscheinlichkeiten der Freilaufkomponenten (S_{IR} , S_{AR} , S_{KR}) zur Gesamterlebenswahrscheinlichkeit S_{Frl} addiert.

$$\ln\left(\frac{1}{S_{Frl}}\right) = \ln\left(\frac{1}{S_{IR}}\right) + \ln\left(\frac{1}{S_{AR}}\right) + \ln\left(\frac{1}{S_{KR}}\right) \quad (9)$$

Mit der oben dargestellten Lastverteilung und der Bestimmung der Einzelkontaktbelastung ist auch die Bestimmung der Einzelkontakterlebenswahrscheinlichkeit nötig.

$$\ln\left(\frac{1}{S_{Frl}}\right) = \prod_{j=1}^{z_{KR}} \left(\ln\left(\frac{1}{S_{IR,j}}\right) + \ln\left(\frac{1}{S_{AR,j}}\right) + \ln\left(\frac{1}{S_{KR,j}}\right) \right) \quad (10)$$

Dieses Berechnungsschema wurde für die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Freiläufe angewendet und mit den Ergebnissen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen verglichen. Bild 3 zeigt den Vergleich der errechneten Lebensdauer und der Lebensdauer laut Versuch für den Fall einer radialen Freilaufbelastung von 4000 N.

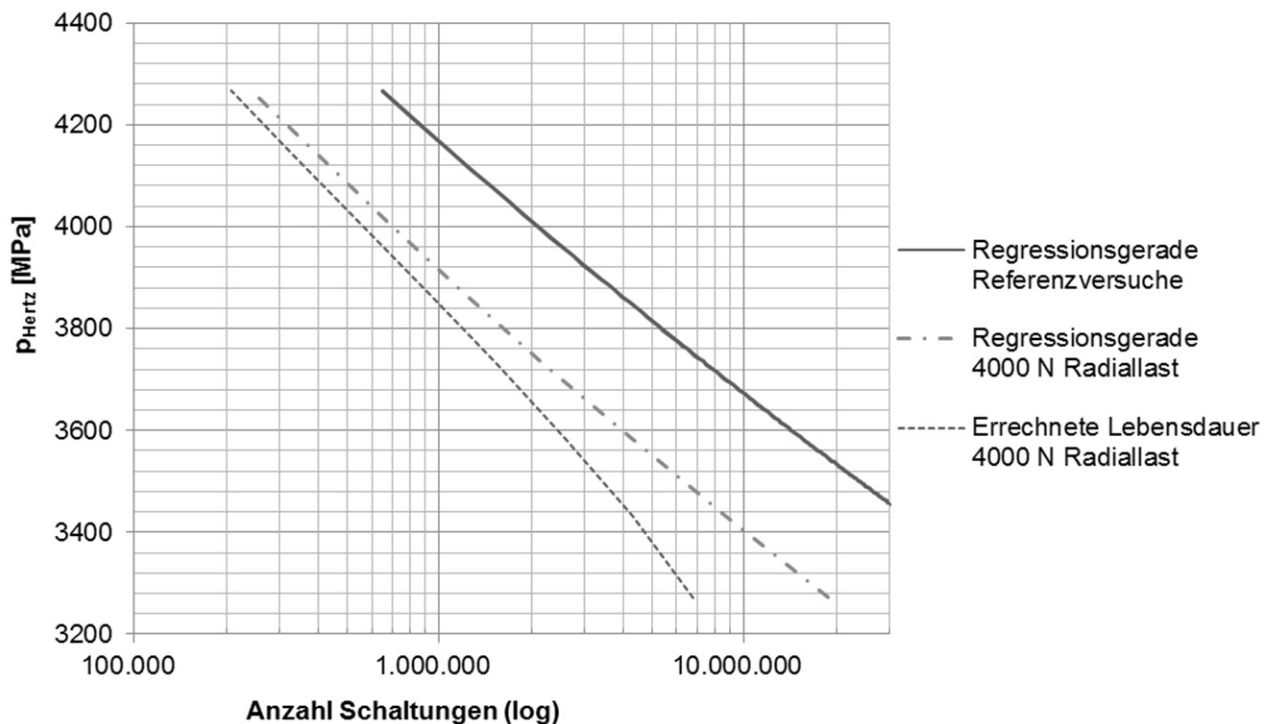


Bild 3: Lebensdauervorhersage - Versuch und Berechnung

Werden zunächst die Verläufe der durchgeführten Versuche verglichen, so ist zu erkennen, dass die Belastung eines Freilaufs mit einer Radiallast von 4000 N zu einer Lebensdauerreduktion führt. Mit dem oben dargestellten Berechnungsablauf lässt sich bei Annahme einer fünfzigprozentigen Erlebenswahrscheinlichkeit eine mit den Versuchen übereinstimmende Lebensdauer vorhersagen.

Aufgrund der vielen Einflussmöglichkeiten auf die Lebensdauer eines radial belasteten Freilaufs sind die Streuungen der Versuchsergebnisse vergleichsweise groß gewesen, weshalb eine versuchstechnisch aufwändige statistische Absicherung der Ergebnisse die Aussagequalität nochmals steigern würde (geplant im Folgevorhaben).

5 Fazit

Der Freilauf ist - im Vergleich zum artverwandten Wälzlager – ein Maschinenelement, welches aufgrund des vergleichsweise geringen Produktionsvolumens von kleinen und mittelständischen Unternehmen vertrieben wird. In Bezug auf die Produktionszahlen ist für diese Unternehmen die Nutzung von numerischen Berechnungsprogrammen zur Auslegung von Freiläufen oft wirtschaftlich nicht rentabel.

Die dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass trotz der heute verfügbaren hohen Rechenleistung eine Simulation für die Auslegung von Bauteilen nicht unbedingt notwen-

dig ist. Eine geeignete Kombination bereits vorhandener Berechnungsvorgänge und Adaption auf die spezielle Problemstellung führt zu analytisch bestimmbar, plattformunabhängigen Berechnungsvorgängen mit guter Ergebnisqualität.

Die vorgestellte Berechnung ist durch den rein formellen Ablauf in das derzeit auf dem Markt etablierte Dimensionierungsprogramm JFRED sowie in unternehmensinterne Programme implementierbar. Dem Anwender wird nun eine Möglichkeit geboten, die Produktauslegung um die Berücksichtigung radialer Zusatzlasten zu erweitern.

Literatur

- [1] Lohrengel, A.: Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Klemmrollenfreiläufen; Dissertation RWTH Aachen; 1. Aufl. Aachen: Verlag Mainz, 2001. – ISBN 3-89653-753-9
- [2] Bändlein, Eschmann, Hasbargen, Weigand: Die Wälzlagerpraxis – Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen; 3. Auflage; Vereinigte Fachverlage GmbH; 2002. – ISBN 3-7830-0290-7
- [3] Harris, T. A.: Essential Concepts of Bearing Technology; 5. Auflage: Taylor & Francis Group, 2007. – ISBN 0-8493-7183-X
- [4] Martinewski, V.; Ochse, G.: FVA-694, Freilauf kombinierte Lasten, Abschlussbericht, Forschungsreport 2016, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2016

Analyse von Zielkonflikten bei der Optimierung von Produkten und Möglichkeiten zu deren Lösung

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/>

Inhalt: Der Aufwand zur Optimierung eines Produktes steigt mit der Komplexität des Systems, der Anzahl der variablen Parameter und der Anzahl der zu optimierenden Eigenschaften. Wirken auf die zu optimierenden Produkteigenschaften mehrere Stellgrößen oder sind mehrere Eigenschaften gleichzeitig zu verbessern, ist eine manuelle Optimierung nach dem Trial-Error-Verfahren sehr aufwendig und führt nicht immer zu dem gewünschten Ergebnis.

Im vorliegenden Beitrag werden Verfahren zur effizienten Optimierung von Produkten auf Basis von approximierten Systemverhalten vorgestellt. Für sich widersprechende Zielgrößen wird ein mehrstufiger Optimierungsprozess vorgestellt und anhand eines druckbelasteten Gehäuses exemplarisch durchlaufen.

Abstract: The effort to optimize a product increases with the complexity of the system, the number of variable parameters and the number of properties to be optimized. If several control variables are to be optimized for the product properties or if several properties are to be improved at the same time, a manual optimization using the trial error method is very complex and does not always lead to the desired result. The present paper demonstrates methods for the efficient optimization of products on the basis of approximated system behavior. A multi-stage optimization process is presented for self-contradictory target variables and can be exemplified by means of a pressure-loaded housing.

Stichwörter: Optimierung, Metamodell, Mehrzieloptimierung

Keywords: Optimization, Metamodell, Multi-objective optimization

1 Einleitung

Produkte müssen im Allgemeinen eine Reihe unterschiedlichster Anforderungen erfüllen, um auf dem Markt erfolgreich zu sein. Oftmals widersprechen sich die einzelnen Anforderungen, woraus Zielkonflikte resultieren.

Diese Art Zielkonflikte sind bei der Gestaltung bzw. Optimierung von Produkten möglichst effizient zu lösen, so dass die Summe der Anforderungen bestmöglich erfüllt wird. Bei einfachen Produkten mit wenigen (voneinander weitestgehend unabhängigen) Anforderungen ist die Suche nach der optimalen Lösung mitunter recht einfach, wenn die Zusammenhänge

zwischen den Einflussfaktoren und den Zielgrößen mathematisch beschreibbar sind. Diese Sonderfälle sind in der Praxis jedoch selten anzutreffen, so dass die Suche nach der bestmöglichen Lösung entsprechend aufwendig ist.

Die wirtschaftlich und technologisch sinnvollste Lösung ergibt sich meist aus einer Kombination der möglichen Einzelmaßnahmen. Der Einfluss der Einzelmaßnahmen auf die zu optimierenden Zielgrößen ist jedoch zu Beginn des Entwicklungsprojektes nicht immer hinreichend genau bekannt, so dass die Suche nach der optimalen Kombination der Einflussfaktoren den Konstrukteur vor eine Herausforderung stellt.

2 Vorbetrachtung

Im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses sind viele Entscheidungen zu treffen, wobei die Wirkung der einzelnen Entscheidungsfaktoren auf das Endprodukt in den frühen Entwicklungsphasen meist nur abgeschätzt werden kann. Werden aufgrund des mangelnden Kenntnisstandes Fehlentscheidungen getroffen, führen diese in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium zu hohen Änderungskosten, siehe Bild 1, oder gar zu einem schlechteren Produkt, falls sie nicht korrigierbar sind.

Zur Vermeidung solcher Fehlentscheidungen benötigt der Konstrukteur Verfahren und Methoden, die ihn bei der Analyse der einzelnen Entscheidungsparameter unterstützen.

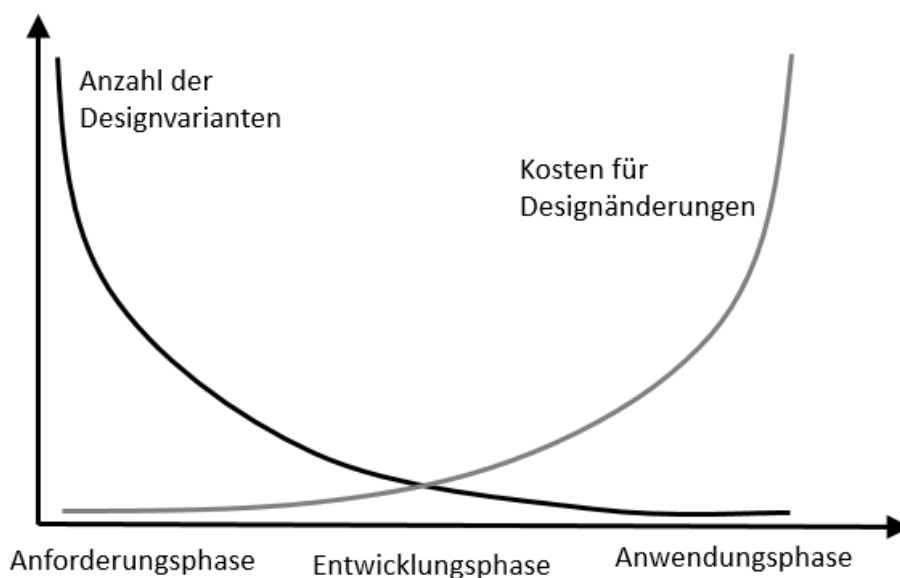


Bild 1: Zusammenhang zwischen der Anzahl der Designvarianten und den damit verbundenen Änderungskosten im Laufe des Produktentwicklungsprozesses [1]

Stand der Technik ist eine computergestützte Bauteilentwicklung (Computer Aided Engineering, CAE) mit deren Hilfe die Eigenschaften der Produkte virtuell am Computer durch Verfahren wie beispielsweise der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder der numerischen Strömungsberechnung (Computational Fluid Dynamics, CFD) untersucht werden können.

Die numerischen Methoden geben als eine Black Box (siehe Bild 2) zwar einen Aufschluss über die Eigenschaften des konkret betrachteten Modells, stellen allerdings zwischen den Systemeingangsgrößen (beispielsweise geometrische Abmessungen, Belastungen, Massenströme, Temperaturen) und den Ausgangsgrößen (beispielsweise mechanische Spannung, Druckverlust, Wärmeströme) keine direkte mathematische Verknüpfung her, wodurch eine Verbesserung der Modelleigenschaften nur sehr schwer möglich ist.

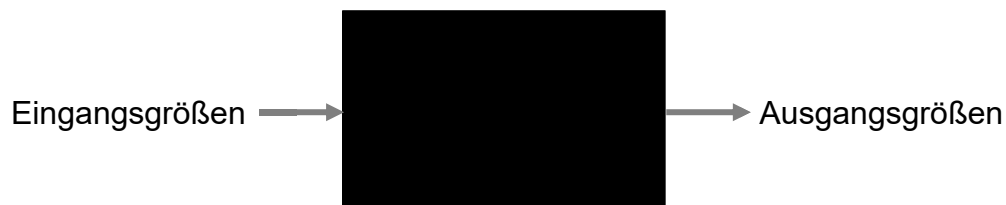


Bild 2: Black-Box Prinzip bei numerischer Simulation von Modellen

Der Konstrukteur muss an dieser Stelle entscheiden, in welcher Weise er die Einflussparameter verändert um die gewünschte Ausgangsgröße (Zielgröße) zu verbessern. Da im Regelfall mehrere Eingangsparameter die Zielgröße in unterschiedlicher Weise beeinflussen, ist hierbei meist nicht klar welche Eingangsparameter einen dominierenden Einfluss ausüben. Aus diesem Grund besteht an dieser Stelle auch die Gefahr, an den falschen „Stellschrauben zu drehen“ und somit nicht das bestmögliche Ziel zu erreichen.

Besonders anspruchsvoll gestaltet sich die Optimierung von Bauteilen, bei denen sogar mehrere Zielgrößen optimiert werden sollen, die sich selbst widersprechen. An dieser Stelle ist eine manuelle Optimierung nach dem Trial-Error-Prinzip praktisch nicht durchführbar und führt im Regelfall zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis.

3 Optimierung von Produkten mit einer Zielgröße

Die Optimierung von Systemen mit nur einer Zielgröße gestaltet sich relativ einfach. Dabei wird durch n -definierte Randbedingungen (beispielsweise zulässige mechanische Spannung oder maximale Verformung) ein n -dimensionaler Designraum aufgespannt, in dem das Extremum der Zielfunktion zu suchen ist. Die Größe des Designraums ist dabei durch den Wertebereich der Eingangsparameter definiert.

Wenn die Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern und den Ausgangsgrößen durch eine differenzierbare Funktion beschreibbar sind, lässt sich das Extremum der Funktion durch die partielle Ableitung dieser bestimmen [2].

In der Praxis liegt jedoch für einen Großteil der Problemstellung keine geschlossene mathematische Beschreibung vor. Oftmals lassen sich lediglich für einzelne Parameterkombinationen die Werte der Ausgangsgrößen mit Hilfe von zeitaufwendigen numerischen Simulationen oder messtechnischen Versuchen ermitteln, wodurch sich die Optimierung sehr langwierig gestaltet.

Liegen genügend Wertepaare als Stützstellen vor, lässt sich das Systemverhalten mit Hilfe von mathematischen Funktionen im vorgegebenen Designraum approximieren, wodurch für fehlende Parameterkonfigurationen die Ausgangswerte mit sehr geringem Zeitaufwand vorhergesagt werden können. Während sich für die Approximation einfacher funktionaler Zusammenhänge Polynomgleichungen mit niedrigem Polynomgrad eignen, werden für die in der Praxis dominierenden hochgradig nichtlinearen Systeme meist die Moving-Least-Square-Methode, radiale Basisfunktionen oder die Kriging-Interpolation verwendet [3].

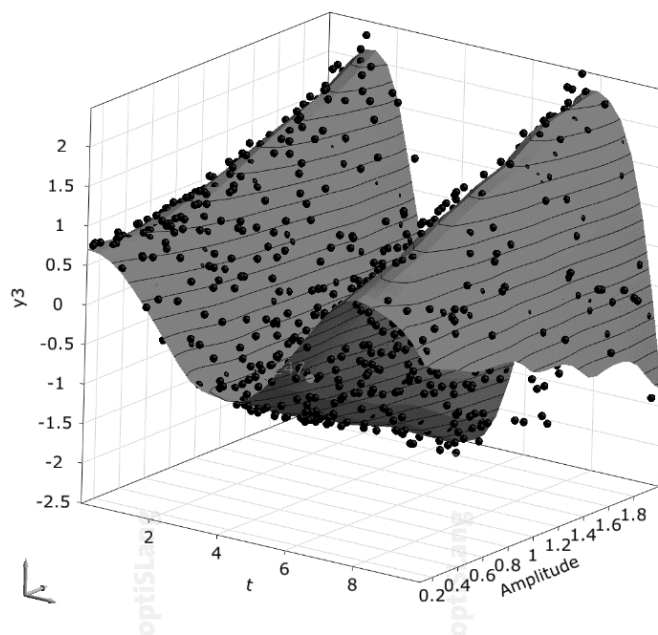


Bild 1: Approximation einer gedämpften Schwingung mit einem CoP von 0,99

Die Genauigkeit der vorhergesagten Werte ist in entscheidendem Maß von der Qualität des Metamodells anhängig. Ein Maß für die Genauigkeit des Vorhersagemodells ist der Prediction Accuracy Indicator $R_{prediction}^2$ (auch Coefficient of Prognosis CoP genannt [4]).

$$R_{presiction}^2 = CoP = 1 - \frac{SS_E^{Prediction}}{SS_T} \quad (1)$$

Dabei ist SS_T die totale Variation der vorgegebenen Werte und $SS_E^{Prediction}$ die mit Hilfe des Metamodells vorhergesagte unerwartet Streuung der Werte. Für Metamodelle mit einem $CoP \geq 0,95$ kann angenommen werden, dass sie das Systemverhalten hinreichend genau abbilden können, wodurch eine Vorhersage der Zielgröße möglich ist.

Neben der Berechnung des Systemverhaltens lässt sich auf Basis des Metamodells auch der Einfluss der einzelnen Eingangsparameter auf die Zielgröße ermitteln. Besonders bei Systemen mit einer großen Anzahl von Eingangsparametern können auf diese Weise unbedeutende Eingangsparameter herausgefiltert werden, wodurch sich die Optimierung vereinfacht.

Die Suche nach dem Optimum der Zielfunktion kann bei Systemen mit einem globalen Extremum sehr effektiv durch sogenannte Gradientenverfahren erfolgen. Dabei wird anhand der Ableitung (Anstieg) der Funktion die Lage des Extremwertes (Anstieg=0) in einem iterativen Verfahren bestimmt. Enthält die Funktion mehrere lokale Extremwerte, führt das Gradientenverfahren jedoch nicht zwangsweise zu dem globalem Mini-, bzw. Maximum.

Zur Optimierung solch komplexeren Systemen mit mehreren lokalen Extremwerten, eignen sich vor allem Verfahren welche auf evolutionären Algorithmen basieren. Diese Art der Optimierungsalgorithmen orientiert sich an den Vorgängen der natürlichen Evolution (Überleben der Besten). Hierbei wird davon ausgegangen, dass durch die wiederholte Kombination von günstigen Parameterkombinationen abgeleitete Varianten (Nachkommen) entstehen, welche besser sind als ihre Vorgänger.

Zur Optimierung eines Systems werden aus einer Gruppe vorgegebener Kombinationen die Besten ausgewählt, neu miteinander kombiniert (gekreuzt) und leicht verändert (Mutation). Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis keine weitere Verbesserung eintritt oder ein anderes Abbruchkriterium (beispielsweise die maximale Anzahl der Iterationen) erreicht wird, siehe Bild 2.

Alternativ eignet sich ebenfalls die von der Natur inspirierte Partikelschwarmoptimierung für Verbesserung von komplexen Systemverhalten mit mehreren lokalen Extrempunkten [5].

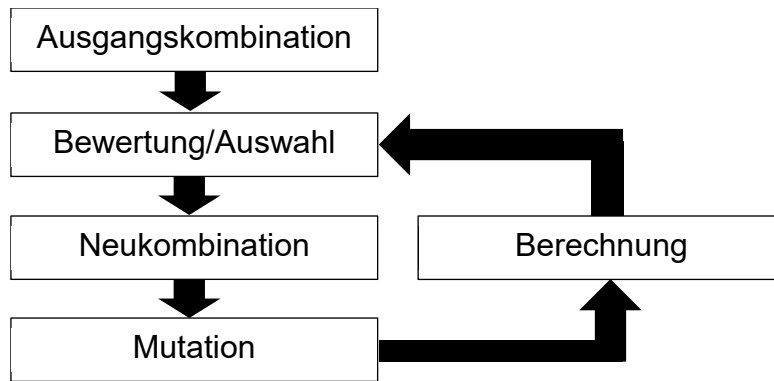


Bild 2: Prinzip der Evolutionären Algorithmen

4 Optimierung von Systemen mit mehreren Zielgrößen

Während bei der Optimierung einer Zielgröße die Lösung in einem vorgegebenen Designraum meist eindeutig ist, ist die Suche nach dem Optimum bei mehreren Zielgrößen deutlich schwieriger, vor allem wenn sich die Zielgrößen widersprechen. Werden die Funktionen Zusammenhänge zwischen zwei gegenläufigen Zielfunktionen in einem Diagramm dargestellt, lässt sich hieraus das Pareto-Optimum ableiten. Das Pareto-Optimum (auch Pareto-Front) entspricht dem Zustand, an dem eine weitere Verbesserung einer Zielgröße zur Verschlechterung einer anderen Zielgröße führt, siehe Bild 3.

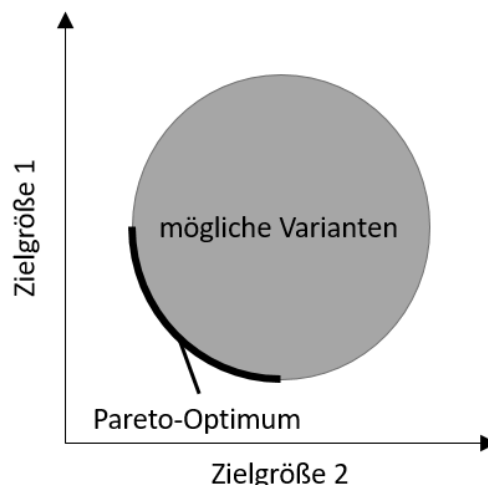


Bild 3: grafische Darstellung Pareto-Optimum

Prinzipiell stellen alle Varianten entlang der Pareto-Front ein Optimum dar. Für den Konstrukteur stellt sich allerdings die Frage welche Variante die bestmögliche Option für den konkreten Anwendungsfall darstellt.

Diese Frage zu beantworten ist nicht trivial und hängt sehr stark von den Randbedingungen und der Bedeutung der einzelnen Faktoren ab. Bei mehreren Zielgrößen ist es numerisch vorteilhafter diese so zu normieren, dass das bestmögliche Ergebnis in dem vorgegebenen Designraum den Wert eins (1) aufweist. Hierzu ist auf Basis eines geeigneten Metamodells zunächst der bestmögliche Wert ohne Berücksichtigung der anderen Zielgrößen zu ermitteln und zu normieren. Anschließend sind diese entsprechend ihrer Bedeutung zu gewichten. Die Bedeutung bzw. Wertigkeit der einzelnen Zielgrößen ist vom Konstrukteur festzulegen, wobei darauf zu achten ist, dass die Summe der Wichtungsfaktoren eins (1) beträgt. Durch die Wichtung der einzelnen Zielgrößen wird die Lage des Optimums auf der Pareto-Front zugunsten der bevorzugten Zielgröße verschoben.

Anschließend ist auf Basis der normierten und gewichteten Zielgrößen das Gesamtsystem zu optimieren.

5 Beispiel einer normierten Mehrzieloptimierung

Im konkreten Beispiel ist ein druckbelastetes, rechteckiges Stahlgehäuse mit verschraubten Deckel so zu optimieren, dass dessen Gesamtgewicht und gleichzeitig das Innenvolumen ein Minimum erreicht, wobei die mechanischen Spannungen (Vergleichsspannung nach Mises) der Gehäusestruktur 600 N/mm^2 nicht überschreiten dürfen. Das Gehäuse ist in Bild 4 dargestellt.

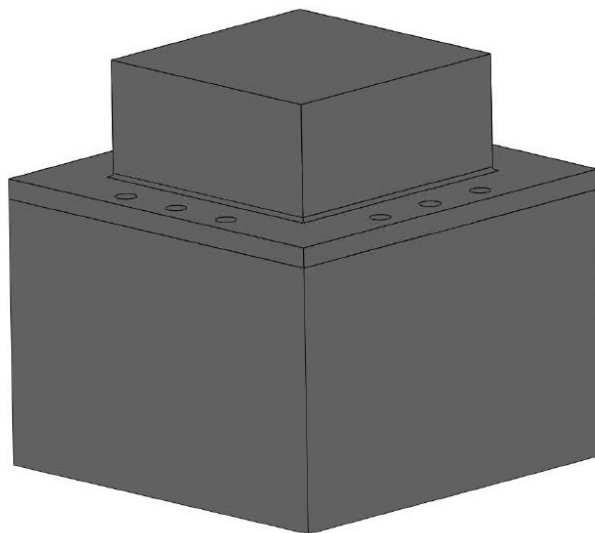


Bild 4: Modell des zu Optimierenden Druckgehäuses

Die Gehäusegestalt wird über sieben Parameter definiert, deren optimale Kombination zu ermitteln ist.

Hierfür wird im ersten Schritt ein Metamodell erstellt, welches das Systemverhalten abbildet. Das auf der Basis von 300 Stützpunkten berechnete Metamodell erreicht einen CoP von 0,99 (für das Gehäusegewicht), beziehungsweise 0,96 (für das Innenvolumen), womit es für die weitere Optimierung hinreichend genau ist.

Dem gegenüber ist das Metamodell für die maximale Vergleichsspannung mit einem CoP von 0,59 für eine Optimierung zu ungenau. Aus diesem Grund wird die mechanische Spannung nicht global für das ganze Modell global abgebildet, sondern getrennt in einzelnen Teilbereichen, woraus sich deutlich bessere CoP und damit auch genauere Vorhersagewerte ergeben.

Auf Basis der berechneten Metamodelle werden im zweiten Schritt jeweils das minimale Gewicht und das minimale Innenvolumen unter Berücksichtigung der zulässigen Spannungen mit Hilfe eines Gradientenverfahrens berechnet und die Werte auf den Wert eins (1) normiert. Entsprechend der Bedeutung der einzelnen Zielfunktionen sind diese zu gewichten. Für den konkreten Fall wird das Gewicht mit dem Faktor 0,75 und das Innenvolumen mit dem Faktor 0,25 gewichtet.

Im letzten Optimierungsschritt werden die optimalen Gehäuseabmessungen unter Berücksichtigung der genormten und gewichteten Zielgrößen mit Hilfe eines evolutionären Algorithmus berechnet. Die sich hierbei ergebende Pareto-Front ist in Bild 7 und die Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse der einzelnen Teilschritte in Tabelle 1 dargestellt.

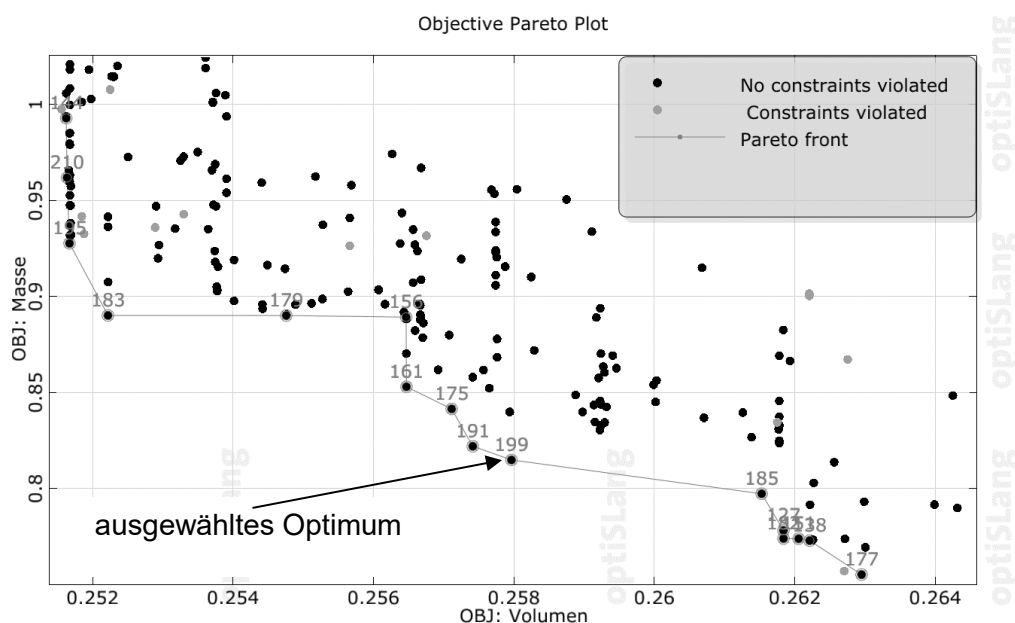


Bild 7: Pareto-Front für das ausgewählte Beispiel

Tabelle 1: Ergebnisse der einzelnen Optimierungsschritte

Varianten	1	2	3	4
			Minimales Gewicht bei minimalen Innenvolumen	
			ohne Normierung und Wichtung	Normiert und Gewichtet
Gesamtgewicht	2,55 kg	3,54 kg	2,97 kg	2,71 kg
Innenvolumen	6,52 Liter	6,05 Liter	6,37 Liter	6,29 Liter

Ein Vergleich der in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse für die einzelnen Optimierungsschritte zeigt deutlich, dass durch die Normierung und Wichtung der Zielfunktionen das ermittelte Optimum zu Gunsten der höherwertigen Zielfunktion (Gehäusemasse) verschoben wird.

6 Zusammenfassung

Im Beitrag konnte der Ablauf einer Mehrzieloptimierung mit sich widersprechenden Zielfunktionen aufgezeigt werden. Hierfür wurde aufgrund der geringeren Rechendauer Metamodellen zur Beschreibung der Systemeigenschaften verwendet. Die sich widersprechenden Zielfunktionen führen zu eine Vielzahl von optimalen Varianten, welche eine Pareto-Front bilden. Durch die Normierung und Wichtung der Zielfunktionen lässt sich aus dieser Summe der optimalen Variante das beste Ergebnis für den konkreten Anwendungsfall herausfiltern.

Literatur

- [1] Ehrlich, K.; Rohn, J.A., Cost justification of usability engineering: A vendor's perspective. In R. G. Bias and D.J. Mayhew (Herausg.), Cost-Justifying Usability, Boston: Academic Press, 1994
- [2] Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. 2. Auflage Berlin, Heidelberg: Springer, 2013
- [3] Harzheim, L.: Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel 2014
- [4] Dynardo GmbH: Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis, 2014
- [5] Röber, Marcel: Multikriterielle Optimierungsverfahren für rechenzeitintensive technische Aufgabenstellungen, Diplomarbeit Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Mathematik 2010

Wissensbasierter Ansatz zur Klassifizierung im Anlagenbau

Dmytro Adamenko, Yousef Hooshmand, Steffen Kunnen, Peter Köhler

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

Email: dmytro.adamenko@uni-due.de; Internet: <https://www.uni-due.de/cae/>

Inhalt: *Durch die stetige Weiterentwicklung der Anforderungen an Bauteile und Komponenten steigt deren Komplexitätsgrad immer weiter an. Im Großanlagenbau, in dem der größte Umsatzanteil nicht in der Projekt-, sondern in der Servicephase erzielt wird, bedeutet dies höhere Risiken und ggf. eine geringere Gewinnspanne. Für eine langfristig positive Umsatzentwicklung eines Unternehmens ist dies durch strukturierte und zielgerichtete Engineering- und Planungsprozesse abzusichern. Durch die Vielzahl von Komponenten ist eine eindeutige Definition aller Einzelteile und Baugruppen erforderlich. Dafür müssen diese vom Planer oder Unternehmen nach ausgewählten Merkmalen klassifiziert werden. Diese Merkmale müssen alle möglichen Sichten innerhalb eines Unternehmens, z.B. von der Konstruktion, Einkauf und Dokumentation, auf das Modell abbilden. Im folgenden Beitrag werden einige Klassifizierungsansätze und -Vorgehensweisen analysiert, miteinander verglichen und ein neuer Klassifizierungsansatz vorgestellt.*

Abstract: *Due to continuous development of the requirements to the parts and components, their complexity grade rises respectively. In the plant construction the big share of revenue is normally achieved not during the project-phase, but during the service of the plant, which leads to higher risks and possibly lower margin. A positive long-term revenue development must be secured by means of structured and target-oriented engineering and planning processes. Due to the large amount of components is the distinct identification essential, so they must be classified after the certain attributes. These attributes must represent all the possible views, such as design, purchasing, documentation etc. in the organization on the component. In this approach some of the classification methods will be analysed and compared and a new approach will be presented.*

Stichwörter: objektorientierte Klassifizierung, Anlagenplanung, eCI@ss

Keywords: object-oriented classification, plant construction, eCI@ss

1 Einleitung

Die stetig steigende Komplexität von modernen Anlagen und Systemen findet ihre Abbildung in mehreren Engineering-Phasen und stellt viele Aufgaben dar. Mit dem Anfang eines Projektes im Anlagenbau beginnt die Verknüpfung von verschiedenen Engineering-Prozessen zu einem durchgehend vernetzten System, dessen Struktur, Vielschichtigkeit und Dynamik von der Planungsphase bis zur Stilllegung und Rückbau der Anlage bestehen bleibt. Genügt die erbrachte Leistung im Vorfeld nicht dem Anspruch des Projektes, können die Folgen noch lange nach der Inbetriebnahme spürbar sein und ihre kostspieligen

Auswirkungen zeigen. Ein großes Problem war und bleibt die schnelle, eindeutige und zuverlässige Identifikation von Komponenten und Einzelteilen in der Anlage und im Lieferportfolio und Bestand des Unternehmens. Bereits in der Planungsphase fordert die Suche nach der am besten geeigneten Komponente ein großes Know-How und Erfahrung des Planers und diese Auswahl prägt die weiteren Engineering-Phasen und ist ein maßgeblicher Kosten- und Zeitfaktor für den Verwaltungsaufwand von Komponentendaten.

Nach der Planungs- und Entwicklungsphase muss das Produkt korrekt in einem Datenmanagement-System verwaltet werden um die Entstehung von Redundanzen und Inkonsistenzen in den Produktdatensätzen zu vermeiden. Durch die gescheite Festlegung und Auswertung von Attributen ist auch einfaches Teilfamilienmanagement sowie die klare Abbildung von Produktstrukturen möglich. [1]

Während ihrer Lebensphasen werden Produkte neben ihrer individuellen Neu- und Umgestaltung oftmals zwecks der Steigerung der Produktvielfalt oder Modernisierung auch neu angeordnet. Deswegen spielt es bei der Verwaltung sowohl des eigenen als auch gekauften Produkt- und Leistungsspektrums eine große Rolle, diese für die internen Abläufe in einer einheitlichen Struktur aufzubauen und die eindeutige Identität jeder einzelnen Komponente durch ihre Merkmale zu sichern. Die dadurch erzielte Vermeidung mehrerer unnötigen Varianten einer Komponente trägt einer erheblichen Kostenersparnis bei. So kann beispielsweise in der Instandhaltung durch fehlerhafte und unvollständige Datensätze das Reserveteilmanagement erheblich erschwert werden. Dieses Problem kann insbesondere bei der unternehmensübergreifenden Kommunikation vorkommen, wenn das selbe Bauteil Bestandteil der Lieferungen mehrerer Lieferanten ist und dementsprechend unterschiedlich benannt und bezeichnet sein könnte. Nicht eindeutige und fehlende Informationen sowie Dubletten und Datenrelikte in den Produktdatensätzen können zu Verzögerungen im Betriebsablauf, Qualitätsmängel und zur Entstehung vermeidbarer Kosten führen. [2]

Um eine ordentliche Produktdatenstruktur zu gewährleisten und einen reibungslosen Arbeitsablauf über die gesamte Projektzeit zu ermöglichen, müssen während der Planung korrekte Projekt- und davon abhängige Produktdaten in die bestehende Struktur einspeisen, um mit den Folgeprozessen des Einkaufs, der Fertigung, Montage, Inbetriebnahme und dem Service zu harmonisieren. Eine effiziente Struktur kann dabei innerhalb der Datensätze durch eine Klassifizierung aller Komponenten und Dienstleistungen erreicht werden. Zur Lösung der Problemstellung einer unternehmens- und branchenübergreifenden

Standardisierung von Produkt- und Dienstleistungsklassifikationen wurden neben den von den Industrieunternehmen selbst entwickelten Klassifizierungssystemen bereits verschiedene universelle Klassifikationsstandards entwickelt.

2 Klassifizierung und Klassifikationsstandards

Als Klassifizierung ist eine Ordnung von Produkten und Dienstleistungen nach definierten Merkmalen verstanden. Durch die Klassifizierung werden die ausgewählten Eigenschaften eines Komponenten oder Dienstleistung aus Sichten mehrerer Abteilungen in einem Unternehmen beschrieben. Durch die Klassifizierung wird die Eignung der Komponenten nach bestimmten Eigenschaften festgelegt, allerdings nicht ihre Identität. [3]

Durch eine Klassifikation aller Produktdaten gelingt es innerhalb großer Datenmengen Ordnung zu schaffen und diese über einen langen Zeitraum zu erhalten, um die Daten jederzeit zu erreichen und produktiv nutzen zu können. Das Ziel einer Klassifikation besteht in der systematischen Anordnung von Informationen, um diese jederzeit wiederfinden zu können und sie gegebenenfalls mit anderen Informationen zu vergleichen und als Grundlage oder Referenz für neue Objekte zu nutzen. Klassifizierung ist zwingend erforderlich, um die Objekte in vordefinierte Gruppen und Klassen einzuordnen. Es ist anzustreben, dass die Gegenstände und Dienstleistungen eindeutig nur einer Klasse zugeordnet werden. Dafür werden in der Industrie unternehmensinterne und unternehmensübergreifende Klassifizierungssysteme entwickelt. [4]

Eines der grundlegenden Merkmale eines Klassifikationssystems ist die Art und Weise, wie seine Struktur aufgebaut ist und in welcher Beziehung zueinander sich daraus die enthaltenen Informationen ergeben. Ein bereits erfolgreich funktionierendes und etabliertes Klassifikationssystem weist eine erhöhte Kompatibilität im Arbeitsfluss zwischen einzelnen Abteilungen und Unternehmen auf und führt somit letztendlich zu Zeit- und Kosteneinsparungen. Wenn man aber vor der Entscheidung steht, ein anderes Klassifikationssystem in der Unternehmensstruktur einzugliedern, bzw. einen alten Standard zu modernisieren, rücken die damit verbundenen Entwicklungs- und Einführungskosten in den Mittelpunkt der entscheidenden Faktoren vor. In der Industrie wird der Vorteil eines starken Klassifikationssystems und -standards oft zu Gunsten kurzfristiger Einsparungen vernachlässigt. [4]

In einem Klassifikationssystem werden aus Merkmalausprägungen verschiedener Objekte gemeinsame logische Eigenschaften bestimmt. Die Auswahl dieser Eigenschaften legt somit das Kriterium für die Zuordnung eines Objektes zu einer Klasse fest und definiert dabei die Regeln, nach denen ein Klassifikationssystem durch Klassen errichtet und verwendet wird. Diese Merkmale werden zum Merkmalpool gezählt und können zur Erstellung von Sachmerkmalleisten genutzt werden, welche Merkmale zur Beschreibung einer Klasse Objekte versammelt. Mit Hilfe von Sachmerkmalen kann ein Objekt unabhängig von dessen Umfeld verwendet werden. Jedes eingeordnete Objekt besitzt eine endliche Anzahl von Merkmalen, welche nach DIN 4000 als „Eigenschaft, die zum Beschreiben und Unterscheiden von Gegenständen dient“ definiert wird. Die Ausprägung eines Merkmales stellt dessen konkreten Wert dar. Die Gliederung der Merkmale nach ihrer Bedeutung enthält neben Sachmerkmalen die Relationsmerkmale (Beziehungsmerkmale), die die Beziehungen von Gegenständen zu ihrem Umfeld kennzeichnen. [5]

In diesem Beitrag wird die Klassifizierung einer Komponente nach dem eCl@ss-System und nach Sachmerkmalleisten nach DIN 4000 dargestellt. Zunächst wird ein Aufbau des eCl@ss-Standards erläutert.

2.1 eCl@ss Klassifikationsstandard

Der eCl@ss e. V. wurde im Jahre 2000 gegründet und entwickelt seitdem einen Klassifikationsstandard zur hersteller- und lieferantenneutralen Klassifizierung aller am Markt verfügbaren Güter. Die Verwendung von dem standardisierten Merkmalpool stellt ein Schlüsselement zur internationalen und branchenübergreifenden Kommunikation über eCl@ss dar. Die Klassenhierarchie im eCl@ss-Standard besteht aus vier Stufen in folgender Reihenfolge von generisch bis spezifisch:

Sachgebiet – Hauptgruppe – Gruppe – Untergruppe

Dabei stellt das Sachgebiet die allgemeinste Klasse in der eCl@ss Klassifikation dar und wird nach unterschiedlichen Branchen und Märkten unterschieden. Die Hauptgruppen und Gruppen werden von den Herausgebern nicht weiter definiert als Klassen zur weiteren Aufspaltung in der Klassifikationsstruktur. Die endgültige Einordnung eines Produktes findet nur auf der letzten Ebene statt.

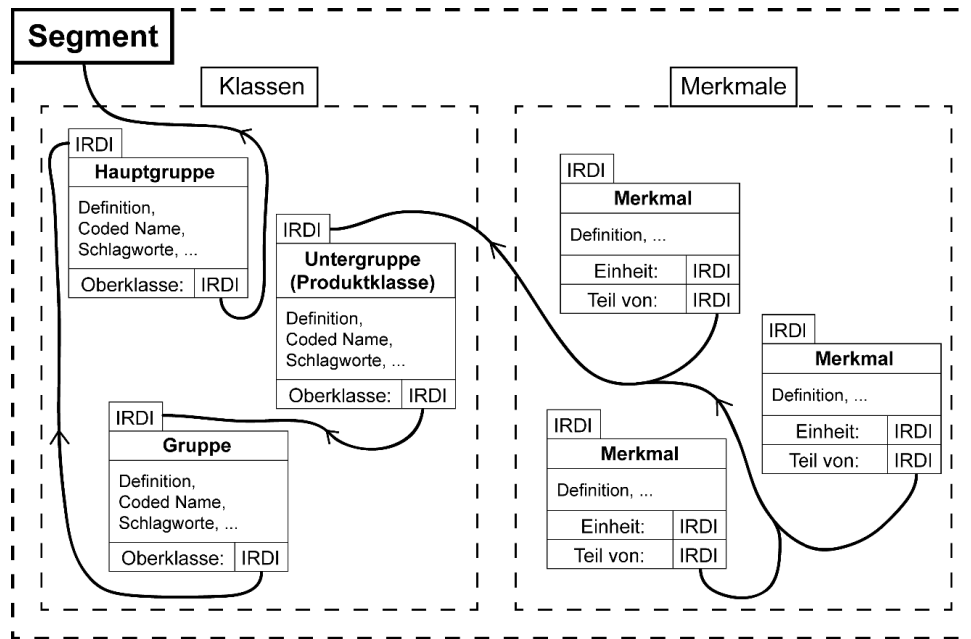


Bild 1: Aufbau von Merkmalen und Klassen im eCI@ss

Jeder Knotenpunkt enthält mindestens einen repräsentativen Namen, eine achtstellige Kennzeichnung der Klassifikationsebene (Coded Name) und einen einzigartigen Identifizierungsschlüssel (IRDI). Um eine Komponente bei Suchanfragen besser finden zu können, beinhaltet diese neben ihrem eigentlichen Namen zusätzlich synonyme Schlagworte, welche das Objekt u.a. auch durch eine Definition wiedergeben.

2.2 DIN 4000

Die Sachmerkmalen der Normenreihe DIN 4000 umfassen zum heutigen Zeitpunkt über 90 gültige Datensätze zur Beschreibung und Identifizierung von bestimmten Produktgruppen nach charakteristischen Merkmalen. Im Vergleich zum eCI@ss Klassifikationsstandard, folgen die verschiedenen Merkmalen der DIN 4000 über die Reichweite einer einzelnen Produktgruppe hinaus keiner festen Systematik eines ganzheitlichen Klassifikationssystems. Zudem werden die verschiedenen Produktgruppen zwar aus konstruktionstechnischer Sichtweise sehr präzise durch standardisierte Merkmale abgebildet, jedoch beschränken sich diese Sachmerkmalen überwiegend nur auf genormte Standardbauteile und -Werkzeuge.

Industrieunternehmen haben in der Regel ein selbständig entwickeltes Klassifizierungssystem. Im Folgenden werden die Klassifizierungsmöglichkeiten der gleichen Bauteile mit jeweils eCI@ss und nach DIN 4000 klassifiziert. Damit die betrachteten Klassifikationssysteme hinsichtlich der Beschreibung und der eindeutigen Möglichkeit der

Zuordnung von Objekten verglichen werden können, wird ein Differenzdruckmanometer als Referenzobjekt mit vielschichtigen Spezifikationen betrachtet.

3 Klassifizierung des Beispielteils

In der eCl@ss-Struktur befindet sich das „Differenzdruckmanometer“ an der Position 27-20-06-03 und wird vielseitig durch Merkmale beschrieben.

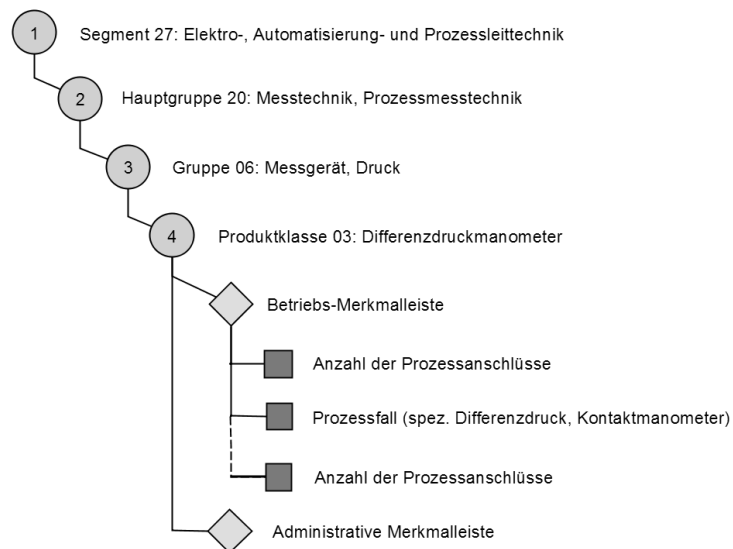


Bild 2: Klassifizierung des Differenzdruckmanometers nach eCl@ss-Standard

Bei der Auswahl eines Differenzdruckmessgerätes sind bspw. Einsatzbedingungen wie der Druckbereich und das Kontaktmedium sowie Spezifikationen wie die Bauform und der Signaltyp zu beachten. Die in der Basic Version von eCl@ss hinterlegten Merkmale können das Instrument nicht vollständig aus Sicht des Unternehmens beschreiben und definieren. Am Beispiel des Differenzdruckmanometers ist ersichtlich, dass für dieses Instrument bei eCl@ss die bereits erwähnten Beziehungsmerkmale und sowohl für Planer als auch für Einkauf relevanten Merkmale nicht vorgesehen werden. Nach der groben Anlagenplanung sind solche Prozessparameter wie maximale Drücke, Leitungsgröße bzw. Werkstoffe und Anschlussmöglichkeiten bereits definiert. Ein ausschließlich nach Basic-Version von eCl@ss klassifiziertes Differenzdruckkontaktmanometer wäre im PDM-System sehr schwer zu finden und wieder zu verwenden. Solche Merkmale wie die Anschlüsse von Prozessleitungen an das Instrument, Werkstoff, Arte des Messgliedes, Gehäusemaße, Druckbereiche, elektrische Anschlüsse und Signalarten sind unter den vordefinierten Merkmalen nicht zu finden und müssen ggf. vom Unternehmen definiert und festgelegt werden. Die Basic eCl@ss bietet die Möglichkeit nur über Lieferantenproduktbezeichnung

auf die Produktmerkmale zu kommen, wobei alle relevanten Parameter und Merkmale des Instrumentes der Nomenklatur zu entnehmen sind. Da im Produktportfolio eines Unternehmens nach Kundenanforderungen die Instrumente verschiedener Hersteller in der Regel vorhanden sind, deren Nomenklatur nicht identisch aufgebaut ist und sich ändern können, ist die automatische Erfassung von Merkmalen nicht möglich. Dabei ist hervorzuheben, dass die kaufmännischen Merkmale, inklusive Zolltarifnummer und Zertifikate bzw. Zulassungen in der Basic-Version vorhanden sind.

Mit der Version Advanced sind nicht nur die Betriebsmerkmale, sondern auch die CAX-Parameter, wie Anzahl der Teilebeziehungen und Anzahl der Einbaulagen abgedeckt. Darüber hinaus ist es möglich, die Differenzdruckmanometer u.a. nach der vorhandenen Dokumentation inklusive Zertifikate und Zulassungen zu klassifizieren. Insgesamt kann eine Klassifizierung des Differenzdruckmanometers mit Advanced-Version nach über 200 Merkmalen erfolgen. Eine große Hilfe bietet eCI@ss-Advanced bei der Zuweisung von Merkmalen die Möglichkeit aus den vorgegebenen und abgespeicherten Werten auszuwählen.

Die Differenzdruckmanometer können auch nach Sachmerkmalen von DIN 4000-61 („Sachmerkmalen für Druckmessgeräte und Messgerätezubehör“) klassifiziert werden. Die Anzahl von Sachmerkmalen ist dabei gering und reicht nicht für die eindeutige und vollständige Beschreibung eines Instruments. So werden Druckmessgeräte jeder Art mit Hilfe einer Sachmerkmalenliste. Die in der DIN 4000-61 vorhandenen Sachmerkmale decken fast ausschließlich die Klassifizierung des Instrumentes aus Sicht des Planers ab. Es werden nicht nur Abmessungen und Form, sondern auch die Schnittstellen zu den anderen Komponenten durch die Angabe von der Anzahl und Art von elektrischen Kontakten und Prozessanschlüssen definiert. Aus Sicht des Planers sollten ggf. die Zulassungen bzw. Zertifizierungen des Instrumentes ergänzt werden. Aus kaufmännischer Sicht, kann die Klassifikation des Differenzdruckmanometers nach der in den DIN 4000-61 vorhandenen Sachmerkmalenliste nicht komplett sein.

Es lässt sich zwar aus den vorhandenen Merkmalen eine Bezeichnung nach der Nomenklatur des jeweiligen Herstellers ableiten, ist allerdings sehr zeitaufwendig und fehleranfällig für die Einkäufer, diese zusammenzustellen.

Im Fallbeispiel Differenzdruckmanometer würde eine Kombination aus Merkmalpools aus DIN 4000-61 und der Basic-Version des eCI@ss-Standards eine geeignete und nahezu komplette Klassifizierungsgrundlage für ein Differenzdruckmanometer aus Sicht eines Unternehmens darstellen. Die Nutzung des in der Advanced-Version aufgeführten

Merkmalpools nicht nur beschreibt vollständig das Instrument aus allen möglichen Sichten, inklusive Planung, Konstruktion, Einkauf, Vertrieb und Berechnung, sondern bietet auch die Möglichkeiten zur Einbindung des Instrumentes in ein System durch die Angabe von sog. Funktionsgruppen (Bauteile und Baugruppen, die in direkter Verbindung mit dem Differenzdruckmanometer stehen, wobei die auch Klassifizierung nach der Verbindungsart erfolgen kann). Des Weiteren ist für eine wissensbasierte und durchgängige Anlagenplanung von großer Bedeutung, das Instrument in der Anlage eindeutig identifizieren zu können. Dafür sind in der Leiste „Apparatekennung“ solche Merkmale wie „Kennzeichnung des zugehörigen Apparates“ und „Beschreibung des Einsatzes“ sowie ein Bezug auf Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema vorhanden.

4 Einbindung wissensbasierter Klassifizierung

Bei der Untersuchung des eCI@ss-Klassifizierungsstandards sind einige Problemfelder aufgefallen. Als erstes werden einige identische Komponenten in vollkommen unterschiedlichen Klassen auffindbar und stellen für Industrieunternehmen ein Problem dar, denn das gesamte Portfolio und Komponentenbestand muss nur einmal im PDM-System vorhanden sein. So bei der Suche nach einem Absperrventil im eCI@ss kommt man auf zwei Ergebnisse, die nach Bezeichnung identisch sind. Ein Absperrventil mit IRDI „0173-1#Z3-AMO479#001“ befindet sich in der Klasse „27 – Elektro-, Automatisierungs- und Prozessleittechnik“ in der Hauptgruppe „Hydraulik“. Einen anderen, vom Namen identischen Absperrventil mit IRDI „0173-1#Z3-AMN330#001“ findet man in der Klasse „37 – Rohrleitungstechnik“ in der Hauptgruppe „Armatur aus Metall oder Kunststoff“ (s. Bild 3).



Bild 3: Möglichkeiten zur Klassifizierung eines Absperrventils mit eCI@ss

Die Merkmale der beiden Komponenten sind nicht identisch, wobei das Absperrventil aus der Klasse „Rohrleitungstechnik“ viel mehr vordefinierte Merkmale besitzt. Dabei sind nicht nur Betriebsmerkmale, sondern auch die kommerziellen, administrativen sowie Merkmale zur Identifikation der Armatur in der Anlage bereits vorhanden. Im Gegensatz dazu, sind für das Ventil aus der Klasse 27 nur die kommerziellen Merkmale eingepflegt, wobei die IRDI-Nummer von diesen Merkmalen mit denen vom Absperrventil aus der Klasse 27 identisch sind. In diesem Fall kann gleiche Komponente in zwei verschiedenen Klassen eingepflegt werden kann und dementsprechend kann die Klassifizierung eines gleichen Bauteils bei verschiedenen Lieferanten komplett anders sein. Es ist durchaus denkbar, dass, wenn das Unternehmen ihr gesamtes oder Großteile ihres Portfolios nach einer Klasse klassifiziert, die andere nicht berücksichtigt werden kann. Das könnte zur Doppellagerführung und dementsprechend zur Entstehung vermeidbarer Kosten führen. Um solche Dubletten im zu vermeiden soll ein gründliches segmentübergreifendes Mapping durchgeführt werden.

Als nächstes Problemfeld ist die fehlende Vererbung von den Merkmalen hervorzuheben. Des Weiteren kommen gleiche Merkmale (wie beispielsweise „Außendurchmesser“) mehrmals unter unterschiedlichen IRDI's im bereitgestellten Merkmalpool vor. Im Moment wird eine Komponente in der untersten, der 4. Ebene, vollständig klassifiziert, die oberen drei besitzen keine Merkmale. Eine mögliche Lösung ist eine Vererbung von Merkmalen von den unteren Klassifizierungsgruppen. Bei diesem Ansatz wäre es möglich den höheren Ebenen (1., 2., und 3.) die Funktions- oder allgemeinen Merkmale zuzuweisen, wofür ein neuer Merkmalpool definiert werden muss. So kann beispielsweise jeder klassifizierten Komponente aus dem Segment 26 „Rohrleitungstechnik“ ein Merkmal „Lieferant“ zugewiesen werden. Dieses Merkmal kommt dann automatisch in dem Merkmalpool jeder Komponente aus dem erwähnten Segment vor. Des Weiteren kann jeder Komponente der Hauptgruppe 41 („Pumpe“) ein Merkmal „Hersteller“ zugewiesen werden, in dem das Merkmal auf 2. Ebene gesetzt wird. Durch Zuweisung der 3. Ebene, der Gruppe 01 („Kreiselpumpe“) des Merkmals „max. Förderstrom“ bekommen alle Komponenten dieser Gruppe automatisch ein für sie gültiges und immer bedeutendes Merkmal in ihrem Merkmalpool. Die feinere Auswahl der Merkmale erfolgt in der letzten 4. Ebene aus den bereits von eCI@ss zur Verfügung gestellten Merkmalen. (s. Bild 4)

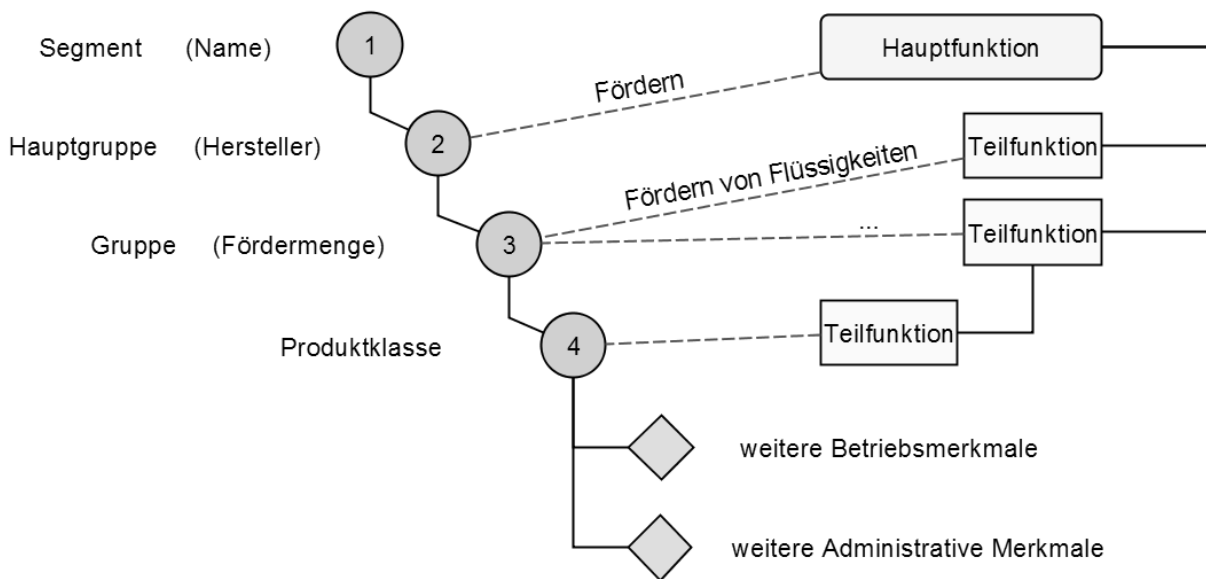


Bild 4: Verknüpfung von Funktionsstruktur mit den Klassifizierungsebenen.

Abschließendes Problemfeld ist die fehlende Funktionsverknüpfung durch Merkmale oder Funktionsstruktur. Bei der Planung einer Anlage wird ihre Gesamtfunktion in der Regel in mehrere Teilfunktionen zerlegt, die anschließend in eine sogenannte Funktionsstruktur überführt werden. Um die Hauptfunktion der Anlage zu erfüllen, müssen auch die Teilfunktionen erfüllt werden. Bei der Suche nach dem am besten geeigneten Bauteil oder Komponente, ist bis jetzt kaum bis keine Möglichkeit angeboten, nach den zu erfüllenden Aufgaben und möglichen Funktionen eine Suche durchzuführen. Dafür ist die Einbindung von Funktionsmerkmalen, abgeleitet von der Funktionsstruktur notwendig. Bei diesem Ansatz könnte eine Pumpe aus Segment 36, Hauptgruppe 41 entsprechend der Funktionsstruktur das Funktionsmerkmal „Fördern“ erhalten. Auf der Gruppenebene kann der Pumpe eine genauer definierte Funktion „Fördern von Gasen“ oder „Fördern von Flüssigkeiten“ zugewiesen werden. Dabei ist anzustreben, dass die höchstmöglichen Ebenen mit Merkmalen vorgesehen werden. Darüber hinaus wäre eine Erstellung einer neuen „Dimension“, in der die Funktionen einer zu klassifizierenden Komponente aufgelistet werden, denkbar. Dabei sollten die Funktionen vorher definiert und dem Benutzer zur Auswahl bereitgestellt werden um die möglichen Synonyme und damit nicht eindeutige Klassifizierung einer gleichen Funktion einer identischen Komponente von verschiedenen Unternehmen und Benutzern zu vermeiden. (s. Bild 4)

Der Einsatz von beiden Ansätzen gleichzeitig ist auch denkbar, da diese auf parallelen Schienen existieren und somit der kompletten Abbildung von Funktionsstruktur durch Funktionsmerkmalen dienen können (s. Bild 4). Diese Lösungen wären hilfreich, um alle

Komponenten, die für die Erfüllung gleicher Funktion benutzt werden können, aber andere Bezeichnungen haben oder in unterschiedliche Klassen unterordnet sind, zu klassifizieren und einfacher finden zu können. Dadurch sinkt die Anzahl der zu pflegenden Stammsätze und damit verbundene Kosten.

5 Zusammenfassung

Die Normenreihe 4000 bietet zum Teil keine geeignete Grundlage mehr, was die bereits stark zunehmende Digitalisierung industrieller Standards betrifft. Die nötigen Voraussetzungen für den automatisierten und standardisierten Produktdatenaustausch werden durch die datentechnischen Begrenzungen dieses Systems nicht erfüllt.

Im Rahmen dieses Beitrags wurde untersucht, in wie weit es möglich ist, die im Anlagenbau gängigen Komponenten wie Differenzdruckmanometer und Vorschweißflansch nach zwei unterschiedlichen Standards zu klassifizieren. Der untersuchte eCI@ss-Standard bietet eine umfassende und durchdachte Grundlage zur Klassifizierung sowohl innerhalb eines Unternehmens, als auch auf den unternehmens- und branchenübergreifenden Ebenen.

Die Phasen des Pre- und Basic-Engineerings scheinen großes Potential für die Verwendung der meisten Merkmale zu bieten, wenn es um die Leistungskennzahlen, Stammdaten und Informationen logistischer Art geht. Der Anteil fehlerhafter Merkmale und eindeutiger Fehlzusweisungen im untersuchten Inhalt von eCI@ss ist gering. Im Bereich von Detail-Engineering ist es denkbar und anzustreben die Merkmale einer Komponente von einem Systemmodell abzuleiten. Durch die Systemanforderungen gesteuert, können die ersten Berechnungen und Auslegungen durchgeführt werden. Davon werden die Größen und Betriebsdaten aller Komponenten abgeleitet. Mittlerweile sind bereits die Kennzeichnung eines Behälters und Stützens sowie der Bezug auf ein konkretes Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema möglich. Denkbar wäre auch die Einführung von Relationsmerkmalen, die dann die Beziehungen zu den Gegenständen in dem Umfeld der Komponente kennzeichnen würden. Im Beitrag wurden auch die Möglichkeiten der Addition von Funktionsmerkmalen zu den bestehenden Merkmalpools vorgestellt und diskutiert. Nach dem Aufbau eines Systemmodells könnten somit die Schnittstellen zwischen den Komponenten, sowie die Einzelfunktionen einfacher überprüft und verifiziert werden.

Literatur

- [1] Köhler, Peter: Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau. 1. Aufl. Würzburg: Vogel, 2002. – ISBN 3-8023-1823-4
- [2] 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
- [3] Fischer, Jan O.: Kostenbewusstes Konstruieren: Praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess. 1. Aufl. Heidelberg: Springer, 2008. – ISBN 978-3-540-78312-1
- [4] Conrad, Klaus-Jörg: Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für Maschinenbau und die Gerontik. 6. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2013. – ISBN 978-3-446-43533-9
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung: Sachmerkmal-Listen - Teil 1: Begriffe und Grundsätze, DIN-4000-1, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Bauteilübergreifende systematische Werkstoffauswahl leichtbaugetriebener Fahrzeugstrukturen – Ein ganzheitlicher Ansatz

Jerome Kaspar^{a*}, Robin Kaiser^b, Michael Vielhaber^a

^aLehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität des Saarlandes

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

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

^bDaimler AG - Mercedes-Benz Werk Sindelfingen, D-71059 Sindelfingen

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

Inhalt: *Leistungsfähigkeit aber auch Ressourceneffizienz spielen bei der Entwicklung moderner Leichtbausysteme insbesondere im Automobilbau eine immer größere Rolle. Im Rahmen der systematischen Werkstoffauswahl richtete sich das Hauptaugenmerk in der Vergangenheit (Ashby, Farag, Wanner, etc.) allerdings stets auf die Selektion einzelner Komponenten unter zugehöriger Auslegung. Notwendige Verfahrenstechnologien, konstruktive Rahmenbedingungen sowie die Einbindung der vorliegenden Bauraumsituation (Design und Package) fanden bislang lediglich eine unzureichende Betrachtung im Entscheidungsprozess. Auf Grundlage dessen – einer Einbeziehung konstruktiver wie technologischer Aspekte – widmet sich der folgende Beitrag der bauteilübergreifenden, d.h. ganzheitlich systematischen Auswahl von direkt benachbarten bzw. angrenzenden Komponenten (Fügepartnern), auch unter dem Aspekt eines notwendigen Verbindungsstellen-Designs und bietet so letztlich eine Vorgehensweise, welche über eine strikt singuläre Bauteilbetrachtung hinausgeht.*

Abstract: *A technical or rather functional performance as well as resource efficiency play an ever-increasing role in the development of modern lightweight systems, especially in automotive engineering. Thus, with respect to the framework of the systematic selection of materials, however, the main focus in the past (e.g. Ashby, Farag, Wanner) always focused on the selection of individual single components using an appropriate structural design. Necessary process technologies, constructive framework conditions as well as the integration of the present assembly space (design and package) have so far only been an insufficient consideration inside the actual decision-making process. On this basis, i.e. taking into account both constructive and technological aspects, the following contribution pursues a holistically integrated and cross-component selection of directly adjacent or adjoining components, also from the aspect of a necessary joint section design, and thus ultimately offers an approach that goes beyond a strictly singular component design.*

Stichwörter: *Werkstoffauswahl, Leichtbau, Fahrzeugstrukturbauteile, bauteilübergreifender Ansatz*

Keywords: *material selection, lightweight design, automotive structural components, cross-component*

1 Einleitung und Motivation

Die historische Analyse verschiedener Fahrzeugstrukturen zeigt, dass lange Zeit vor allem einzigartiges Expertenwissen und erfahrungsbasierte Werkstoffauswahlstrategien in der Fahrzeugentwicklung zum Einsatz kamen [1, 2]. Ein Hauptgrund hierfür waren mitunter die begrenzten technologischen Mittel angesichts hybrider Fügeverbindungen sowie den damit einhergehenden Mehrkosten im Vergleich zu einem homogenen Werkstoffeinsatz über die gesamte Karosseriestruktur. Die aktuell vorherrschende Situation zunehmend ansteigender Grenzwerte bzgl. des CO₂-Ausstoßes, bei gleichzeitigem Zuwachs der Fahrzeugmehrhalte (bspw. durch Komfort- und Sicherheitssysteme), zwingen die Hersteller zum Überdenken der bisherigen Vorgehensweise zur Werkstoffauswahl, um das Fahrzeuggewicht entscheidend zu reduzieren, Kraftstoff einzusparen und somit resultierende Strafzahlungen und Imageverluste zu vermeiden [3]. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen entwickelte sich die Multi-Material-Bauweise, welche ausgehend von den spezifischen Bauteilanforderungen, die positions- und funktionsgerechte Bestimmung des Einsatzwerkstoffes für jede einzelne Strukturkomponente vorsieht [2, 4].

Im Zusammenhang dieser dem Entwicklungsingenieur heutzutage zur Verfügung stehenden Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten, die neben konstruktionsgetriebener Maßnahmen (z.B. Topologieoptimierung) zusätzlich die Auswahl unterschiedlicher Werkstoffe als auch deren Kombination sowie die Berücksichtigung zahlreicher Verfahrenstechnologien beinhalten, richtet sich das Hauptaugenmerk trotz alledem bislang (Ashby, Farag, Wanner, etc.) überwiegend auf die Selektion einzelner Komponenten unter zugehöriger Auslegung. Ganzheitlich notwendige, integrierte Analysen einzusetzender Verfahrenstechnologien, konstruktiver Rahmenbedingungen sowie die Einbindung der vorliegenden Bauraumsituation (Design und Package) fanden bislang lediglich eine unzureichende Beachtung im Entscheidungsprozess. Hierzu konnten die Autoren bereits erste strategische Ansätze einer bauteilübergreifenden Entwicklung von Strukturbauteilen mit einheitlichen Schnittstellen unter Berücksichtigung technologischen Wechselwirkungen schaffen [5].

Auf Grundlage dieses Bedarfs – einer konsequenten Einbeziehung konstruktiver wie technologischer Aspekte – widmet sich der folgende Beitrag der bauteilübergreifenden, d.h. ganzheitlich systematischen Auswahl von direkt benachbarten bzw. angrenzenden Komponenten (Fügepartnern), auch unter dem Aspekt eines notwendigen Verbindungsstellen-Designs und bietet so letztlich eine Vorgehensweise, welche über eine singuläre Bauteilbetrachtung hinausgeht. Dazu findet aufbauend auf den Erkenntnissen der systematischen

Werkstoffauswahl einzelner Komponenten (Kapitel 2) sowie einer leichtbau- und werkstofforientierten Produktentwicklungsmethodik (LMOD) (Kapitel 3) eine Verknüpfung der Ansätze hinsichtlich einer ganzheitlichen (u.a. kosten- wie umweltgetriebenen) und „set-based“-orientierten Selektion mit Hilfe eines matrixbasierten („House of Quality“) HoQ-Ansatzes in Kapitel 4 statt. Mittels anschließender Diskussion und Ausblick (Kapitel 5) werden schlussendlich zukünftige Potenziale adressiert.

2 Systematische Werkstoffauswahl – Stand der Technik

Bedingt durch diese zuvor aufgeführten neuen Ansprüche an die Werkstoffauswahl gewinnen Ansätze zur systematischen Analyse und freien Suche, wie sie in der Literatur anhand der allgemeinen Produktentwicklung beschrieben sind (vgl. z.B. [6]), zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der unzureichenden Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Einflüsse durch vorherrschende Bauraumbeschränkungen, wie sie in der automobilen Praxis häufig auftreten, wird allerdings deren direkter Einsatz nach dem „standardisierten“, vierphasigen Vorgehen [7] – Ermittlung/Übersetzung werkstoffrelevanter Anforderungen (1), Aussonderung anhand Beschränkungen (Vorauswahl/Screening) (2), Rangordnung anhand Zielerfüllung (Feinauswahl und Bewertung) (3), Evaluierung und Validierung (4) – in der Entwicklung von Fahrzeugstrukturbauteilen verhindert. Einen ersten Lösungsansatz hierzu liefert Wanner [8], in dem er notwendige Beziehungen bereitstellt, die in der Lage sind, auf Basis mechanischer Grundgleichungen, die notwendige Wandstärke eines runden Hohlprofils bei gegebenem Last- und Bauraumanforderungsprofil ausgeben zu können. Dadurch erfolgt im Vergleich zu Ashby eine vollständig verfügbare Bauraumfüllung von außen nach innen in Abhängigkeit der vorgegebenen Festigkeits- und Steifigkeitsziele und somit eine leichtbaugerechte Gestaltung von Strukturbauteilen (allerdings nur auf Basis runder Hohlprofile), siehe Bild 1. Erste Untersuchungen zeigen jedoch, dass die vereinfachte geometrische Abbildung von Fahrzeugstrukturbauteilen, insbesondere in der frühen Phase der Entwicklung, viel mehr einem rechteckigen als einem runden Hohlprofil gleichen. Dementsprechend ist die Herleitung der mathematischen Zusammenhänge für diese Art des Bauteilquerschnitts entscheidend, um somit je nach Belastungsart (Zug, Druck, Biegung, Torsion, Knicken) die zur Funktionserfüllung notwendigen Wandstärken sowie den damit verbundenen Bauteilkosten und -gewichten zu ermitteln. Die generelle Vorgehensweise hierzu (Bild 1) liefert Kaiser [9] exemplarisch bereits für den Fall eines knickbelasteten Bauteils.

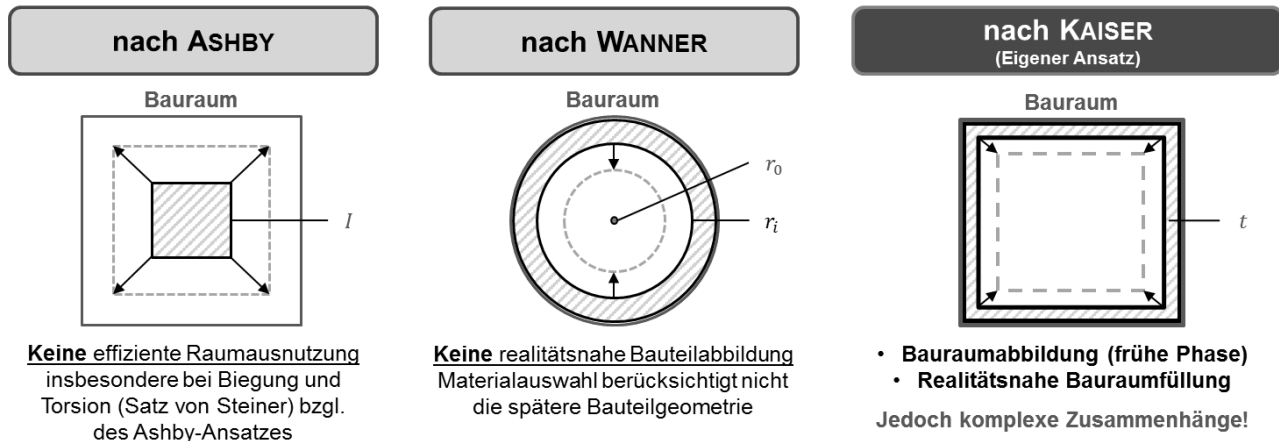


Bild 1: Vergleich verschiedener Ansätze zur geometrienahen Werkstoffauswahl im begrenzten Bauraum

Im Rahmen dieser Ausarbeitung dienen jene Ergebnisse der singulären Ermittlung des geeignetsten Werkstoffs eines Bauteils aus Sicht der Kosten und des Gewichts, auf Basis der berechneten funktionstauglichen Wandstärken, als Eingangsgrößen für die anschließende Schnittstellenbetrachtung mehrerer Bauteile, welche im Fokus dieser Ausarbeitung steht.

3 Komponentenübergreifende leichtbau- und werkstofforientierte Produktentwicklungsmethodik

In der klassischen Entwicklung von Strukturbauteilen wird oftmals zunächst die konstruktive Gestaltung in Einklang mit einer fundamentalen Werkstoffentscheidung getroffen. Anschließend und in Abhängigkeit dieser individuell optimierten Auslegung von Einzelkomponenten erfolgt schließlich erst die Wahl eines geeigneten Fügeverfahrens angesichts der grundsätzlichen Anbindungsmöglichkeit (bspw. Materialmix und Zugänglichkeit) sowie sonstiger Fragestellungen in Bezug auf Taktzeit, Stückzahl, Kosten etc. Aufgrund dieser Vorgehensweise bleiben trotz einer starken Wechselwirkung zwischen Werkstoff und Fügekonzept [5] in der Konzeptionierung von technischen Systemen die Wahl der Füge Technik ggf. mit entsprechend notwendigem Verbindungsstellen-Design und somit eine komponentenübergreifende Ausdetaillierung innerhalb traditioneller Produktentstehungsprozesse (u.a. [10]) zunächst vernachlässigt und entscheidende (Leichtbau-)potenziale so unbeachtet. Dahingehend entwickelten Kaspar et al. [11, 12] eine komponentenübergreifende leichtbau- und werkstofforientierte Entwicklungsmethodik (Bild 2), welche diese Problemstellung (zentrale Anordnung des Verbindungsstellen-Designs) fokussiert und zugleich eine integrierte Betrachtung von Produkt-Design, Werkstoffauswahl sowie zugehörigem Produktionsprozess einhergehend thematisiert [13].

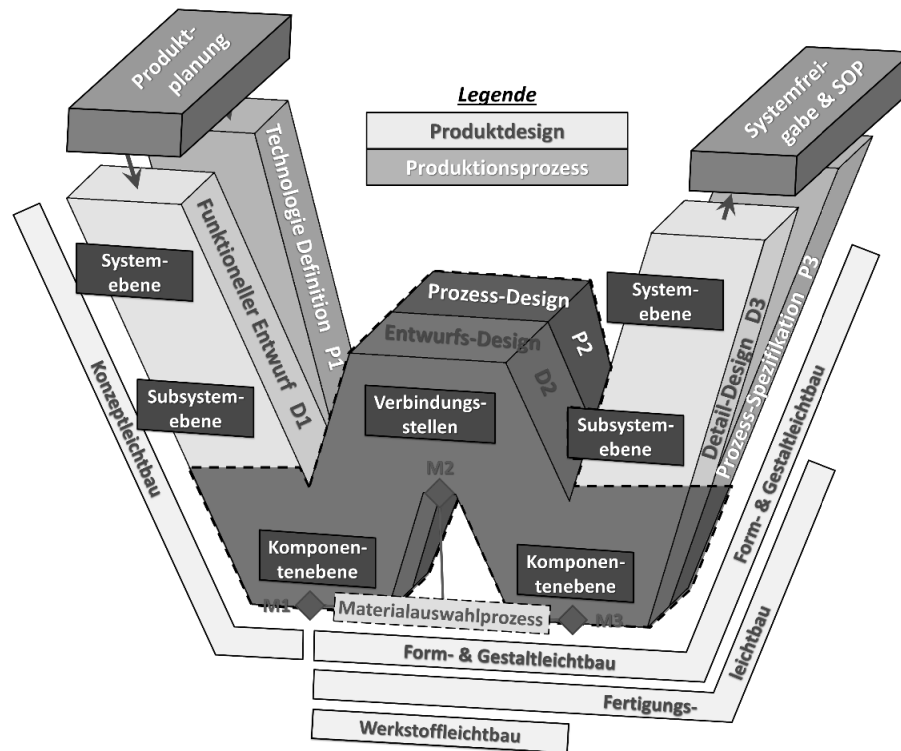


Bild 2: W-Modell der LMOD-Entwicklungsmethodik – Hervorhebung Detaillierungs-Phase

Diesbezüglich soll im Nachfolgenden näher in die Detaillierungs-Phase und dessen komponentenübergreifende Aspekte in Bezug zur ganzheitlichen Auslegung (Komponente-Fügestelle-Komponente) eingetaucht werden und so zukünftig einen systematischen Ansatz zur konstruktiv wie technologisch optimalen Systemgesamtgestaltung aufzeigen.

4 Bauteilübergreifende systematische Werkstoffauswahl

4.1 Methodisches Grundkonzept

Die systematische Vorgehensweise zur erfolgversprechendsten bauteilübergreifenden Systemgestaltung unterliegt hierbei dem methodischen Grundkonzept einer „set-based“-orientierten Selektion mit Hilfe eines dreiphasigen, mehrdimensionalen („*House of Quality*“) HoQ-Ansatzes. Dieser aus der japanischen Automobilindustrie entstammende Grundgedanke des Arbeitens mit sogenannten Lösungsmengen („*solution sets*“) anstelle einzelner Lösungen [14] vereinfacht unterdessen die bestmögliche Suche angesichts der integrierten Zusammenführung („*Concurrent Engineering*“) verschiedener Domänen (Design, Werkstoff und Prozess) und bringt folglich Vorteile bzgl. einer verzögerten Entscheidungsfindung und somit eine höhere Flexibilität insbesondere bei der stark geometrie- wie werkstoffgetriebenen Verbindungsthematik mit sich.

Bewertung von Design, Werkstoffuntergruppe und Produktionsprozess angesichts gewichtstechnischer, ökonomischer sowie ökologischer Kenngrößen statt. Einer anschließenden Schnittstellenbetrachtung liegen dann „set-based“ die besten Lösungen der zu verbindenden Komponenten(entwürfe) unabhängig von Werkstoff, Geometrie und Herstellung vor. Anhand der strukturmechanisch absteigenden Anordnung diverser, existierender Verbindungstechnologien erfolgt dann in Phase 2 „Komponentenübergreifende Schnittstellenbetrachtung“ eine prozess- und geometrierelevante Analyse und Beurteilung der anknüpfenden Komponenten. Dazu findet einerseits ein elementarer Benchmark über den jeweiligen Einsatz einer Technologie für den jeweiligen Komponentenentwurf anhand der eingehenden Rahmenbedingungen wie u.a. wirksame Beanspruchungen, generelle Werkstofffügbarkeiten und Verfahrenscharakteristiken (diskret vs. kontinuierlich) sowie weiterer technischer, ökonomischer und ökologischer Attribute statt. Andererseits, und davon separiert, ist letztlich komponentenübergreifend (oberer HoQ-Sektor) eine Beachtung der Werkstoffkombination, Schnittstellengeometrie und deren Zugängigkeit sowie physikalische Attribute (Dickenbereich, Toleranzen, etc.) aber auch die Einhaltung gewisser zu erfüllender Funktionen (u.a. wasserdicht, demontierbar) essenziell. Mit Hilfe den sich hieraus ergebenden Faktoren müssen bestimmte, zuvor als beste deklarierte Komponentenentwürfe teils stark abgewertet oder gar ganz verworfen werden, um einer (frei gewichtbaren) ökonomischen wie ökologischen Leichtbaulösung gerecht zu werden.

Unter Kenntnisnahme dieser Faktoren und entsprechender Korrektur eines zuvor vermeintlich bestmöglichen Lösungskonzeptes folgt in der „Komponentendetaillierung“ (Phase 3) letztlich eine eingehendere Bestimmung eines spezifischen Werkstoffes, Profildesigns und Prozessablaufs.

4.3 Anwendungsbeispiel – Fahrzeugvorbau

Die anfangs vorgegebene, begrenzende Hüllgeometrie, welche einem jeden Strukturbauteil zur Verfügung steht, ergibt sich unter Einhaltung der Mindestabstände zu den jeweiligen Umgebungskomponenten auf Basis einer ersten vorläufigen Bauraumaufteilung (aus Design und Package). Gemeinsam mit der zu erwartenden Belastung, welche basierend auf der jeweiligen Schnittlast vergleichbarer Vorgängerfahrzeuge abgeleitet werden kann, lassen sich die Eingangsgrößen für eine systematische Werkstoffauswahl beliebig vieler Strukturbauteile (hier: Komponente A und B) definieren, siehe Bild 4.

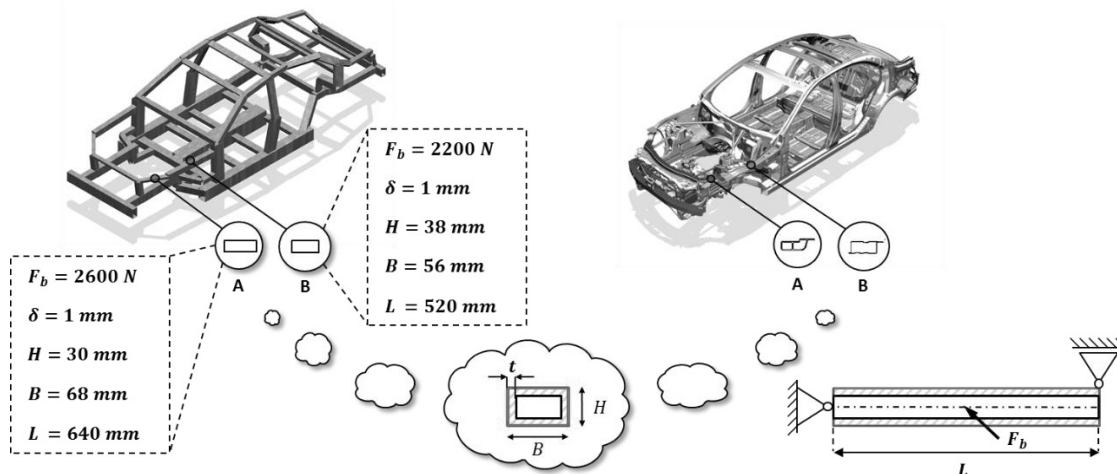


Bild 4: Vereinfachte Abbildung der Fahrzeugkarosserie in der frühen Phase der Entwicklung am Beispiel zweier verbundener Bauteile (A = Querstrebe oben, B = oberer Längsträger)

Unter der abstrahierten Annahme der in Kapitel 2 beschriebenen und hier als Vorgabe festgelegten, vereinfachten geometrischen Abbildung von Fahrzeugstrukturbauteilen mit Hilfe rechteckiger Hohlprofile, lässt sich somit für jedes Strukturbauteil das geeignetste Material aus einem beliebig großen Werkstoffpool (hier: sechs frei gewählte Werkstoffe) sowie der dazugehörigen Wandstärke bestimmen. In diesem speziellen Fall handelt es sich um zwei auf Biegung (Träger auf zwei Stützen) belastete Bauteile, welche eine bestimmt definierte Durchbiegung δ bei einer vorgegebenen Last F_b nicht überschreiten dürfen (Steifigkeitsanforderung). Die aus den mathematischen Beziehungen [15] resultierenden Ergebnisse für die Querstrebe oben (A) und den oberen Längsträger (B) lassen sich der entsprechenden Abbildung entnehmen und berücksichtigen bspw. auch eine minimale Grenzwandstärke für Stahl von 0,8 mm, welche in diesem Fall herstellungsbedingt nicht unterschritten werden darf. Mit Hilfe der Ausweisung der notwendigen Wandstärken, Kosten, Gewichte sowie vor allem die auftretenden Mehrkosten für leichtere Lösungen im Vergleich zum günstigsten Bauteilkonzept, ermöglichen eine transparente Abwägung sowie eine systematische Auswahl des Werkstoffs auf Komponentenentwurfsebene, siehe Bild 5.

Komponente A						Komponente B					
	Gewicht in kg	Kosten in €	Wandstärke in mm	LBK in €/kg			Gewicht in kg	Kosten in €	Wandstärke in mm	LBK in €/kg	
■ Aluminum, 8090-T851	0,48	5,80	1,55	18,07			0,23	2,76	0,92	7,58	
■ Aluminum, 2024-T3510/T3511	0,57	1,31	1,69	4,27			0,27	0,62	1,02	0,89	
■ Low alloy steel, AISI 5140, annealed	0,78	0,41	0,8	0,78	<i>günstigste Lösung</i>		0,60	0,32	0,8	0,35	<i>günstigste Lösung</i>
■ Low alloy steel, AISI 9310	0,78	0,85	0,8	0,79	—		0,60	0,66	0,8	0,35	—
■ Molybdenum alloy, AISI M4	0,78	5,47	0,8	0,53	—		0,61	4,25	0,8	0,33	—
■ Molybdenum alloy, AISI M1	0,77	4,00	0,8	0,76	1219		0,60	3,13	0,8	0,34	—

Grenzwandstärke unterschritten!

Grenzwandstärke unterschritten!

Bild 5: Ranking der spezifischen Werkstoffgeometrie angesichts Gewicht und Leichtbaukosten

Gekoppelt mit einer zukünftigen Betrachtung des jeweils (ökonomisch und ökologisch) optimalen Herstellungsprozesses können somit „set-based“ Lösungen der zu verbindenden Komponenten(entwürfe) in die anschließende „Komponentenübergreifende Schnittstellenbetrachtung“ einfließen. Aufgrund der mäßig kostengetriebenen Rahmenbedingungen im oberen Mittelklassen-Segment sowie reparaturtechnischen Vorgabe (Reparaturcrash von 15 ± 1 km/h) liegt an dieser Stelle eine lösbare Fügetechnik nahe. Weitere Nebenbedingungen unter gleichzeitiger Reduktion der Peripheriekosten lassen so auch angesichts der Schnittstellengeometrie das Fügekonzept eines verschraubten Montagebauteils attraktiv erscheinen und eine entsprechend weitere Ausdetaillierung (Phase 3) auf Grundlage der beiden Aluminium 2024-T3510/T3511 Rechteck-Hohlprofile stattfinden.

5 Diskussion und Ausblick

Zusammenfassend gibt dieser Beitrag einen Einstieg in die bauteilübergreifende systematische Werkstoffauswahl leichtbaugetriebener Fahrzeugstrukturen, ohne dabei im Detail auf diverse mathematische Beziehungen eingehen zu wollen. Hierbei verfolgt der ganzheitliche Ansatz eine dreiphasige Vorgehensweise unter integrierter Betrachtung von Design, Werkstoff und Produktionsprozess. Am exemplarischen Anwendungsbeispiel aus dem Fahrzeugvorbau konnte eine eingängige, komponentenübergreifende Analyse unter stets stark vorgeschriebenen technischen Rahmenbedingungen fundamental durchgeführt werden. In zukünftigen wissenschaftlichen Bemühungen werden nun die notwendigen konstruktiven, ma-

teriellen sowie technologischen Aspekte und Kenngrößen zur optimalen komponentenübergreifenden Systemgestaltung weiter ausgearbeitet (bspw. Generierung einer begleitenden Software insbesondere für komplexere Geometriebeziehungen, etc.).

Literatur

- [1] Ashby, M.F.; Bréchet, Y.; Cebon, D.: *Selection Strategies for Materials and Processes*. Advanced Engineering Materials 4 (6). Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2002. S. 327-334.
- [2] Friedrich, H.E.; Treffinger, P.; Kopp, G.; Knäbel, H.: *Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte*. In: Schindler, V.; Sievers, I. (Hrsg.): *Forschung für das Auto von morgen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 301-348.
- [3] Ellenrieder, G.; Gänsicke, T.; Goede, M.; Herrmann, H.-G.: *Die Leichtbaustrategien*. In: Friedrich, H.E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. S. 43-118.
- [4] Sahr, C.: *Methodische Vorgehensweise der Werkstoffauswahl für die Karosserieentwicklung in Multi-Material-Bauweise*. Dissertation, Forschungsgesellschaft Kraftfahrzeugwesen Aachen, 2011.
- [5] Kaiser, R.; Martini, T.; Vielhaber, M.: *Einfluss der Fügetechnik auf die Materialauswahl von Strukturbauteilkonzepten mit baureihenübergreifend einheitlichen Schnittstellen*. KT-Kolloquium, Clausthal, 2015. S. 249-256.
- [6] Ashby, M.F.: *Material Selection in Engineering Design*. 4. Aufl. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010.
- [7] Reuter, M.: *Methodik der Werkstoffauswahl – Der systematische Weg zum richtigen Material*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [8] Wanner, A.: *Minimum-weight materials selection for limited available space*. Materials and Design 31 (6), 2010. S. 2834-2839.
- [9] Kaiser, R.; Vielhaber, M.: *Systematische Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen*. KT-Kolloquium, Rostock, 2016. S. 165-176.
- [10] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [11] Kaspar, J.; Vielhaber, M.: *Cross-Component Systematic Approach for Lightweight and Material-Oriented Design*. DS 85-1: Proceedings of NordDesign 2016, Trondheim, 2016. S. 332-341.
- [12] Kaspar, J.; Vielhaber, M.: *Komponentenübergreifende leichtbau- und werkstofforientierte Produktentwicklungsmethodik infolge anforderungsoptimierter Multi-Material-Strukturen*. KT-Kolloquium, Rostock, 2016. S. 177-184.
- [13] Kaspar, J.; Bähre, D.; Vielhaber, M.: *Material Selection Based on a Product and Production Engineering Integration Framework*. Procedia CIRP 50, 2016. S. 2-7.
- [14] Ward, A.C.; Liker, J.K.; Sobek, S.K.; Cristiano, J.J.: *Set-Based Concurrent Engineering and Toyota*. Proceedings of the ASME Design Technical Conference 68, 1994. S. 79-90.
- [15] Kaiser, R.: *Ein Vorgehensmodell zur systematischen Werkstoffauswahl in der frühen Phase der Entwicklung von Fahrzeugstrukturbauteilen*. Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (Universität des Saarlandes), 2017.

Wissensbasierte Daten- und Informationsbereitstellung für den Produktentwicklungsprozess am Beispiel von Schweißkonstruktionen

Thivakar Manoharan, André Loibl, Peter Köhler

Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

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

Inhalt: Im Rahmen eines Forschungsprojektes werden Möglichkeiten vorgestellt, dem Konstrukteur und auch anderen in der Prozesskette Daten und Informationen für die Konstruktion von Schweißbaugruppen bereitzustellen. Es wird das Konzept mit einem RESTful Service als zentrale Wissensbasis und die dahinterliegenden Microservices vorgestellt. Anschließend wird an einigen Schweißbaugruppen die Umsetzung der Wissensintegration als Beispiel aufgeführt.

Abstract: Within a research project, opportunities are proposed to provide data and information of designing welding assemblies to designers and others in the process chain. A concept with a RESTful service as the central knowledge base, based on Microservices, is presented. Subsequently the knowledge integration is carried out in the context of a welding assembly example.

Stichwörter: Wissensintegration, KBE, Schweißkonstruktionen, Microservices, Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung

Keywords: Knowledge Integration, KBE, Welded Construction, Microservices, Linkage of design and calculation

1 Einleitung

Qualitätsansprüche, die an Kraftwerkskomponenten und damit auch an entsprechende Fertigungsprozesse zu stellen sind, müssen in allen Entwicklungsphasen abgesichert werden. Eine besondere Verantwortung obliegt hier den Entwicklungs- und Konstruktionsbereichen, in denen Fachwissen aus sehr unterschiedlichen Bereichen zusammengeführt werden. Dieses Fachwissen muss in entsprechenden Daten- und Informationsmodellen und Produkt- und Abnahmedokumentationen eingearbeitet werden. Moderne Informationstechnologien können hierbei helfen, diese Prozesse zu unterstützen.

Anhand kraftwerksspezifischer Anwendungsfälle wurden übertragbare Konzepte der Integration schweißtechnischen und auslegungsspezifischen Wissens in CAD-Prozesse entwickelt und beispielhaft umgesetzt. Neben Geometrie- und Prozessinformationen wurden

auch intelligente Kopplungen zu relevanten Softwarebausteinen, beispielsweise zur Dimensionierung und Nachweisrechnung bei Druckgeräten und Tragkonstruktionen realisiert. Damit wird nicht nur der Aufbau realitätsnaher digitaler Anlagen-, Produkt- und Prozessmodelle unterstützt, sondern auch die notwendige Dokumentation der einzelnen Prozessschritte.

2 Zentrale Wissensbasis

In erster Linie werden Daten und Informationen dem Konstrukteur bereitgestellt, die bislang manuell gesucht oder ermittelt werden mussten. Beispielsweise sind dies Daten und Informationen zum Schweißprozess aus einer schweißtechnischen Software, Berechnungsergebnisse aus einer Behälterauslegungssoftware oder Norminhalte und Normdokumente.

Das gesamte Konzept basiert auf einer zentralen Wissensbasis die das Wissen in Form von Diensten bereitstellt. Diese Dienste können über das Internet oder ein firmeneigenes Intranet veröffentlicht werden. Die Kommunikation mit den Diensten erfolgt über das HTTP-Protokoll. Es muss lediglich eine definierte Schnittstelle (API) zur Kommunikation definiert werden. Diese Dienste greifen auf Datenbanken und Softwaresysteme zu und beinhaltet zusätzlich die Logik zur Verknüpfung und Verwendung der Daten. Somit können verschiedene Clients auf dieselbe Datenbasis zugreifen ohne direkte Einbindung von Datenbanken bzw. Kopplung von Softwaresystemen. Eine strukturelle Änderung der Datenbank oder gar der Austausch eines Softwaresystems kann ohne Anpassung des Clients erfolgen, solange die definierte API eingehalten wird. Bild 1 zeigt das Konzept des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes „Wissensbasierte CAX-Prozessketten für Schweißkonstruktionen im Kraftwerksbau (WPSK)“.

Der Dienst zur Bereitstellung der Wissensbasis wurde durch den Projektpartner CAD Schroer GmbH implementiert und für alle Projektpartner veröffentlicht. Serverseitig werden die Dienste mit Spring Boot erstellt und die notwendige Infrastruktur mit Spring Cloud aufgebaut [1]. Hiermit wurden mehreren kleine Dienste (Microservices) erstellt, die jeweils eine bestimmte kleine Aufgabe, in einen abgegrenzten Kontext erledigen. Diese Microservices laufen in einer Docker Umgebung [2]. Die Kommunikation mit den Microservices und auch untereinander erfolgen nur über REST (Representational State Transfer) [3]. Jede Anfrage enthält somit in der URL alle Informationen die zur Verarbeitung der Anfrage benötigt werden. Die Antwort wird in den meisten Fällen im JSON Format zurückgesendet.

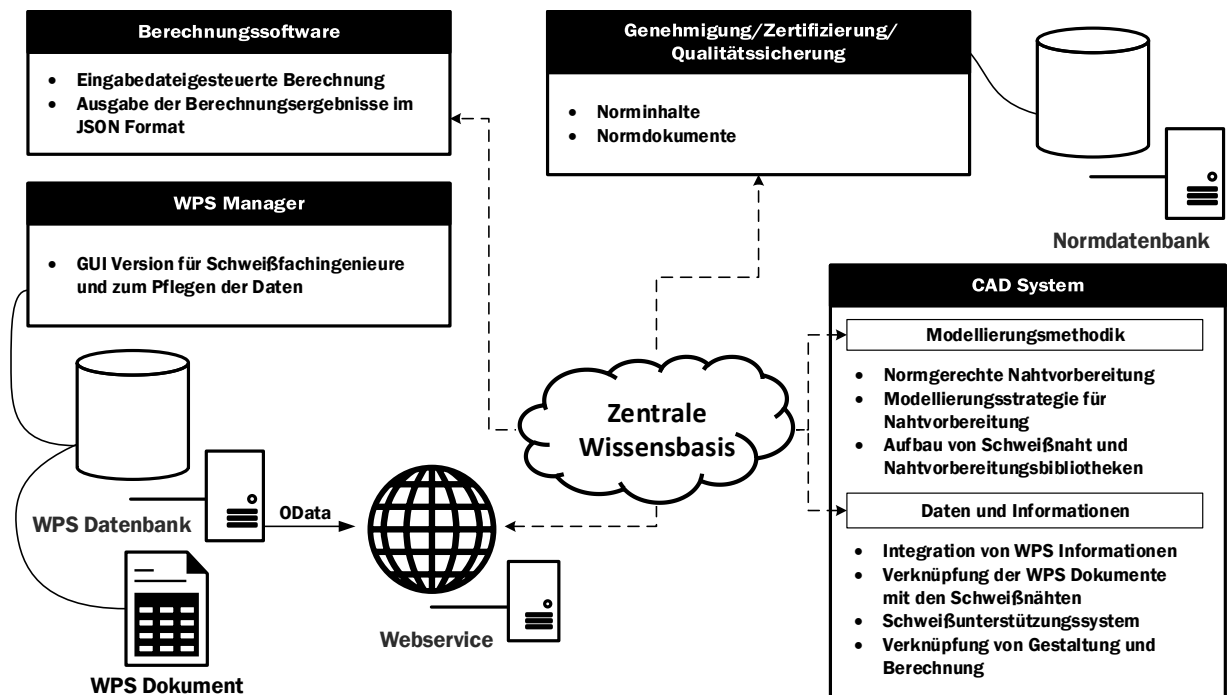


Bild 1: Konzept einer zentralen Wissensbasis

Bild 2 zeigt den Aufbau des Microservices (WPSK Services). Zusammengefasst lässt sich sagen, dass der Config Service für alle anderen Dienste, die Konfigurationseinstellungen bereithält und diese abgerufen werden können. Beim Discovery Service registrieren sich alle Dienste, so dass der Edge Service anfragen kann, welcher Dienst unter welcher Adresse verfügbar ist und welche Anfragen bearbeitet werden. Auf die detaillierte Funktionsweise des Config Service und Discovery Service wird in diesem Beitrag nicht eingegangen. Hierzu findet man unter [4] weitere Erklärungen. Verschiedene Clients können plattformunabhängig auf die Services mit Hilfe von HTTP-Anfragen zugreifen, solange die WPSK API eingehalten wird. Diese Anfragen werden zunächst an den Edge Service weitergeleitet, welcher ein Microservices API Gateway beinhaltet, ein Proxy, das den Clients die WPSK API Funktionalitäten ermöglicht. Die API wurde durch ein Cross-funktionales Team definiert und ist eine auf REST basierender Schnittstelle, welches Daten im JSON Format austauscht. Sobald eine API definiert wurde, kann sowohl die Serverapplikation als auch die Clientapplikation unabhängig voneinander entwickelt werden. So werden die eingehenden Anfragen, definiert durch die WPSK API, zu einem hinter dem Gateway liegenden Service weitergeleitet. Falls eines der Microservices die Funktionalität eines anderen Dienstes benötigt, kommuniziert dieser auch über den Edge Service. Das Konzept beinhaltet auch mehrere Load Balancer, welche in Abhängigkeit der Auslastung der einzelnen Services, eine oder mehrere weitere Instanzen der Microservices starten und so die Anfragen verteilt abarbeiten.

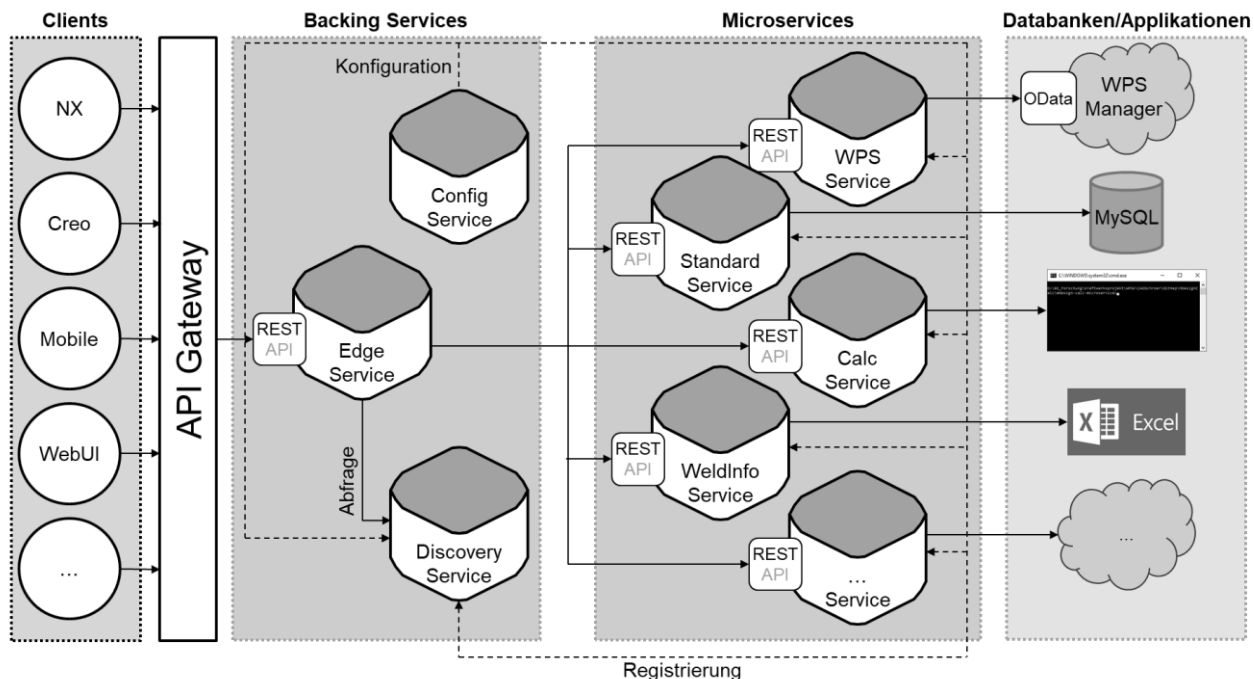


Bild 2: Aufbau der Microservices

Die Microservices sind kleine entkoppelte Dienste, die wiederum auf andere Dienste, Datenbanken oder Softwarewerkzeuge zurückgreifen können. Die Microservices lassen sich einfach und schnell um Funktionen ergänzen und sogar austauschen. Solange die nach außen definierte Schnittstelle nicht verändert wird, wird der Client von einem Austausch nichts mitbekommen. So könnte man zum Beispiel auf eine andere Berechnungssoftware wechseln oder zwei verschiedene Softwarelösungen parallel für unterschiedliche Anfragen nutzen. Nachfolgend werden einige Beispieldienste und die Einbindung dieser in den Konstruktionsprozess erläutert.

3 Einbindung der Microservices in den Konstruktionsprozess

3.1 Calc Service

Besonders im Bereich der Druckbehälterauslegung ist die Verknüpfung von Gestaltung, Berechnung und Dokumentation unabdingbar. Es wird im erhöhten Maße vom Konstrukteur gefordert, dass er im Konstruktionsprozess erste Berechnungen durchführt, ein einheitliches datenkonsistentes Modell pflegt und alle, für einen umfassenden Produktlebenszyklus, erforderlichen Dokumente seiner Tätigkeit bereitstellt. Viele für diese Schritte benötigten identischen Daten liegen in unterschiedlichen Modellen vor und müssen immer wieder manuell

übertragen werden. So sind in der Regel das 3D-Modell und das Berechnungsmodell voneinander getrennt. Dieses Problem wurde in [5] untersucht. Die dort entwickelten Modelle und Schnittstellen erfordern jedoch manuelle Anpassungen.

Die beiden Welten existieren zurzeit noch größtenteils parallel ohne Verknüpfung oder der Möglichkeit des Datenaustausches. Eine Folge dieses Zustandes ist, dass von dem Konstrukteur in der Entwicklungsphase unter Umständen eine hohe Anzahl von Iterationsschritten verlangt wird bis er das gewünschte Ergebnis erzielt. Diese Iterationsschritte enthalten ein hohes Fehlerpotenzial. So kann der Konstrukteur bei der Übertragung der Parameter, in beide Richtungen, diese vertauschen oder falsch übertragen. Zudem kann bei unzureichendem Fachwissen, bei Veränderung eines Parameters, fälschlicherweise die Annahme getroffen werden, dass eine erneute Berechnung nicht notwendig ist. Zudem führen eine hohe Anzahl an iterativen und repetitiven Tätigkeiten zu einem hohen Zeitaufwand und stellen daher einen nicht unerheblichen Kostenfaktor dar.

Dies führt dazu, dass es notwendig ist diese beiden Welten zu verknüpfen. Der Konstrukteur wird entlastet und kann sich auf seine eigentlichen Aufgaben, u.a. der Validierung von Berechnungsergebnissen konzentrieren. Zudem ist er in der Lage sich mit komplexeren Zusammenhängen intensiver auseinanderzusetzen und kann so höherwertige Lösungen entwickeln. Weiter können auch Berechnungsabhängigkeiten, die Norm übergreifend sind, abgebildet werden, so werden dem Konstrukteur direkt Informationen angezeigt welche Berechnungen bei Änderung eines Parameters noch durchgeführt werden müssen.

Die Berechnungsintegration geschieht auf Grundlage nationaler und internationaler Regelwerke. Zu nennen sind hier die Regelwerke und Normen AD 2000-Merkblatt B 0 [6], die DIN EN 13445-3 [7] oder der ASME BPVC Section VIII, Division 1 [8]. Die am Markt verfügbaren Softwarelösungen stellen in der Regel eine umfassende Auswahl von Regelwerken zur Verfügung. Im Rahmen dieses Projektes erfolgt eine beispielhafte Umsetzung mit der DIN EN 13445. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Regelwerke kann mithilfe kleinerer Anpassungen problemlos erfolgen.

Eine weitere Herausforderung stellt die Sicherung der komponentenübergreifenden Regelwerkskonformität dar. Es soll abgesichert werden, dass die Wechselwirkungen von beanspruchungs- und schweißgerechter Gestaltung berücksichtigt werden. So dass bei Änderungen Zusammenhänge erhalten bleiben und entsprechend aktualisiert werden.

Ausgewählt wurde das Tool espresso von MDESIGN, espresso stellt Berechnungsmodule für Druckbehälter nach AD2000 und DIN EN 13445 bereit. Es besteht die Möglichkeit die Berechnungen im Batchmodus durchzuführen. In diesem Modus werden durch MDESIGN

XML-Dateien aufgerufen in welchen die Bauteile, Lastfallbedingungen und Werkstoffeigenschaften beschrieben werden. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt ebenfalls im XML-Format. Um eine Berechnungsdokumentation zu gewährleisten wird ein PDF-Dokument erstellt.

Die Einbindung und Verwendung des Tools erfolgt durch einen Microservice. Der Aufruf erfolgt über eine URL, die wie folgt aussieht:

[http://\[WPSK Services Domain\]/api/v1/calc/pressureTank/shell?type=cylindrical&de=1600&di=1560&en=20&l=4000&werkstoff=20CrMoV13-5-5&werkstoffNr=1.7779&pa=9&t=100](http://[WPSK Services Domain]/api/v1/calc/pressureTank/shell?type=cylindrical&de=1600&di=1560&en=20&l=4000&werkstoff=20CrMoV13-5-5&werkstoffNr=1.7779&pa=9&t=100)

Tabelle 1: Abfrageparameter Calc Service

Abfrageparameter	Bezeichnung
de	Außendurchmesser
di	Innendurchmesser
en	Wandstärke
l	Länge
werkstoff	Werkstoff-Kurzname
werkstoffNr	Werkstoffnummer
pa	Äußerer Betriebsdruck
t	Betriebstemperatur

Durch Angabe dieser Parameter wird die Berechnung durchgeführt und als Ergebnis wird die vorhandene Spannung (f_a) und maximal zulässige Druck (p_{i_max}) zurückgegeben. Die Rückgabe der Ergebnisse an den Client erfolgt im JSON Format nach der Umwandlung der XML-Ausgabedatei aus MDESIGN. Es wird ebenfalls ein Link generiert, der auf die Berechnungsdokumentation im PDF-Format verweist.

Bild 3 zeigt den Daten und Informationsfluss bei der Berechnungsintegration. Dieser beruht auf einer Verknüpfung zwischen CAD-Software und einem Berechnungsprogramm. Um diese Verknüpfung zu realisieren, müssen in dem CAD-Modell Anpassungen vorgenommen werden. Es müssen zusätzliche Parameter hinterlegt werden die für die Berechnung von Relevanz sind, jedoch für das CAD-Modell keine Bedeutung haben, z. B.: äußerer Betriebsdruck und Betriebstemperatur. Dies wird durch die KBE-Applikation überprüft und erst nach einer positiven Rückmeldung kann mit dem Aufruf des Microservices gestartet werden.

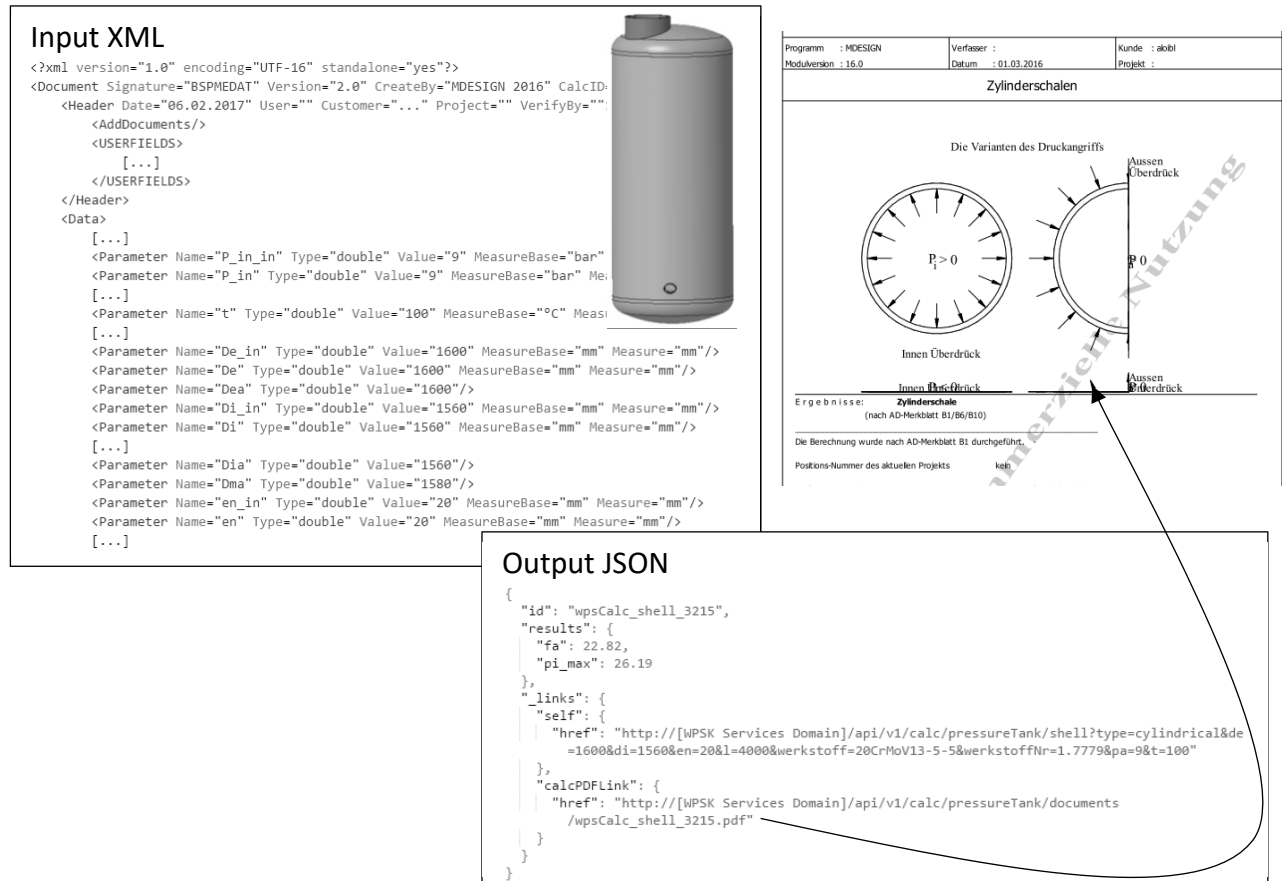


Bild 3: Ablauf der Berechnungsintegration

Damit eine einheitliche und durchgängige Datenbasis vorhanden ist, werden nach der Rückgabe der berechneten Werte und des Links jeweils ein entsprechender Parameter im CAD-Modell angelegt und in diesem gespeichert.

Zurzeit wird ein modellbasiertes Berechnungsmodell ergänzt, welches Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten der Baugruppe abspeichert und dem Konstrukteur entsprechende Hinweise gibt. Ferner sollen Regeln hinsichtlich der Positionierung von Stützen und den damit verbundenen Ausschnitten abgesichert werden.

3.2 WPS Service

Dieser Service bietet dem Client die Möglichkeit, Daten aus einer schweißtechnischen Software abzurufen. In diesen Fall ist es der WPS Manager des Projektpartners SLV Halle. Der WPS Manager bietet neben der GUI-Version einen Webservice an, mit dem die Daten aus der Datenbank abgerufen werden können. Hierzu wird das Open Data Protocol (OData) [9] genutzt. Somit kann durch die Nutzung der OData URI Conventions [10] der gesamte Datenbankinhalt abgerufen werden, ohne dass jede Ressource einzeln definiert sein muss.

Beispielsweise kann so für eine gegebene Schweißaufgabe, nach einer passenden WPS oder WPQR gesucht werden. Oder nach den Daten einer bestimmten WPS oder WPQR. Der Service bietet auch eine Funktionalität an, das dazugehörige PDF-Dokument abzurufen.

Zur Auswahl einer passenden WPS oder WPQR müssen die Halbzeuge definiert sein, dies kann ein Rohr (T) oder ein Blech (P) sein, wobei ein Rohr mit $D > 500\text{mm}$ als Blech angesehen wird. Zusätzlich werden der Werkstoff der Halbzeuge, die Wanddicken, die Nahtform (Kehlnaht – FW oder Stumpfnaht – BW) und die Nahtdicke benötigt. Im Falle eines Rohres wird außerdem der Außendurchmesser benötigt. Tabelle 2 zeigt den Unterschied der Anfrage URLs zwischen den WPS Manager Webservice und WPS Services. Die lange URL vom WPS Manager Webservice (linke Spalte) ist der Datenbankstruktur und der OData Schnittstelle geschuldet. Durch Definition einer API für dieses Problem kann der Aufruf durch die URL in der rechten Spalte erfolgen. Der WPSK Service kann die Antwort je nach definierter API angepasst zurücksenden.

Tabelle 2: Vergleich der Anfrage URLs

WPS Manager Webservice Anfrage URL	WPSK Services Anfrage URL
http://[WPS Manager Webservice Domain]/wpsservice/wpsdata/SchweissanweisungBase/Schweissanweisung?\$format=JSON&\$expand=WSGruppe, Nahtart, BlechRohr, Prozess&\$filter=BlechRohr/Halbzeugkuerzel eq 'T/T' and Werkstueckdicke eq 12 and Aussendurchmesser eq 762 and Werkstueckdicke2 eq 12 and Aussendurchmesser2 eq 340 and WSGruppe/Nummer eq '8.2' and Nahtart/Nahtartkuerzel eq 'BW' &\$select=Prozess/VerfahrensNr, Prozess/Prozess, WSGruppe/Kurzbeschreibung, WSGruppe/Beschreibung, WSGruppe/Nummer, Nahtart/Nahtartkuerzel, Nahtart/Nahtartbeschreibung, BlechRohr/Halbzeugkuerzel, BlechRohr/Halbzeugbeschreibung, Erstellt, WPSNummer, Werkstueckdicke, Werkstueckdicke2, Aussendurchmesser, Aussendurchmesser2, Nahtlaenge, Kehlnahtdicke	http://[WPSK Services Domain]/api/v1/wpsm/wpss/search?Halbzeugkuerzel=T/T&Werkstueckdicke=12&Aussendurchmesser=762&Werkstueckdicke2=12&Aussendurchmesser2=340&WSNummer=8.2&Nahtartkuerzel=BW

Bild 4 zeigt die Implementierung in NX. Bei der Platzierung eines Schweißnahtfeatures werden die zur Abfrage benötigten Daten aus den ausgewählten Bauteilen ausgelesen und an den WPSK Service geschickt. Die JSON Antwortdatei beinhaltet alle Informationen um neben der Erzeugung der Schweißnahtgeometrie, diese und das Schweißprozess Feature mit den passenden Daten zu füllen. Bei der Erzeugung des Schweißnahtfeatures wird in der

3D-Anmerkung eine Verknüpfung zum WPQR und WPS Dokument gespeichert, so dass diese von Anwender jederzeit eingesehen werden kann.

Schweißanweisung (WPS)
(basierend nach: EN ISO 15609-1)

WPS-Nr.: WPSK_STB_1
Auftrag: WPSK_STB_1
Bauteil: Stahlbauteile für WPSK
Mater.: 111 P/P FW 1 B 10 PB
Hersteller: SLV Service GmbH
Schweißer: erford. Schweißer
Schweißprozess: 111 E
Haltzeit: P/P Stumpf-Rohr: FW
Fugenvorbereitung: keine Stütze

Grundwerkstoff 1: 1.1 EN 10 028 S235GD3 (1 G116) 1.0116
Grundwerkstoff 2: 1.1 EN 10 028 S235GD3 (1 G116) 1.0116
Werkstückdicke [mm]: 10 / 10
Durchmesser [mm]: /
Kathartische [mm]: 3
Schweißlänge [mm]: /
Schweißposition: PB
Bewertungsgruppe: B
Ausfugen/Randloch: 10 rb
Nahtlänge [mm]: 150

WPQR: WPQR-Nr. WPQR-ET 1-WPQR
Bezeichnung der WPQR: WPQR-ET 1-WPQR

Gestaltung der Verbindung
2
90°

Schweißfolge
3
2

Schweiß- folge	Prozess	Zusatz- stoffe [mm]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Strom- richtung	Draht- vorschub [mm/min]	Schweiß- geschw. [mm/min]	Stücken- energie [kJ/cm]
1	111	3.2	140	25-30	rw	12	14.00-16.00	
2	111	3.2	120	25-30	rw	10	12.00-14.00	

Zusatzwerkstoff: 0
Schweißfolge: Zusatzwerkstoff
ein: 8 20 2 B 12 H 10

Einzelheiten für das Pulverschweißen
Einzelheiten Plasma-schweißen:
Kontaktabstand [mm]
Gasmenge [l/min]
Gasmenge [mm]
Bremsenzeit [s]
Mindestzeit:

Einzelheiten für das Pulverschweißen
Einzelheiten Plasma-schweißen:
Kontaktabstand [mm]
Gasmenge [l/min]
Gasmenge [mm]
Bremsenzeit [s]
Mindestzeit:

Vorwärmung: ☐ Zwischenlagentemperatur:
Wärmeschutzhaltung: ☐ Haltezeit: ☐ Temperatur: ☐ Verfahren: ☐

Erwärmungsrate:
Abkühlrate [°/s]
Ausfugen:
Hersteller:
SLV Service GmbH
Name, Datum, Unterschrift
erstellt mit WPS Manager 5.0

Schweißaufsicht:
Dr. Krenz
Name, Datum, Unterschrift
© SLV Halle GmbH

```
{
  "d": [
    {
      "_metadata": {**},
      "Prozess": {
        "_metadata": {**},
        "VerfahrensNr": "141",
        "Prozess": "Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)"
      },
      "WSGruppe": {
        "_metadata": {**},
        "Kurzbeschreibung": "Austenitische nichtrostende Stähle mit Cr > 19 %",
        "Beschreibung": "Austenitische nichtrostende Stähle mit Cr > 19 %",
        "Nummer": "8.2"
      },
      "Nahtart": {
        "_metadata": {**},
        "Nahtartkuerzel": "BW",
        "Nahtartbeschreibung": "Stumpfnahht"
      },
      "BlechRohr": {
        "_metadata": {**},
        "Halbzeugkuerzel": "T/T",
        "Halbzeugbeschreibung": "Rohr-Rohr-Verbindung"
      },
      "Erstellt": "/Date(1455062400000)/",
      "WPSNumber": "QA2009/20/1363-0019 04/22",
      "Werkstueckdicke": 12,
      "Werkstueckdicke2": 12,
      "Aussendurchmesser": 762,
      "Aussendurchmesser2": 340,
      "Nahtlaenge": 0,
      "Kehlnahtdicke": 4
    }
  ]
}
```

Bild 4: NX Client für WPS Service

3.3 Standards Service

Der Standards Service bietet dem Konstrukteur Daten und Informationen aus den Normen und Richtlinien an. Auch hier wurden abhängig von den Anforderungen auf der Clientseite passende APIs definiert, so dass der Konstrukteur immer die notwendigen Daten bereitgestellt bekommt. Auch hier ist es möglich sich durch den WPSK Service die PDF-Dokumente der Normen anzeigen zu lassen. Aktuell wurden nur ausgewählte Teile von Normen umgesetzt, z. B.: Tabellen, Formeln, Graphen und Abbildungen. Grund hierfür ist die aktuelle Art und Weise der Normbereitstellung. Normen sind zwar digital verfügbar, jedoch nur in Form von PDF-Dokumenten. Damit Rechner diese Daten weiterverarbeiten können, muss zunächst manuell die Norm aufbereitet werden. Die Bereitstellung der Normen in Form von PDF-Dokumenten muss in Zukunft überdacht werden. Aktuell werden im Rahmen dieses

Projekts Möglichkeiten untersucht, Normen in Form von dokumentenbasierten Datenbanken bereitzustellen und aus diesen auf Wunsch eine PDF-Datei zu generieren.

4 Zusammenfassung

Die Microservices erweisen sich als ein geeignetes System um die zentrale Wissensbasis bereitzustellen. Dieses Konzept ist nicht nur für Konstruktion von Schweißbaugruppen geeignet, sondern ebenfalls in andere Bereiche übertragbar um Wissen systemunabhängig abzulegen. Verschiedene Tools können somit hierauf zugreifen. Dennoch wird es weiterhin auch direkte Kopplungen zwischen Softwaresysteme geben und auch Wissen wird anwendungsfallabhängig in verschiedenen Systemen abgelegt und dort intelligent verknüpft werden. Zukünftig muss neu erworbenes Wissen bzw. neu zu dokumentierendes Wissen in einer Form abgelegt werden, sodass diese direkt elektronisch verarbeitet werden können.

Literatur

- [1] Wolff, Eberhard; Flohre, Tobias: Spring Boot und Spring Cloud. entwickler.press, s.l., 2015.
- [2] Vohra, Deepak: Pro Docker. Learn how to use containers as a service for development and deployment, 2016. <https://www.docker.com/>
- [3] Fielding, Roy: Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Dissertation. University of California, 2000.
- [4] Rv, Rajesh: Spring microservices. Build scalable microservices with Spring Docker and Mesos, 2016.
- [5] Kesselmanns, Christoph: Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2014.
- [6] AD 2000-Merkblatt B 0:2014-11, Berechnung von Druckbehältern
- [7] DIN EN 13445-3:2016-12, Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 3: Konstruktion; Deutsche Fassung EN 13445-3:2014
- [8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code. ANSI/ASME BPV-VIII-Z Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels. Devision 1
- [9] <http://www.odata.org/> (abgerufen am 08.06.2017)
- [10] Cheng, Steven: OData programming cookbook for NET developers. 70 fast-track, example-driven recipes with clear instructions and details for OData programming with NET framework. Packt Pub, Birmingham, 2012.<http://www.odata.org/documentation/odata-version-3-0/url-conventions/>

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ISBN 978-3-940402-15-8