



Design for X

Beiträge zum 25. DfX-Symposium
Oktober 2014

Dieter Krause
Kristin Paetzold
Sandro Wartzack
(Hrsg.)



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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Impressum

TuTech Verlag
TuTech Innovation GmbH
Harburger Schloßstr. 6-12
21079 Hamburg
Tel.: +49 40 76629-0
E-Mail: verlag@tutech.de
www.tutechverlag.de

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

Die Verwertung von Informationen aus *Design for X | Beiträge zum 25. DfX-Symposium* zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.

© TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2014

ISBN 978-3-941492-79-0

Vorwort

Das Symposium Design for X findet in diesem Jahr bereits zum 25. Mal statt. Aufgrund des vorangegangenen 30. Jubiläums des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik (KTmfk) haben wir den Veranstaltungsort „München“ um ein Jahr verschoben und tagen heuer etwas außerhalb der Reihe nach nur einjähriger Pause im Herzen Bamberg.

Neben diesen zwei Jubiläen feiern wir mit 56 eingereichten Beiträgen einen neuen Rekord. Wir freuen uns über den hohen Beliebtheitsgrad unserer Veranstaltung, zu dem sicherlich die Aufnahme in das Scopus-Listing und das Prädikat „Endorsed Event“ der „Design Society“ beigetragen haben. Andererseits hat dies dazu geführt, dass wir eine Auswahl treffen und einen Großteil der eingereichten Beiträge ablehnen mussten. Um dennoch möglichst viele Doktoranden präsentieren lassen zu können, haben wir in diesem Jahr zwei Postersessions eingeführt und auf Keynote-Paper aus der Industrie verzichtet.

Die Schwerpunkte in diesem Jahr orientieren sich dabei größtenteils an Themen, welche aktiv am KTmfk „beforscht“ werden:

- Wissensbasierte Produktentwicklung
- Toleranzen / Robust Design
- Alternsgerechte Produktentwicklung
- Simulation mit digitalen Menschmodellen
- Leichtbau

Unser Doppeljubiläum hat den Vorbereitungsaufwand erheblich gesteigert, sodass unser Organisationsteam in diesem Jahr besonders gefordert wurde. Aus diesem Grund möchte ich mich in diesem Jahr an erster Stelle bei meiner Mitarbeiterin Susan Kett und bei meinen Mitarbeitern Bernd Vierneusel und Daniel Krüger sowie auch bei meinen beiden Sekretärinnen Evelyn Weyrich und Gabriele Stingl bedanken. Selbstverständlich gilt mein Dank ebenso meinen beiden Mitveranstaltern und Kollegen, Kristin Paetzold und Dieter Krause und natürlich auch allen Autoren und Vortragenden, die unser Symposium mit Beiträgen bereichert haben. Ich freue mich auf die vielen, interessanten Vorträge und auf die sicherlich lebhaften Diskussionen!

Erlangen, September 2014

Sandro Wartzack



Inhaltsverzeichnis

1 Session

Entwicklung generativ gefertigter und individualisierbarer Gefäßmodelle
*Johanna Spallek, Laurin Brehmer, Andreas Frölich, André Kemmling,
Jens Fiehler, Dieter Krause*
TU Hamburg-Harburg, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf..... 1

2 Session: Wissensbasiertes Konstruieren

Knowledge Management in Product Generation Development – an empirical study
A. Albers, N. Bursac, J. Urbanec, R. Lüdcke, G. Rachenkova
*Karlsruhe Institute of Technology (KIT), International Performance
Research Institute gGmbH, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.....* 13

Entwurf eines Wissensbasierten Systems zur Unterstützung des Simultaneous Engineering für die Tailored Parts Betriebsmittelentwicklung
Stefan Heinemann, Thomas Vietor
Volkswagen AG, TU Braunschweig..... 25

Der „Generative Design Approach“ im Kontext von technischer Konfiguration
Bastian Sauthoff, Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer
Leibniz Universität Hannover..... 35

Konzept zur automatischen Bauteilerkennung innerhalb der FE-Software-Umgebung mittels Künstlichen Neuronalen Netzen
Tobias C. Spruegel, Sandro Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg..... 47

3 Session: Leichtbau

Simulation von naturfaserverstärkten, spritzgegossenen Kunststoffen
Albrecht, K.; Osswald, T.; Wartzack, S.; Müssig, J.
Hochschule Bremen, University of Wisconsin – Madison,
FAU Erlangen-Nürnberg..... 57

Entwicklung von virtuellen Testverfahren für Sandwichstrukturen
Ralf Seemann, Dieter Krause
TU Hamburg-Harburg..... 65

Vergleich von Optimierungsalgorithmen anhand der Charakteristik von endlosfaserverstärkten Kunststoffen
Markus Kellermeier, Sandro Wartzack
CADFEM GmbH, FAU Erlangen-Nürnberg..... 77

4 Session: Nutzerzentrierte Produktentwicklung

Darstellung der Herausforderungen einer ganzheitlichen Nutzerbeschreibung
Johanna Walter, Kristin Paetzold
Universität der Bundeswehr München..... 87

Subjektive Adaptionenfähigkeit im Kontext der alternsensiblen Produktentwicklung
Stefan T. Kamin, Thomas Luft, Jörg Miehling, Bettina Williger,
Frieder R. Lang, Sandro Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg..... 99

5 Session: Simulation mit digitalen Menschmodellen

Biomechanische Betrachtungen der Berechnung von Kräften mit Menschmodellen
Rainer Gößling, Henrik Eicker, Marcel Bartz, Beate Bender
Ruhr-Universität Bochum..... 111

Funktionsorientiertes Interaktionsmodell zur Simulation menschlicher Bewegungen während der Nutzer-Produkt Interaktion <i>Daniel Krüger; Sandro Wartzack</i> <i>FAU Erlangen-Nürnberg</i>	121
Integration von Menschen in Smart Factories: Ein individualisierbares Profildatenmodell für Industrie 4.0 <i>Nadia Galaske, Alexander Christ, Reiner Anderl</i> <i>TU Darmstadt</i>	133
6 Session: Toleranzen und Robust Design	
Design to Process Capabilities: Challenges for the Use of Process Capability Databases (PCDBs) in Development <i>Tobias Eifler, Simon Moritz Göhler and Thomas J. Howard</i> <i>Technical University of Denmark</i>	145
Analyse offener und geschlossener Toleranzketten im parametrischen 3D-CAD-System <i>Stephan Husung, Christian Weber, Annika Geis, Axel Oberänder</i> <i>TU Ilmenau</i>	157
Gestalten robuster und zuverlässiger Produkte mit der SMART-Methode <i>Stefan Kemmler, Bernd Bertsche</i> <i>Universität Stuttgart</i>	169
Toleranz-Kosten-Optimierung bewegter Systeme mittels Partikelschwarm-Optimierung <i>Michael Walter, Tobias Constantin Spruegel, Tim Weikert, Vincent Mann, Marcus Romeis und Sandro Wartzack</i> <i>FAU Erlangen-Nürnberg</i>	181

7 Session: Nutzerzentrierte Produktentwicklung

Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten – Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle

*Sven Matthiesen, Sebastian Mangold, Tim Bruchmüller,
Adrian-Maximilian Marko*

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)..... 193

Modellbildung der unteren Extremitäten und simulationsgestützte Auswertung von Gangparametern

Jan Moritz Sporbeck, Rainer Gößling, Beate Bender

Ruhr Universität Bochum..... 205

Konzept zur Methodenbeschreibung und -auswahl auf Basis von Kompetenzen und Zusammensetzung von Entwicklungsteams

Ann-Kathrin Bavendiek, David Inkermann, Thomas Vietor

TU Braunschweig..... 215

8 Poster Session

Der Einsatz von Gaußprozessen zur Beschleunigung der automatischen Wissensakquisition

Thilo Breitsprecher, Sandro Wartzack

FAU Erlangen-Nürnberg..... 227

Vorgehensweise zur Identifikation von Potenzialen für Wissensmanagementunterstützungen in der Produktentwicklung

Alexander Laukemann, Hansgeorg Binz, Daniel Roth

Universität Stuttgart..... 237

Nutzerzentrierte Produktentwicklung durch systematische Integration von Marketingaspekten – ein erster Ansatz

Susan Kett, Tina Schröppel, Sandro Wartzack

FAU Erlangen-Nürnberg..... 249

Konstruktion eines Messaufbaus zur präzisen Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit von Motorwicklungen <i>Martin Stöck, David Sauter, Quentin Lohmeyer, Mirko Meboldt</i> <i>ETH Zürich</i>	261
Parametrische biomechanische Simulation am Beispiel des Radfahrens <i>Jörg Miehling, Sandro Wartzack</i> <i>FAU Erlangen-Nürnberg</i>	273
Wissensbasierte nachhaltige Produktentwicklung - Systematische Auswahl und Kombination von Methoden zur Entscheidungsunterstützung <i>Tom Buchert, Friedrich Halstenberg, Sebastian Adolphy, Kai Lindow, Rainer Stark</i> <i>TU Berlin, Fraunhofer IPK</i>	285
Design for Friction Reduction – Durchgängige Unterstützung des Konstrukteurs durch den gezielten Einsatz von Wälzlagerreibungs-Berechnungswerkzeugen <i>Seiler, Katrin; Tremmel, Stephan; Wartzack, Sandro</i> <i>FAU Erlangen-Nürnberg</i>	297
Wissensbasierte Navigation für die lärmreduzierte Auslegung rotierender Maschinen in der Produktentwicklung <i>Christof Küstner, Sandro Wartzack</i> <i>FAU Erlangen-Nürnberg</i>	313
Potenziale für die Schaffung altersgerechter Unterstützungssysteme durch die Nutzung von Cyber-Physical Systems <i>Olga Gottfried, Sandra Eilmus, Dieter Krause</i> <i>TU Hamburg-Harburg</i>	325
Abbildung von Baugruppen mit Hilfe des CPM-Ansatzes in einem PDM-System <i>Johannes Köbler, Kristin Paetzold</i> <i>Universität der Bundeswehr München</i>	337

Vorgehensweise zur Gestaltung robuster Produktionssysteme am Beispiel der
Automobilindustrie

Florian Schöttl, Daniel März, Udo Lindemann

TU München..... 349

Entwicklung innovativer Produkte durch Verknüpfung von Funktionsintegrati-
on und Fertigungsprozessintegration

Christian Wagner, Sebastian Gramlich, Hermann Kloberdanz

TU Darmstadt..... 361



Entwicklung generativ gefertigter und individualisierbarer Gefäßmodelle

Johanna Spallek¹, Laurin Brehmer², Andreas Frölich², André Kemmling², Jens Fiehler², Dieter Krause¹

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

²*Klinik und Poliklinik für Neuroradiologische Diagnostik und Intervention
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf*

Abstract

Additive manufacturing allows new applications due to the layer-based production without tools. Components with a high degree of individualization or with complex geometry can be produced efficiently. The advantages can be used in medical applications for the reproduction of patient data, e.g. for intracranial aneurysms. The treatment of intracranial aneurysms requires highly experienced medical staff and individual planning. Physical reproductions of the complex geometry of the vessels support the treatment of intracranial aneurysms. In this paper a development of additive manufactured vessel models is presented. Based on the patient geometry a model of the aneurysm and the affected vessel is constructed. After the FDM-fabrication and sealing, the model is applicable in medical research.

Keywords: Additive manufacturing, medical engineering, individualized products, fused deposition modeling

1 Einleitung

Generative Fertigungsverfahren wurden in den letzten Jahren stark weiterentwickelt, sodass viele neue Einsatzgebiete erschlossen wurden. Aufgrund der werkzeuglosen Fertigung bestehen Vorteile hinsichtlich der Geometriefreiheit und Automatisierung [1]. Erstgenannter Vorteil ermöglicht die Realisierung von Bauteilen, die mit konventionellen Verfahren nur schwer zu fertigen sind. Zusätzlich können Bauteile mit hohem Individualisierungsgrad mit vertretbarem finanziellen und zeitlichen Aufwand hergestellt werden [2].

Die erhöhte Geometriefreiheit und die Fertigung individualisierbarer Produkte machen die generativen Fertigungsverfahren auch für medizinische Anwendungen interessant, da medizintechnische Produkte durch generative Fertigungsverfahren patientenspezifisch hergestellt werden können [3]. Der vorliegende Beitrag stellt eine Anwendung generativer Fertigungsverfahren zur Nachbildung medizinischer Gefäße vor. Hierfür wird der Produktentstehungsprozess von der medizinischen Bildaufnahme über die Fertigung bis hin zur Anwendung beschrieben.

2 Grundlagen generativer Fertigungsverfahren

Mittels generativer Fertigungsverfahren werden Bauteile durch Hinzufügen von Material oder durch einen Phasenübergang von Pulver bzw. flüssigem in festes Material automatisiert hergestellt [4], wodurch eine werkzeuglose Fertigung von Bauteilen unmittelbar aus den CAD-Daten eines Volumenkörpers ermöglicht wird. Hierzu wird das Volumenmodell in übereinander liegende Schichten gleicher Stärke eingeteilt. Diese werden in der generativen Fertigungsanlage aufeinander geschichtet, sodass ein dreidimensionales Bauteil entsteht. Abhängig vom Fertigungsverfahren ist ein Post-Processing notwendig, um z.B. Stützkonstruktionen zu entfernen. Anschließend kann eine Nachbehandlung des Bauteils, wie Schleifen oder Lackieren, die Anwendbarkeit und Lebensdauer des Bauteils erhöhen. [5]

2.1 Einsatzmöglichkeiten generativer Fertigungsverfahren

Der schichtweise Aufbau von generativ gefertigten Bauteilen ermöglicht im Vergleich zu konventionellen Verfahren erweiterte Einsatzgebiete. Vorteile bieten die Verfahren laut Breuninger [2] in der Herstellung komplexer Geometrien sowie der Funktionsintegration und der Individualisierung von Bauteilen.

Generative Fertigungsverfahren bieten bei der **Herstellung komplexer Geometrien** Vorteile gegenüber konventionellen Fertigungstechnologien, da sie sich bei kritischen Geometrien, wie Hinterschneidungen, Innenformen und Freiformflächen, wegen des schichtweisen, werkzeuglosen Aufbaus anbieten [6]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Grad der geometrischen Komplexität fallabhängig, z.B. im Zusammenhang der jeweiligen Fertigungstechnologie, bewertet werden muss [7].

Aufgrund der Geometriefreiheit kann ein generativ gefertigtes Bauteil eine hohe Anzahl verschiedener Funktionen abdecken. Diese **Funktionsintegration** ermöglicht eine Vereinfachung des Herstell- und Montageprozesses. So können z.B. funktionstüchtige Federn oder Formschlussverbindungen in einem einzigen Bauteil realisiert werden. [2]

Für viele Unternehmen stellt das **Anbieten individualisierter Produkte** eine hohe Herausforderung dar [8]. Die Umsetzung individualisierter Bauteile wird durch generative Fertigungsverfahren ermöglicht. Auch eine aktive Mitgestaltung des Kunden wird dadurch stark vereinfacht [2].

2.2 Fused Deposition Modeling

Das in diesem Beitrag zugrunde liegende generative Fertigungsverfahren ist das Fused Deposition Modeling-Verfahren (FDM), auch bekannt als Fused Layer Modeling bzw. Manufacturing [4]. Beim FDM-Verfahren dient ein fester, drahtförmiger Werkstoff als Ausgangsmaterial (siehe Bild 1).

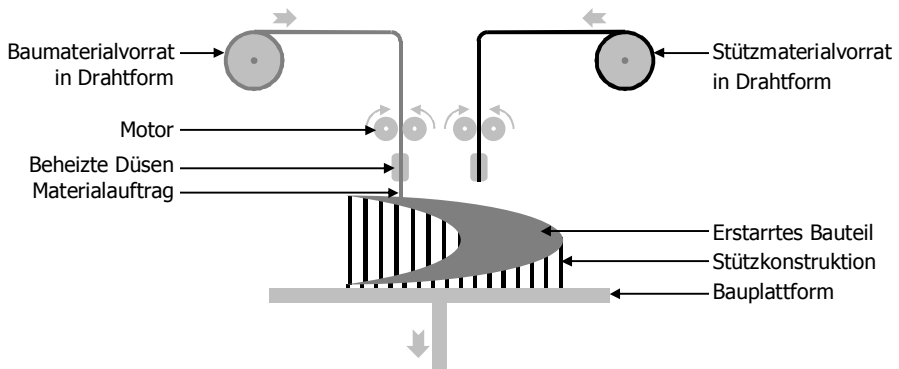


Bild 1: Prinzip des FDM-Verfahrens

Das schmelzbare Material, meist ein Thermoplast, wird knapp über den Verflüssigungspunkt gebracht und linienweise durch eine Düse auf der Bauplatte bzw. dem Bauteil aufgetragen. Die nebeneinander abkühlenden Materialstränge führen zu einer dauerhaften Verbindung. Durch Absenken der Bauplatte entsteht aus den aufeinander gelegten Materialsträngen schrittweise ein dreidimensionaler Körper. [9]

3 Ausgangssituation

Die hohe Geometriefreiheit generativer Verfahren ermöglicht die Fertigung von Hohlräumen. Für medizintechnische Zwecke ist dies von großem Nutzen, der den erwähnten Vorteil der Fertigung patientenspezifischer Produkte ergänzt [3]. Diese Vorteile finden beim Projekt ALSTER (Aneurysm Like Synthetic bodies for Testing Endovascular devices in Reality [10]) Anwendung, in dem in Kooperation mit dem Universitätsklinikum Hamburg- Eppendorf individualisierte Nachbildungen von Blutgefäßen entwickelt werden.

3.1 Medizinische Grundlagen

Intrakranielle Aneurysmen sind krankhafte Aussackungen der Hirngefäße und besitzen das Risiko zu platzen (siehe Bild 2) [11]. Diese Gefäßeinrisse führen zu folgeschweren Blutungen, die nicht selten mit schwerer Behinderung oder tödlich enden [12].

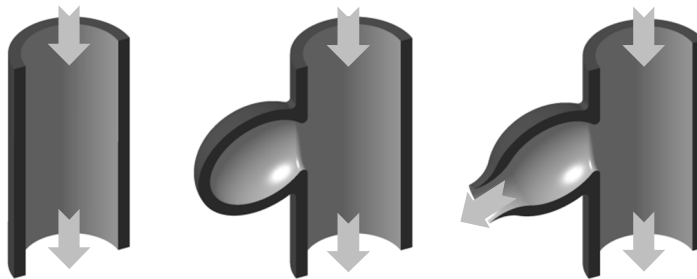


Bild 2: Links: Gesundes Blutgefäß. Mitte: Blutgefäß mit Aneurysma. Rechts: Blutung eines Blutgefäßes aufgrund eines geplatzten Aneurysmas

Die Behandlung von Aneurysmen setzt eine hohe Erfahrung des medizinischen Personals sowie individuelle Planung voraus. Dabei kann eine exakte dreidimensionale Nachbildung der Gefäße und des intrakraniellen Aneurysmas sowohl für Messungen des Aneurysmadurchflusses, für Tests der Platzierung von medizinischen Instrumenten wie auch zur individuellen Planung der Be-



handlung genutzt werden. Zudem ist an den Gefäßmodellen die Aus- und Weiterbildung des medizinischen Personals möglich.

3.2 Anforderungen

Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojekts ALSTER [10] ist die Prozessentwicklung zur Herstellung patientenindividueller Gefäßmodelle, die mit vertretbarem Aufwand hergestellt werden können. Die Modelle sollen das patientenindividuelle intrakranielle Aneurysma mit den anliegenden Gefäßinnenräumen möglichst originalgetreu nachbilden.

Im Unterschied zu bisherigen medizintechnischen Anwendungen generativer Fertigung [13] stellt die beschriebene Anwendung besondere Anforderungen an die Genauigkeit des Hohlraums sowie dessen technische Oberflächeneigenschaft. Die Hohlraumstruktur des Modells soll der jeweiligen Gefäßgeometrie entsprechen, wobei unterschiedliche Durchmesser, Lagen und Winkel abgebildet werden müssen. Die Gefäßmodelle zur Durchflussmessung des Aneurysmas müssen dichtend sein. Zur einfachen Positionskontrolle der Behandlungsinstrumente sollte das Bauteil transparent sein. Eine Nachgiebigkeit der Gefäßwand ist ebenfalls wünschenswert, damit das physikalische Verhalten der Gefäße beim Einsetzen der Instrumente simuliert werden kann. Zur Therapieplanung und Schulung ist ein erweitertes Modell sinnvoll, welches neben den anliegenden Gefäßen auch die gesamte Gefäßstrecke von der Leistenarterie bis zum Aneurysma, durch die die medizinischen Instrumente geführt werden, abbildet.

4 Entwicklung der Gefäßmodelle

Für die Entwicklung der Gefäßmodelle steht zunächst die entsprechende Modellerstellung und Fertigung im Vordergrund. Anschließend wird der Herstellprozess zur Anpassung der Material- und Oberflächeneigenschaften entwickelt.

4.1 Modellerstellung

Die dreidimensionalen Geometrien der Gefäße basieren auf realen Patientendaten (siehe Bild 3). Diese individuellen Daten werden als Negativ-Modell des Gefäßes in einem Volumenmodell aufgebaut. Die Ein- und Ausflüsse der Gefäße werden mit standardisierten Anschlüssen gestaltet, um medizintechnische Instrumente in das Modell einführen und es mit Flüssigkeiten, z.B. Kontrastmittel, füllen zu können. Das resultierende Volumenmodell ist in Bild 3 mit transparenter Außenwand dargestellt.

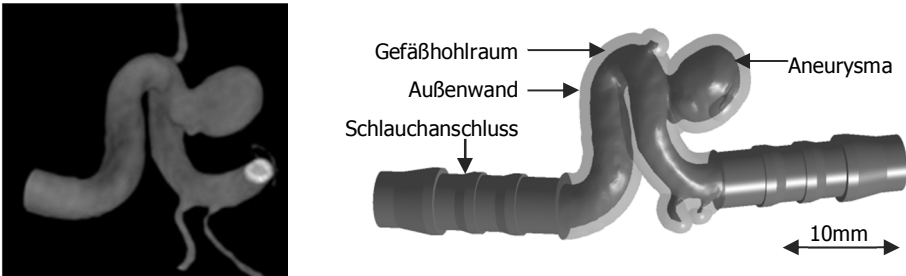


Bild 3: Links: Patientengeometriedaten. Rechts: CAD-Modell des Gefäßmodells

4.2 Fertigung

Zur Herstellung der Gefäßnachbildungen sind generative Fertigungsverfahren sehr gut geeignet (siehe Abschnitt 2.1). Für die Fertigung der Gefäßmodelle kommen mehrere generative Fertigungsverfahren in Frage [9]. Einschränkungen in der Wahl des Verfahrens entstehen insbesondere durch die Anforderungen der Individualisierbarkeit der Hohlräume. Um die individuellen Gefäßhohlräume unabhängig von der Aufbaurichtung der Modelle fehlerfrei herzustellen, ist der Einsatz von Stützkonstruktionen hilfreich.

Für die Fertigung der Gefäßmodelle wird das FDM-Verfahren hinsichtlich der Machbarkeit und dessen Einschränkungen untersucht. Aufgrund der Verwendung von zwei Materialien – Bau- und Stützmaterial – ist das FDM-Verfahren für die Herstellung von Hohlräumen gut geeignet. Die Gefäßmodelle werden mit dem HP Designjet Color 3D Printer aus dem Kunststoff ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere), einem relativ schlagfesten Kunststoff [9], mit einer Schichtdicke von 0,254 mm gefertigt. Im anschließenden Post-Processing wird das Stützmaterial durch entsprechende Lösungsmittel entfernt.

Unbehandelte FDM-Bauteile weisen eine unebene Oberfläche und poröses Material auf (siehe Bild 4A). Insbesondere letzteres ist für die vorliegende Anwendung nicht geeignet, sodass eine Nachbehandlung der Bauteile notwendig ist [14]. Zur Nachbehandlung von FDM-Bauteilen werden zwei Verfahren für unterschiedliche Aneurysmageometrien angewendet und verglichen.

Das Bauteil wird bei der ersten Alternative mit Aceton bedampft. Acetondampf greift das Material ABS an, woraufhin die Materialstränge an der Oberfläche verschmelzen. So können Flüssigkeiten nur noch bedingt eindringen.

Die unebene Oberfläche wird durch die Acetonbehandlung glatt und glänzend. Kanten werden abgerundet (siehe Bild 4B).

Bei dem zweiten Nachbehandlungsverfahren wird das Gefäßmodell mit flüssigem Imprägniermittel infiltriert, welches aufgrund der Kapillarwirkung in die Poren eindringt und das Bauteil versiegelt. Die Geometrie des Bauteils wird durch die Infiltrierung nur geringfügig verändert, durch schlechte Positionierung während der Aushärtung können jedoch lokale Schwankungen der aufgetragenen Menge des Imprägniermittels auftreten (siehe Bild 4C).

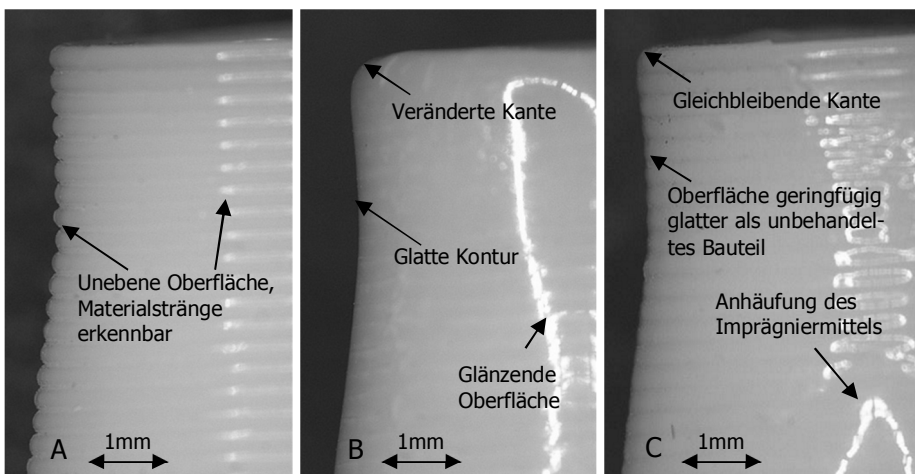


Bild 4: A: Unbehandeltes FDM-Bauteil (Schichtdicke 0,254mm).
B: FDM-Bauteil nach Acetonbedampfung.
C: FDM-Bauteil nach Infiltrierung mit Imprägniermittel

Messungen der Verfahren zeigen, dass beide Nachbehandlungen die Bauteile versiegeln und gut für die gewünschten Anwendungen geeignet sind. In Bild 5 sind angiografische Aufnahmen der nachbehandelten Gefäßmodelle dargestellt. Bei beiden Verfahren ist eine geringe Leckage der Flüssigkeit aus dem Gefäßhohlraum in das Bauteil hinein erkennbar. Der Grad der Versiegelung der beiden Verfahren ist abhängig von den Gefäßgeometrien. Bei der vorliegenden Geometrie liegt die Leckage im akzeptablen Bereich. Derzeit wird das zu bevorzugende Verfahren systematisch anhand verschiedener Aneurysmageometrien ermittelt. Relevant ist hierbei primär die Dichtheit der Gefäßmodelle. Als sekundäres Kriterium wird die Geometriegenauigkeit des Hohlraums ausgewertet.

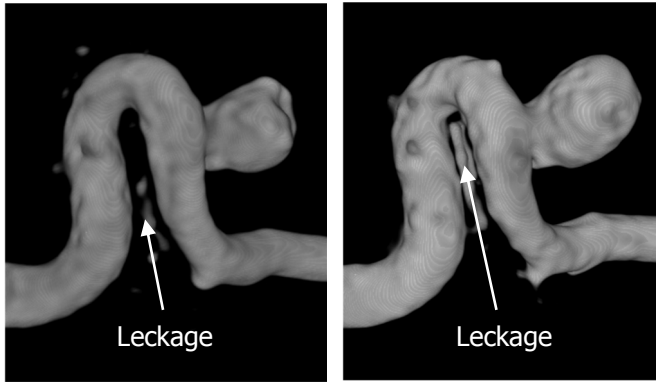


Bild 5: Angiografische Auswertung der Nachbehandlung.
Links: Mit Aceton behandeltes Gefäßmodell.
Rechts: Mit Imprägniermittel infiltriertes Gefäßmodell

4.3 Aktuelles Vorgehen der Modellherstellung

Im Rahmen des Projekts ALSTER wird eine Prozesskette zur Entwicklung und Herstellung von Gefäßmodellen erarbeitet (siehe Bild 6). Im ersten Schritt werden reale Patientendaten durch bildgebende Verfahren aufgenommen. Aus diesen werden die relevanten Gefäße segmentiert. Basierend auf diesen Bilddaten wird ein individuelles Volumenmodell als Positivmodell oder Hohlraum erstellt. Dieses Modul wird mit Zusatzfunktionen, wie z.B. medizintechnischen Schlauchanschlüssen, ausgestattet. Das Modell wird in Schritt 4 in einer generativen Fertigungsanlage gefertigt und zur Erfüllung der physikalischen Anforderungen nachbehandelt (siehe Abschnitt 4.2). Anschließend steht das gefertigte Gefäßmodell zur Anwendung zur Verfügung.

Die im Projekt ALSTER hergestellten Gefäßmodelle erfüllen die gestellten Anforderungen der Dichtheit und der Geometriegenauigkeit. Die Funktionsintegration der standardisierten Schnittstellen in Schritt 3 stellt die Voraussetzung des Zusammenwirkens verschiedener Module dar [15] und ermöglicht für alle individuellen Gefäßgeometrien eine einheitliche Gesamtanwendung. So können die entwickelten Gefäßmodelle in einem standardisierten Modell der gesamten menschlichen Gefäße integriert werden. Die Platzierung und Entfaltung der Instrumente zur Behandlung individueller Aneurysmen kann somit von der Leiste an simuliert werden.



Bild 6: Übersicht des Produktentstehungsprozesses von Gefäßmodellen intrakranieller Aneurysmen

In Abhängigkeit der gewünschten Anwendung (siehe Bild 7) sind die Alternativen der einzelnen Schritte im Produktentstehungsprozess unterschiedlich zu kombinieren. Die Bauteile sind durchscheinend, wodurch die Positionierung medizintechnischer Instrumente ohne technische Hilfsmittel visuell überprüfbar ist. Zur Erhöhung der Transparenz ist die Nachbearbeitung mittels Acetondampf zum Glätten der Oberfläche zu bevorzugen. Bei Anschluss einer Pumpe ist der Durchfluss durch das individuelle Aneurysma messbar und mit numerischen Simulationen vergleichbar. Hierbei steht beim Finishing die Dichtheit der Bauteile im Vordergrund. Durch Wahl eines elastischen Materials bei der Fertigung kann das Verhalten der Gefäßwand beim Einsetzen der Instrumente simuliert werden. Bei der Modellerstellung in Schritt 2 besteht zudem die Möglichkeit die Gefäße als Positivmodell zu erzeugen, sodass

nach Hinzufügen der Zusatzfunktionen ein dreidimensionales Anschauungsmodell der Gefäßgeometrie gefertigt werden kann. Dieses kann bei der Therapieplanung oder zu Schulungszwecken eingesetzt werden.

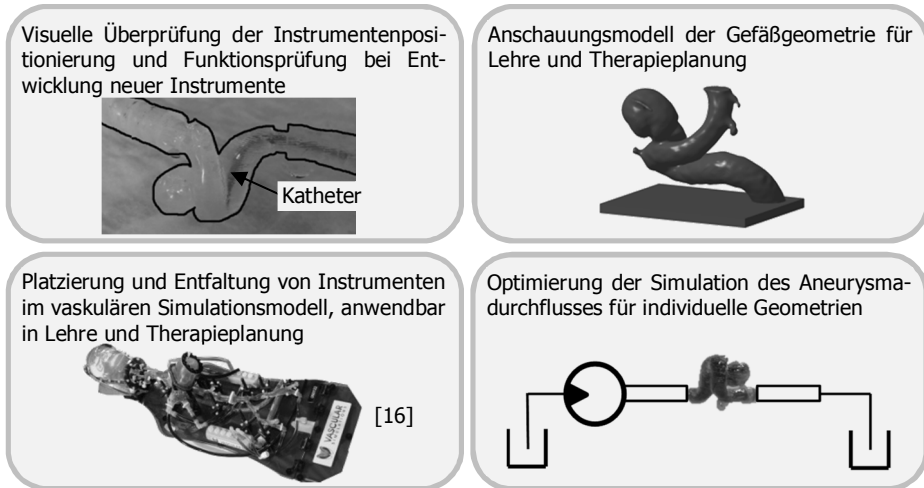


Bild 7: Anwendungsfelder der Gefäßmodelle

5 Zusammenfassung und Ausblick

Generative Fertigungsverfahren ermöglichen die Realisierung individualisierbarer Produkte komplexer Geometrien. Im Beitrag wird die Herstellung generativ gefertigter Gefäßmodelle im Projekt ALSTER vorgestellt. Die auf realen Patientendaten basierenden Gefäßgeometrien werden bei der Modellerstellung aufgearbeitet und anschließend als maßstabgetreue Gefäßnachbildung gefertigt. Die Gefäßmodelle werden aktuell mittels des FDM-Verfahren und hier aufgeführter Nachbehandlungsmethoden hergestellt und können anschließend in der Forschung zu intrakraniellen Aneurysmen eingesetzt werden.

Mit den Gefäßmodellen intrakranieller Aneurysmen wurde ein Beispiel individualisierbarer Produkte im Bereich der Medizintechnik vorgestellt. Auch in anderen Branchen stellt die Entwicklung individualisierbarer Produkte eine Herausforderung vieler Unternehmen dar. Aufgrund der automatisierten, werkzeuglosen Fertigung bieten generative Fertigungsverfahren hierfür ein vielversprechendes Lösungspotential. Zukünftig sollen aktuelle Vorgehensweisen zur Entwicklung generativ gefertigter, individualisierter Produkte hin-

sichtlich des bestehenden Forschungsbedarfs und der erarbeiteten Erkenntnisse analysiert und erweitert werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Forschungszentrum Medizintechnik Hamburg (fmthh) ausdrücklich für die Förderung des Forschungsprojekts „ALSTER - Aneurysm Like Synthetic bodies for Testing Endovascular devices in Reality“.

Literatur

- [1] Zäh, M. F.: "Rapid manufacturing: Fertigungsverfahren für alle Ansprüche; Anforderungen, Anwendungen, Ausblicke; Augsburg, 07. Juli 2005", Herbert Utz Verlag, München, 2005.
- [2] Breuninger, J. et al.: "Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern", Springer-Verlag, Berlin, 2013.
- [3] Giannatsis, J.; Dedoussis, V.: "Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Januar 2009, 40:116–127.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: "Richtlinie VDI 3404, Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) – Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen", Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [5] Gibson, I. et al.: "Additive Manufacturing Technologies", Springer-Verlag, New York, 2010.
- [6] Rieg, F; Steinhilper, R.: "Handbuch Konstruktion", Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [7] Kaschka, U.: "Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Bewertung von konventionellen und Rapid Tooling Prozeßketten", Shaker Verlag, Aachen, 1999.
- [8] Lindemann, U. et al.: "Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion", Springer-Verlag, Berlin, 2006.

-
- [9] Gebhardt, A.: "Generative Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing", Carl Hanser Verlag, München, 2007.
- [10] Projekt ALSTER, unter <http://www.tuhh.de/pkt/forschung/struktur-analyse-und-versuchstechnik/alster.html>, Stand: 1.8.2014.
- [11] Rinkel, G. et al.: "Prevalence and risk of rupture of intracranial aneurysms: a systematic review", Stroke, Januar 1998, 29(1):251-6.
- [12] Wanke, I.: "Intrakranielle Aneurysmen: Entstehung, Rupturrisiko, Behandlungsoptionen", RöFo: Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin, 2003, 175(8): 1064-1070.
- [13] Wurm, G. et al.: "Cerebrovascular Biomodeling for Aneurysm Surgery: Simulation-Based Training by Means of Rapid Prototyping Technologies", Surgical Innovation, September 2011, 18(3):294-306.
- [14] Mireles, J. et al.: "Analysis of Sealing Methods for FDM-fabricated Parts", Proceedings for the International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, August 2011.
- [15] Blees, C.: "Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien", TuTech Verlag, Hamburg, 2011.
- [16] Vascular Simulations, "Vascular Simulations Replicator", unter: <http://www.vascularsimulations.com>, Stand: 1.8.2014.

Knowledge Management in Product Generation Development – an empirical study

A. Albers¹, N. Bursac¹, J. Urbanec², R. Lüdcke³, G. Rachenkova¹

¹ *IPEK – Institute for Product Engineering
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)*

² *International Performance Research Institute gGmbH*

³ *Innovation and Concept Development
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG*

Abstract

In the context of this contribution, the term-product generation development is defined with the help of the systems theory approach and distinguished from already existing terms. Within the scope of the empirical study, the need for a definition of product generation development is confirmed and put into the context of knowledge management. Hereby, it can be demonstrated that developers often reuse a big share of components despite having a bad overview of the completed projects. One solution lies in the product structure, which does not change a lot, and, thus, a reference system model can be created in order to link corresponding information to this model.

Keywords: Product Generation Development, Knowledge Management, Empirical Study, Early Stages

1 Introduction

The ability to innovate and the performance of activities play a crucial role in success of modern businesses, which operate in a highly competitive environment [1]. To acquire a strong position in the global market, it is important to ensure customers' satisfaction, productivity and competitiveness [1]. The research and development project "IN² - from INformation to INnovation" was initiated by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) to address the above mentioned areas. The project's aim is the encouragement of a systematic development of innovations by means of interaction of knowledge management, method application and product development processes (PDP) [2]. This paper focuses on the use of knowledge management in PDP.

2 State of the Art.

2.1 Knowledge Management in the early stages

Knowledge management was introduced in response to losses of information due to employee turnover, rapid technology developments and innovation [3]. Knowledge management is valuable in order to create innovative products, processes, services and organizations [3]. Thereby, the main task is to provide the right knowledge at the right time and place, in the required quantity and quality [4]. Therefore processes within the company can be used in order to offer information to the employees, thus they can be lead efficiently [5]. For a successful implementation, unconnected isles of knowledge should be linked with each other [6]. The company-wide introduction of knowledge management increases the expenditure of time and the financial expenses exponentially in the PDP [3].

Activities in the early stages, preceding series product development, are significant for the success of an innovation [7]. Whereas the frontloading and the virtualization of product development keep gaining in importance, the standardized knowledge management tools and methods can support early stages only to a limited extent [8]. At these stages in the PDP the product shape is still very indefinite and fuzzy. This causes additional challenges in modelling product information [9]. However, a well thought knowledge management approach as well as a conscious and systematic handling of information is an essential part in the early stages [8].

2.2 Novelty degree of product development

According to PAHL/BEITZ, [10] the development of products can be divided into new development, adjustment development and development for building variants. New development describes a development started from scratch, i.e. without carry over or retention of existing components. An example for a new development is the Google Glass, as there is no similar product on the market. Adjusted design is understood as a slight modification of a product in order to satisfy the new boundary conditions, such as new legislation. Parts and assemblies are varied within certain predefined limits in development for variants building in order to realize a high number of different products with relatively low additional costs. The structure is often kept the same, whereas the individual components are varied. Examples of such constructions are construction series and construction kit development (see [11], [12]) as well as derivate development of a cabriolet version of a vehicle. [10]

It turns out that very few products in the early stage of product development are developed completely new. Therefore, the target from the companies' perspectives is to make as little adjustments as possible when adapting products to the new conditions [13]. This results in a minimization of efforts and risks.

However, at the same time innovations are essential for companies [14]. Therefore it is also necessary that a customer can perceive great differentiation of the new product generation in comparison to the old one. As a result, new product generations require regularly new delight factors. According to the Kano model these factors gradually turn into performance and basic factors [15]. Summing up the aim of a company is to introduce preferably innovative products to the market while only a few components are developed new.



Figure 1: Product generation development using Porsche's 911-model as an example [16]

As an example the Porsche's 911-model can be used. It retains and follows a similar concept (rear engine, 2+2- seating configuration), yet introduces new innovations in every product generation. The rear axle steering in the current generation (991), the variable turbine geometry in the previous generation (997) and the ceramic brakes in its predecessor (996) are appropriate examples of new inventions. [17]

Although it is conceded in PAHL/BEITZ [10] that in practice a strict separation in the classification (new, adjustment and variant development) is impossible [10], the strategy of purposeful combination of carry over parts, adjusted components and new developments is not considered in detail. In the following, this development strategy will be referred to and defined as product generation development.

3 Research Question and Research Methodology

Although early stages and the product generation development keep gaining importance, the link how knowledge management can support the product generation development has not been researched so far. The research question is as follows:

How can knowledge management support the product generation development?



In order to answer this question in a long term, the following sub-questions will be considered in this contribution in more detail:

1. How can product generation development be defined and distinguished?
2. What are the challenges upon application of knowledge management?
3. How can these challenges be overcome?

In order to investigate these questions, an open survey was conducted during the research project IN² – from the Information to Innovation. The inquiry covers aspects of knowledge and innovations management in the PDP of companies. The survey was presented online. The inquiry was sent from the research institutes and participating firms within the research project IN² to companies employing engineers. Thus, it is not possible to determine an accurate respondent rate. However, 247 engineers have participated in the online survey, resulting in 131 full answer sheets of all 33 questions. The questions concern four central aspects: method application in PDP, innovation, knowledge management and incentives to secure an adequate knowledge management. In addition various firm characteristics were subject to the survey. The inquiry provides answers from companies of different size and branches. In figure 2 it is shown that large companies with more than 5000 employees represent the biggest fraction of the sample, small firms with less than 250 employees represent nearly a quarter.

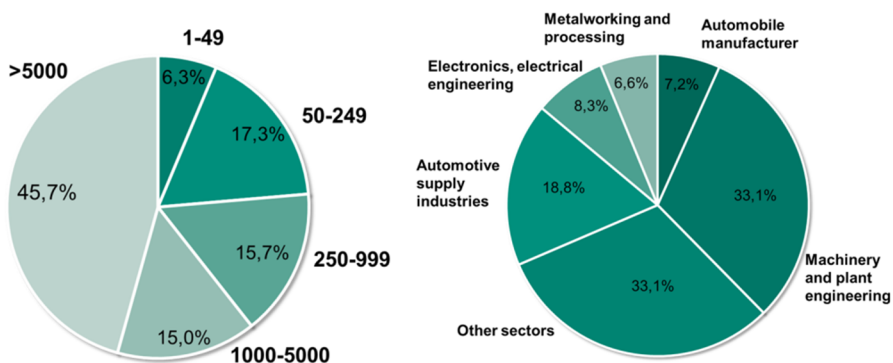


Figure 2: Size of the company, measured as the amount of employees and the industrial sector (multiple choice answers)

4 Product Generation Development

For a more detailed observation of the product generation development, a system theoretical approach is chosen using the example of a vehicle. This way a product can be understood as a sum of its parts and their interactions [18]. In the interest of effort and investment reductions it is therefore prudent to maintain the structure of a product and at the same time to deliberately adapt and newly develop different individual components. For example, visible components of both exterior and functions that a customer has direct contact with such as Automatic Cruise Control ACC [19] InnoDrive (delight factors) are newly developed, while expensive components such as engine are ideally only modified to increase the performance (performance factor) or to suffice the new regulatory requirements (basic factors). Thus, a new product generation, as it is shown in figure 3, consists of subsystems, which are carried over, subsystems, which are adjusted, and sub-systems, which are developed new. Thereby, in a fractal consideration (see [20]) of the subsystems of a system, they can be regarded as product generation development.

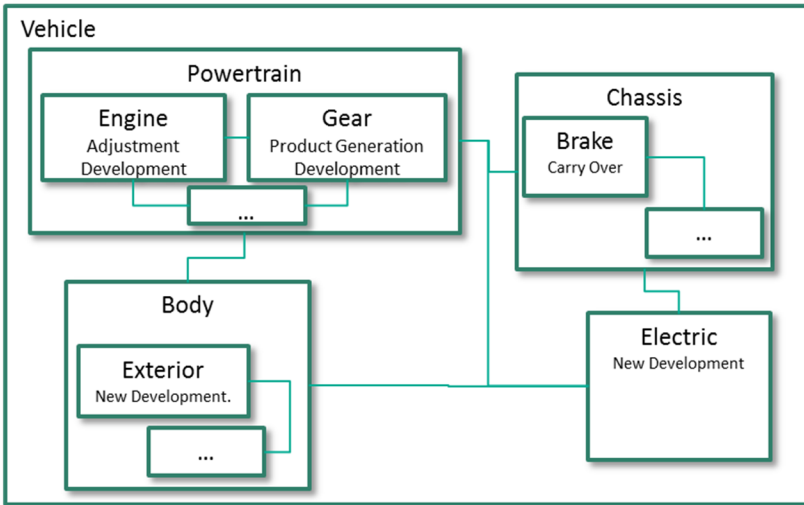


Figure 3: System theoretical view on a vehicle within the scope of product generation development

Based on the motives of the product generation development, which on the one hand, help to excite the customer with innovation leaps, and on the other hand, keep development investments with the help of carry over and adjusted parts low, a product generation development can be defined as follows:

The product generation development is the development of a system, in which subsystems are purposefully carried over, adjusted and newly developed. Thereby, the system structure (reference system model) from former Product Generations remains mostly the same.

The above-described definition can be mathematically summarized as follows: the new product generation (G_{n+1}) is composed of carry over parts (c), the degree of modification (m) and the degree of new development (ΔN).

$$G_{n+1} = c_{n+1} G_n + m_{n+1} G_n + \Delta N_{n+1}$$

With a share of the new developments (δ):

$$\delta_{n+1} = \frac{\Delta N_{n+1}}{c_{n+1} G_n + m_{n+1} G_n + \Delta N_{n+1}} \text{ in \%}$$

From the result of the equation it is possible to classify between a pure adjustment ($\delta = 0\%$) and a completely new development ($\delta = 100\%$). In this context, respondents from different companies were asked to estimate the development focus of their company. The respondents could state a value on a scale from a pure adjustment development (1) to a completely new development (100). The results can be seen in figure 4.

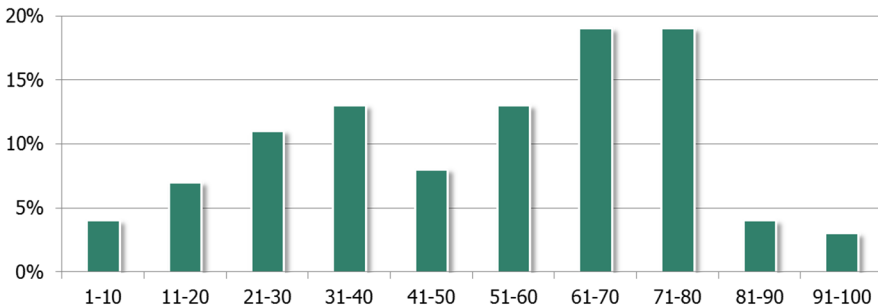


Figure 4: Company focus: adjustment development of the existing products (1) till new developments (100)

The survey results confirm the need for a definition of the product generation development, as only 11% could be attributed to adjustment developments (1-20) and 7% to new developments (81-100).

5 Challenges upon application of Knowledge Management

In order to enable an efficient sharing and reuse of knowledge, good transparency of information should be one of the main aims of knowledge management. It is demonstrated that an overview of existing and completed projects tends to decrease with growing company size (see figure 5). In addition, more than 75% of the employees in large companies (defined as firms with more than 5,000 employees) do not have a good overview of completed projects.

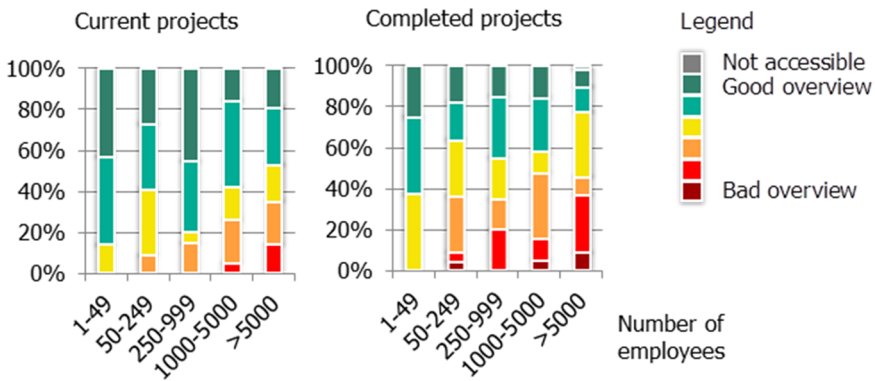


Figure 5: Overview of current (left) and completed projects (right) for different company sizes

Knowledge management systems (KMS) are implemented in order to face this problem. KMS should secure that employees are able to both: share and recall information efficiently. Thus, it is necessary to introduce a KMS that guarantees these requirements. The survey covers insights from the most primary used KMS in PDP and their respective operator behavior. Figure 6 provides an overview of the different KMS and their percentage usage in the PDP. The respondents were asked to write down their most used KMS in an empty text box. In this way the participants were not affected by a selection bias due to a multiple choice question. Surprisingly many individual KMS solutions are used. They are part of the fraction "others" in the circle above.

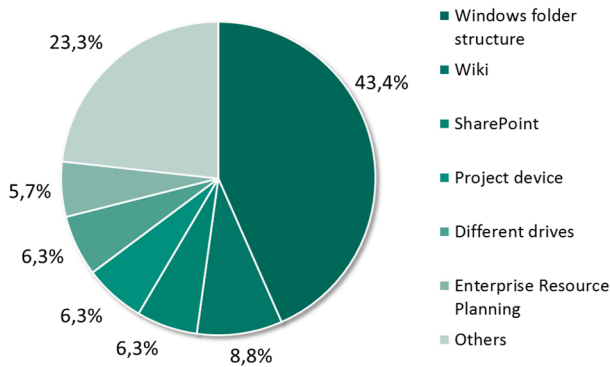


Figure 6: Overview of current most frequently used KMS in PDP

According to the illustration, the windows folder structure and the wiki are the most primary used KMS. Further findings are pictured in Figure 7.

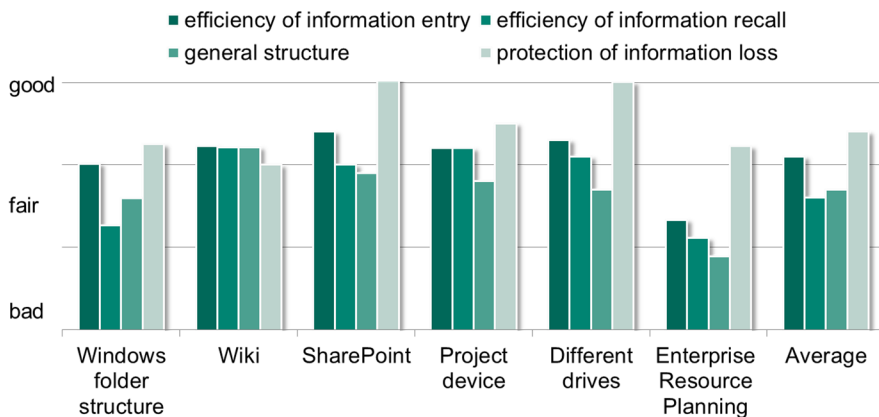


Figure 7: Evaluation of the KMS regarding efficiency of information entry and recall as well as the general structure and the protection of information loss

In the figure is shown that none of the requested KMS have been evaluated well regarding the efficiency of information entry respective recall. These results are in line with the general structure of the KMS. Only the protection of information loss does not seem to be a problem for the companies. A benchmark of the KMS can be seen through comparison of an KMS with the average in the last beams.

6 Conclusion and Outlook

The substantial challenge of knowledge management in product generation development lies in the fact that developers often reuse a big share of components despite having a bad overview of the completed projects, especially in large companies. Hence it is crucial to make the information of completed projects accessible in current projects. Obviously all KMS are not evaluated well regarding the aforementioned aspects. Based on these results it remains the question: How to make Information more efficient accessible in product generation development?

Since the product structure does not change a lot, there is a possibility of building up a reference system model of the product [21]. Thereby, appropriate knowledge elements can be directly linked to this model, if particular components within the product generation development are adapted. This way, access to information from already completed projects is simplified and the information reuse enabled.

For this purpose a study in cooperation with Porsche AG (the firm has more than 5000 employees and is a typical example for product generation development) will be presented in future research papers. Recurrent information will be collected and transferred into a SysML model within the scope of the study in order to support the developers in the early stages of product development.

Acknowledgement

This research and development project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the Framework Concept "Research for Tomorrow's Production" and managed by the Project Management Agency Karlsruhe (PTKA).

Literatur

- [1] Alain, B; Tichkiewitch, S.: "Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle – Management", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [2] Albers, A; Reiß, N; Bursac, N; Schwarz, L; Lüdcke, R.: "Modelling Technique for Knowledge Management, Process Management and Method application – A Formula Student exploratory study", In: Proceedings of the 3rd International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes, 2013.

-
- [3] Ammar-Khodja, S; Bernard, A.: "An Overview on Knowledge Management", In: "Methods and tools for effective knowledge life-cycle-management", Springer-Verlag, Berlin, 2008.
 - [4] Heisig, P; Orth, R.: "Wissensmanagement Frameworks aus Forschung und Praxis. Eine inhaltliche Analyse", eureka & Fraunhofer IPK, 2005.
 - [5] Lüdcke, R., „Effizienzverbesserung durch gezielte Führung in der Produktentwicklungspraxis“, In VDI-Verl., Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 367, 2003.
 - [6] Bühler.: "Aufbau von Methodiken und Prozessen, um Wissen in der Gesamtfahrzeugentwicklung eines Automobilherstellers zu managen", 2000.
 - [7] Verworn, B; Herstatt, C.: "Bedeutung und Charakteristika der frühen Phasen des Innovationsprozesses", In: (Herstatt, C; Verworn, B. hrsg.) Management der frühen Innovationsphasen, S. 3-19, 2007.
 - [8] Meboldt, M.: "Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung: als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Mental and formal modelling,a contribution to the integratet product development model (iPeM)", KIT, 2008.
 - [9] Muschik, S.: "Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering", Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung, In: IPEK-Forschungsberichte, 2011.
 - [10] Pahl, G; Beitz, W; Feldhusen, J; Grote, K.-H.: "Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung", Springer-Verlag, Berlin, 2013.
 - [11] Lindemann, U; Maurer, M.: "Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte", In: (Lindemann U; Reichwald, R; Zäh, M. Hrsg.) Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, S. 41–62, 2006.
 - [12] Ponn, J; Lindemann, U.: "Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte", Optimierte Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten. 1. Aufl. Heidelberg: Springer- Verlag, 2008.

-
- [13] Deubzer, F; Lindemann, U.: "Networked product modelling – use and interaction of product models and methods during analysis and synthesis", Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Stanford, USA, 2009.
- [14] Schumpeter, J.: "Theorie der Wirtschaftlichen Entwicklung", Duncker & Humblot, Leipzig, 1939.
- [15] Bailom, F; Hinterhuber, H. H; Matzler, K; Sauerwein, E.: "Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit". *Marketing: Zeitschrift für Forschung und Praxis*, S. 117-126, 1996.
- [16] Porsche Marketing Artwork Database, <https://vmstock.porsche.de>, 24.07.2014.
- [17] Harrer, M; Görich, H.-J; Reuter, U; Wahl, G.: "50 Jahre Porsche 911 Optimierung von Fahrwerkregelung und Bremssystemen", In: ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift, Springer, S. 962-969, 2013.
- [18] Ropohl, G.: "allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik", KIT Scientific Publishing, 2009.
- [19] Roth, M; Radke, T; Lederer, M; Gauterin, F; Frey, M; Steinbrecher, C; Schroeter, J; Goslar, M.: "Porsche InnoDrive – an innovative approach for the future of driving", In: Proceedings of the 20th Aachen colloquium automobile and engine technology, 2011.
- [20] Albers, A; Braun, A; Muschik, S.: "Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes", Modelling and Management of Engineering Processes - MMEP 2010, Cambridge, UK, 2010.
- [21] Albers, A; Lüdcke, R; Bursac, N; Reiß, N.: "Connecting Knowledge-Management-Systems to improve a continuous flow of knowledge in Engineering Design Processes", In: Proceedings of TMCE, S. 393-402, 2014.

Entwurf eines Wissensbasierten Systems zur Unterstützung des Simultaneous Engineering für die Tailored Parts Betriebsmittelentwicklung

Stefan Heinemann¹ und Thomas Vietor²

¹ *Werkzeugbau Marke Volkswagen, Volkswagen AG, Wolfsburg*

² *Institut für Konstruktionstechnik (IK), Technische Universität Braunschweig*

Abstract

In the highly innovative field of car body engineering, the interface between part design and production equipment engineering is essentially important. For new production technologies like Tailored Parts, which enable different stiffness properties within one single part, there is only limited engineering experience available. The main focus of this publication is the conception of a knowledge based system to specifically support this engineering interface with Tailored Parts knowledge. The data base of that system contains engineering design methodology modules, which are to support the tailored part equipment engineering in the related design phase. At the beginning of the design process, the focus is rather on the requirements analysis while it covers specific design catalogues and optimization methods in the later CAD detail phase.

Keywords: Knowledge Based System (KBS), Tailored Parts, Production Equipment Engineering

1 Einleitung

In Karosserieprojekten ist der Einsatz von Simultaneous Engineering Iterationen zwischen der Bauteil- und Betriebsmittelentwicklung weitverbreitet. Für Innovationsprozesse, wie der Herstellung von Tailored Parts mit gezielt unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften innerhalb eines Bauteils, steht das notwendige Expertenwissen im Iterationsprozess nur vereinzelt und nicht durchgängig zur Verfügung. Eine gemeinsame Wissensbasis für die Entwicklung und Produktion für derartige Bauteile existiert nicht und somit fehlt die Verknüpfung von Soll- Produkteigenschaften mit der Realisierbarkeit im Betriebsmittel [vgl. 1]. Als Konsequenz ergeben sich längere Entwicklungszeiten und höhere Änderungskosten bei notwendigen Betriebsmittelkorrekturen, die den Einsatz neuer Technologien zusätzlich erschweren.

2 Ziel der Arbeit und Methodisches Vorgehen

Um bei den Prozessbeteiligten den Wissensbedarf zu Tailored Parts nachhaltig zu decken, wird ein entwicklungslebenszyklusorientiertes Wissensbasiertes System (WBS) [vgl. 2] für die Blechumformung erstellt. Basierend auf einer Anwenderumfrage zwischen Bauteil- und Betriebsmittelentwicklern werden gezielte Anforderungen an das System ermittelt. Um daraus zunächst eine möglichst universelle Konzeption des WBS abzuleiten, kommen SysML Diagramme zum Einsatz. Bei der Ausgestaltung wurde auf allgemeine, konstruktionsmethodische Modellierungsansätze Bezug genommen [vgl. 3]. Schließlich wurden diese SysML- Diagramme in eine prototypische MS Excel Makroumgebung überführt, um für den konkreten Einsatz in der Tailored Parts Betriebsmittelentwicklung zur Anwendung zu kommen.

3 Anforderungsumfrage zur Systemgestaltung

Zur Ableitung einer Anforderungsliste für das WBS, wurde eine Umfrage unter den am Simultaneous Engineering beteiligten Mitarbeitern der Bauteil- und Betriebsmittelentwicklung durchgeführt. Dabei wurde sowohl die grundsätzliche Zweckmäßigkeit als auch die Ausführung und Gestaltung dieses Systems bei den potentiellen Anwendern erfragt. Es wurde jedoch noch nicht explizit auf Tailored Parts Bezug genommen, da diese Technologie nicht allen Umfrageteilnehmern hinreichend bekannt ist. Repräsentativ und allgemeingültig, wurde für die Umfrage stattdessen der bestehende Simultaneous Engineering Prozess zugrunde gelegt.

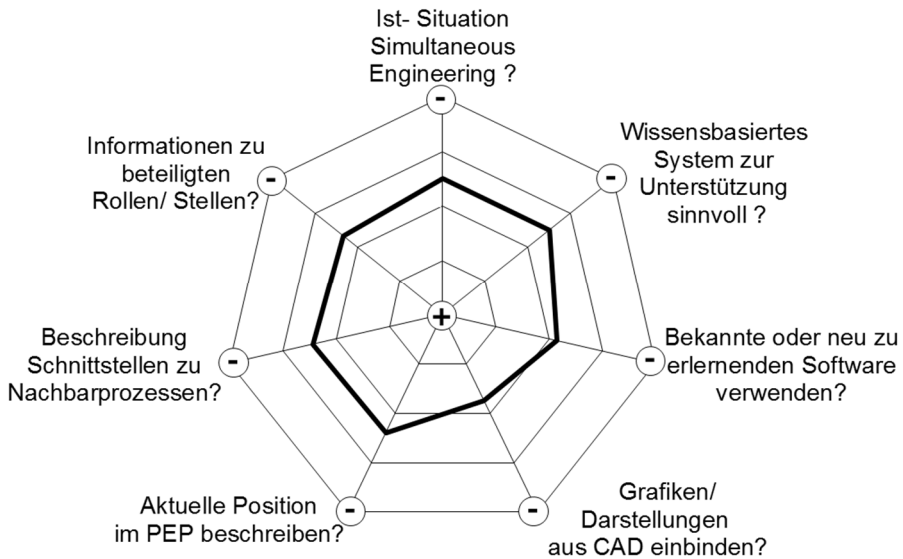


Abbildung 1: Ergebnisse der Anwenderumfrage „Wissensbasiertes System“

Die Stimmabgabe erfolgte mittels einer EvaSys Onlineumfrage unter Eingabe von TAN Codes zur Sicherstellung der Datenintegrität und des Datenschutzes. Insgesamt wurden 41 Teilnehmerstimmen ausgewertet. Abbildung 1 gibt einen Auszug der Ergebnisse wieder. Die Einschätzung zur Ist- Situation des Simultaneous Engineering zwischen Bauteil- und Betriebsmittelentwicklung erhielt in der Umfrage mittlere Werte (Skala 1 bis 5). Als wichtige Grundeinschätzung den Teilnehmern zufolge, könnte die aktuelle Situation durch ein WBS unterstützt werden, indem ein Durchschnittswert von 2,5 ermittelt wurde. Mit den verbleibenden Fragen wurde auf die Systemgestaltung abgezielt. Hinsichtlich der Implementierung sollte eine bekannte Software verwendet werden. Mit einer deutlichen Bestätigung sollten CAD Darstellungen zur Inhaltsverdeutlichung enthalten sein. Mittlere Wichtigkeit bei der Systemgestaltung erhalten die Beschreibung der beteiligten Rollen und der betrachteten Schnittstellen sowie der Nachbarprozesse. Weiterhin sollte des besseren Verständnisses halber die aktuelle Tätigkeit im Produktentwicklungsprozess (PEP) zugeordnet werden. Bevor diese Anforderungen in die prototypische Systemgestaltung einfließen, wird zunächst der konzeptuelle Systemaufbau näher erläutert.

4 Konzeptueller SysML - Systemaufbau

Unter Verwendung von SysML- Diagrammen lassen sich die Architektur, Abläufe, Anforderungen und Rollen in einem Beziehungssystem beschreiben [vgl. 3]. Vorteilhaft an dieser Modellierungsform ist die softwareunabhängige, allgemeingültige Darstellung, losgelöst von Umsetzungsrestriktionen.

Mittels eines Block Definition Diagrams (bdd) kann die Systemarchitektur des WBS anhand von Blöcken und Beziehungselementen dargestellt werden.

Die Grundelemente eines allgemeinen WBS umfassen die Wissensbasis und das Steuerungssystem [4]. Im zugrundeliegenden Fall sind dem Steuerungssystem mittels `<<satisfy>>` Beziehungen die Anforderungen aus den Phasen der Konstruktionsmethodik zugeordnet. Darunter befinden sich die Aufgabenklärung sowie die Prinzipielle, - Gestaltende- und Ausarbeitungsphase. Wie in Abbildung 2 dargestellt, ist z.B. die Prinzipielle Phase mit der Umsetzungsart als Beratungssystem in Beziehung gesetzt. Letzteres dient zur Ableitung konkreter Handlungsalternativen [4].

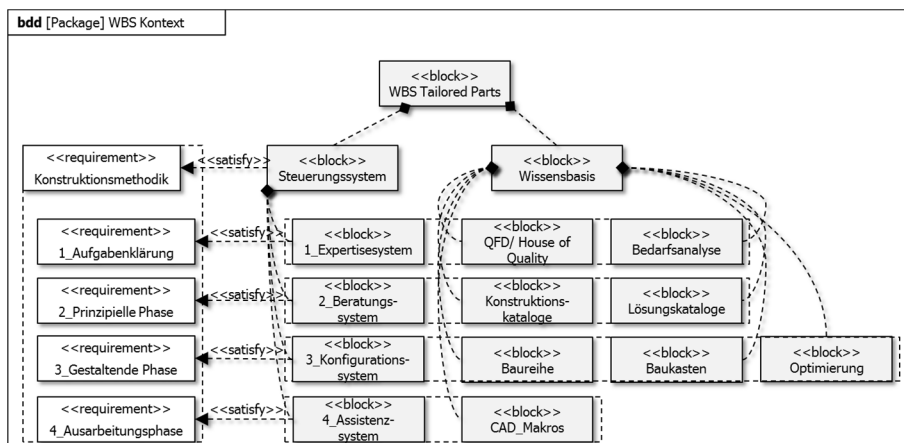


Abbildung 2: SysML- Systemarchitektur des Wissensbasierten System Kontext

Dafür greift der Anwender in dieser Phase auf Konstruktions- und Lösungskataloge der Wissensbasis zurück welche mittels einer Gewichtung dieser Ableitung gerecht werden. Dem Anwender werden in sämtlichen Konstruktionsphasen die benötigten Informationen zur Betriebsmittelentwicklung bereitgestellt um schließlich die Konstruktion an das CAD- System zu übergeben. Die in der Wissensbasis enthaltenen Module werden im Rahmen der Wissensak-

quisition mit Informationen gefüllt (siehe hierzu Abbildung 3). Da das erforderliche Expertenwissen nach Probst personengebunden ist, bedarf es geeigneter Maßnahmen um es für das Tailored Parts System nutzbar zu machen [5]. Die Wissensaufnahme wird über Fachexperten oder technische Quellen wie z.B. Normen angestoßen und ein Wissensingenieur filtert die für das WBS relevanten Wissensumfänge. Dies wird z.B. durch Experteninterviews ergänzt und auf Redundanzen und Widersprüche hin untersucht. Parallel läuft eine Wissensvalidierung um eine konsistente und aktuelle Datenbank den Anwendern zur Verfügung zu stellen. Schließlich wird durch den WBS Administrator das Wissen den Systemstrukturen zugeordnet (vgl. Use Case Diagram (UC) in Abbildung 3). Auf die nähere Beschreibung der Wissensbasisinhalte und die Verknüpfung der darin enthaltenen Module wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

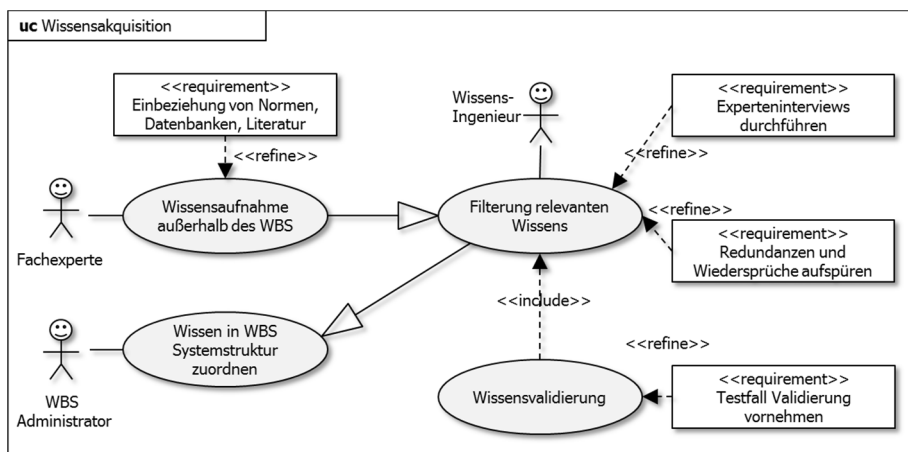


Abbildung 3: Rollen und Anwendungsfälle der Wissensakquisition

5 Prototypische Umsetzung des Systems

Im Rahmen der prototypischen Umsetzung wird das WBS zunächst nur für die Betriebsmittelentwicklung anhand des Tailored Parts Warmumformungsverfahrens der „Partiellen Austenitisierung“ pilotiert. Dabei wird eine Platine durch die ofenseitige Erwärmung gezielt mittel Keramikelementen vom Wärmeeinfluss abgeschirmt um das gewünschte Festigkeitsprofil in der Platine bzw. im Bauteil einzustellen. Zur näheren Verfahrensbeschreibung, siehe z.B. [7]. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, sind den jeweiligen Kon-

struktionsphasen verschiedene Module zugeordnet, die auf einen bestimmten Teil der Tailored Parts Wissensbasis zugreifen. Während der Anwendung wird diese fortlaufend einem Lessons Learned Prozess unterzogen, indem Anwendungserfahrungen zurückgespiegelt werden. Bei der softwareseitigen Umsetzung wurden MS Excel Sichten mit Makros gemäß den Produkterstellungsphasen von der Aufgabenklärung bis zur Gestaltungs- und Ausarbeitungsphase erzeugt. Die gemeinsame Wissensbasis baut auf den ermittelten Werten und Angaben der jeweiligen Module auf, sodass ein vernetztes und zueinander passendes Gesamtsystem entsteht.

Aufgabenklärung

Ziel dieser Konstruktionsphase ist die Überführung der Kundenbedarfe in eine Anforderungsliste. Zuerst werden die Kundenwünsche in Anlehnung an eine Hauptmerkmalsliste, wie z.B. zur Sicherstellung der Modulbauweise oder Verwendung von Normteilen in Ihrer Ausprägung (Wunsch,- Mindest- oder Festforderung) systematisch erfragt und in die Anforderungsliste übertragen. Genau diese Anforderungen werden im nächsten Modul weiterverwendet und verknüpft. Mittels einer „House of Quality“ Analyse aus dem Quality Function Deployment (QFD) werden die Wechselwirkungen zwischen den Kundenbedarfen und der möglichen Umsetzung aufgezeigt. Sowohl die Ausprägungen der Kundenwünsche (a_i), als auch die zu vergebenden QFD Gewichtungsfaktoren (f_i) werden in die darauffolgende Prinzipielle Phase bei der Verfahrens- oder Lösungsauswahl als Verbindung zu den bisherigen Eingaben übergeben.

Prinzipielle Phase

Die implementierten Konstruktions- und Lösungskataloge dienen zur Auswahlunterstützung z.B. bei der Wahl einer Fügeverbindung zwischen der abschirmenden Keramik und dem Platinenträger. Die Verbindungsauswahl ist elementar wichtig für den späteren Serieneinsatz der Vorrichtung. Wie in Abbildung 4 verdeutlicht, sind die Lösungen im Hauptteil des Kataloges kategorisiert und abgebildet. Im Zugriffsteil sind durch den Wissensingenieur, die Kriterien aus der QFD mit festgelegten Faktoren hinterlegt, sodass daraus im Anhang ein gewichtetes Ergebnis zur Auswahlunterstützung ermittelt wird. Im abgebildeten Fall sollte aufgrund des höheren Zahlenwertes das Fügeverfahren Einlegen bevorzugt werden.



Modulname: Lösungskatalog: Fügeverbindung Keramik/ Stahl														
-1 (negativ) 0 (neutral) 1 (positiv)														
Gliederungsteil	Hauptteil		Zugriffsteil (spezifische Kriterienausprägung k)										Anhang	
	Nr.	Fügeverfahren	Abbildung	Keramikbestückung gut zugänglich machen	Fertigungsleiter anzen genau einhaltbar	Kurze Anfertigungszeit sicherstellen	Verbindung der Elemente sicherstellen	Werkzeugeinsatz gering halten	Kostenoptimierte Anfertiger Fügeverbindung	Betriebskräfte und Momente einhalten	Montageart so einfach wie möglich vorsehen	Einfache Einspar/Recycling sicherstellen	Robustheit und Störanfälligkeit sicherstellen	Gewichtetes Ergebnis $\sum (f_i * a_i * k_i)$
Schwerkraft (Reiben), Formschluss oder Federkraft	4.1	Zusammensetzen												
	4.1.1	Auflegen, Aufsetzen, Schichten		1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	14,25
	4.1.2	Einlegen, Einsetzen		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17,25

Abbildung 4: WBS Lösungskatalog Fügeverbindung Keramik/ Stahl (Auszug)

Gestaltende Phase

Mit den Baukästen und Baureihen z.B. zur zweckmäßigen Dimensionierung der Stahlvorrichtung und den darin zu platzierenden Keramikelementen sowie einem Optimierungsverfahren, soll der WBS Anwender bei Routinetätigkeiten der Betriebsmittelauslegung unterstützt werden. Der Gestaltungsprozess (Siehe Abbildung 5) beginnt bei einem vom Bauteilentwickler vorgegebenen CAD Platinenumriss (L). Die Übertragung an das MS Excel WBS erfolgt Makro-basiert mithilfe von approximierten Raumpunkten um dort über eine Layoutoptimierung bzgl. Anzahl der Keramik Einzelemente (x_i) eine kostenoptimale Anordnung zu erzeugen. Sowohl die Keramikgrößen, als auch die damit verbundenen Kostenrelationen sind im WBS hinterlegt und werden über die zuvor selektierte Baureihe vorausgewählt. Die Optimierung minimiert die Kosten einer Layoutvariante unter den Nebenbedingungen, dass die gesamte Länge ausgelegt werden kann und dabei nur positive Stückzahlen betrachtet werden.

$$ZF: \text{MIN} \sum_{i=1}^m x_i * k_i \quad (i = 1, \dots, m); \quad NB: \sum_{i=1}^m x_i * l_i \geq L, x_i \geq 0$$

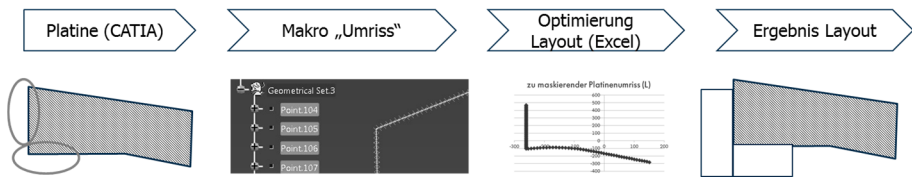


Abbildung 5: Ablauf der WBS Layoutoptimierung

Nachdem die Anordnung der Keramikelemente erfolgt ist, besteht über ein Baukastensystem der dazugehörigen Stahlvorrichtung die Möglichkeit einzelne Features zu konfigurieren. Gemäß der systemseitig hinterlegten Einteilung allgemeiner Baukästen in Grund- und Hilfsfunktionen (Muss) sowie Sonder- und Anpassfunktionen (Kann), ist der Anwender in der Lage seine Erfordernisse zu konfigurieren. Darunter fällt z.B. eine Höhenverstellbarkeit der Keramik oder die Art des Bewegungsmechanismus. Letztere ist insbesondere für den Einsatz des Betriebsmittels unter Serienbedingungen ein entscheidender Faktor. Der Mechanismus wird nur dann benötigt, wenn aus Prozesserfordernissen die Keramik unterhalb und oberhalb der Platine platziert wird. Darüber wird die Einlege- und Entnahmefähigkeit sichergestellt. Zur weiteren Ausführung, Siehe [7].

Ausarbeitungsphase

Auf der Konstruktiven Detailebene erfolgt die Schnittstelle bzw. Überführung der Konfiguration an das CAD System. Dieser Ablauf orientiert sich an der Herangehensweise von CAD- Agenten [8]. Sämtliche zuvor erstellten Konfigurationen und ausgewählten Lösungsvarianten sind darin wiederzufinden und entsprechen den Anwenderbedarfen. Zur operativen Übergabe der MS Excel Daten an das CAD System dienen Konstruktionstabellen, die eine Parametersteuerung von CAD Katalogen zulassen. Dazu bedarf es lediglich eines parametrisierten Bauteilkataloges der mit der Tabelle verbunden ist. Beispielsweise ist in CATIA ein solcher Austausch mithilfe von „Knowledge Ware“ Elementen realisierbar. Abbildung 6 verdeutlicht diese Beziehung.

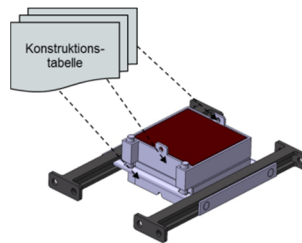


Abbildung 6: Übergabe der WBS Konfiguration mittels Konstruktionstabellen

6 Anwendungsfälle und Ausblick

Das beschriebene WBS wurde zur Entwicklung einer Tailored Parts Vorrichtung unter Serienbedingungen herangezogen. Als Anwendungsfall wurde eine B-Säulenverstärkung mit einem Beispiel Tailored Parts Bereich zugrunde gelegt. Im Anschluss an die Entwicklung wurde die Anfertigung der Vorrichtung (Siehe Abbildung 7) vollzogen. Dieses Betriebsmittel wurde mit einem Versuchsplan mit anschließender mechanischer Bauteilbewertung auf Funktionalität erprobt. Die Ergebnisse aus den Bauteilkennwerten sind wiederum ein wichtiger Wissensrückfluss in die Wissensbasis zur weiteren Entwicklung ähnlicher Anwendungsfälle. Nähere Ausführungen zu den erzielbaren Bauteileigenschaften sind in [7] enthalten.

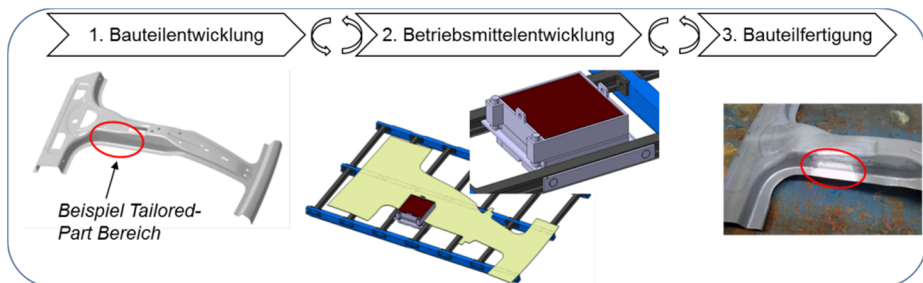


Abbildung 7: Anwendungsfall für die Tailored Parts Betriebsmittelentwicklung

Da bisher in der Pilotphase nur die Partielle Austenitisierung in der Wissensbasis implementiert ist, gilt es als Ziel, das WBS für diverse Tailored Parts Verfahren zu erweitern und somit das umsetzbare Technologiespektrum für die Bauteilentwicklung zu erweitern. Um die Bauteilentwicklung enger in den Betriebsmittelprozess einzubinden, wird angestrebt auch den Bauteilkonstruktionsprozess mit in das WBS abzubilden. Der Bauteilentwickler kann nach verschiedenen Kriterien bzw. Kundenwünschen bereits in der frühen Phase

ein für seine Randbedingungen geeignetes Verfahren auswählen, um dann iterativ den Prozess von der Gestaltung bis zur Fertigung der Bauteile mittels des WBS zu verfolgen.

Literatur

- [1] Breitsprecher, T.; Westphal, C.; Meintker, N.; Wartzack, S.: „Formalisierung und Verwaltung von Entwicklungswissen im Kontext des Integrierten Produktmodells“, DFX- Symposium, 2011
- [2] Mansour, M.: „Informations- und Wissensbereitstellung für die lebenszyklusorientierte Produktentwicklung“, Vulkan- Verlag, Braunschweig, 2006
- [3] Stechert, C.: „Modellierung komplexer Anforderungen“, Dr. Hut Verlag, 2010
- [4] Bodendorf, F.: „Daten- und Wissensmanagement“, Springer Verlag, 2006
- [5] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: “Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen“, Gabler, Wiesbaden, 2010
- [6] Heinemann, S.; Haars, K.; Kotzian, M.; Vietor, T.: „Gezielte Eigenschaftseinstellung von hochfesten Stählen, mittels partieller Austenitisierung, für den Einsatz in der Großserie“, 7. Erlanger Workshop Warmumformung, 2012
- [7] Heinemann, S.; Vietor, T., Dröder, K.: „Tailored Heat Treated Blanks for Mass Series Applications“, IDDRG Conference Proceedings, 2014
- [8] Kratzer, M.; Binz, H.; Roth, D.: „Wissensstruktur zur Integration von Konstruktionswissen in agentenbasierte Unterstützungssysteme“, DFX- Symposium, 2010

Der „Generative Design Approach“ im Kontext von technischer Konfiguration

Bastian Sauthoff, Paul Christoph Gembarski und Roland Lachmayer

*Institut für Produktentwicklung und Gerätebau
Leibniz Universität Hannover*

Abstract

The computer-aided configuration of technical systems is a powerful tool for companies to reduce the time to market by an automatisation of subtasks of the design process. Compared to the expert systems of the 1980s in the context of parametric design today configuration can be used to vary subsections of the product design. In this paper the "Generative Design Approach" is presented with regard to the configuration of technical systems. In the context of this approach the design of a product is divided in sub design areas. Different design variants of such a section are modelled by parametric sub models and stored in a library. The configuration model of the product is assembled and varied by this design elements. The approach is illustrated instancing a bridge crane.

Keywords: configuration, parametric modeling, knowledge-based engineering

1 Einleitung

Die rechnergestützte Konfiguration technischer Systeme bietet einem Unternehmen das Potential zur Verkürzung der time-to-market durch die Automatisierung von (Teil-)Aufgaben im Konstruktionsprozess. Im Gegensatz zu

den Expertensystemen der 1980er Jahre, innerhalb derer die einzelnen, wohl-definierten Komponenten eines Produktes ebenso wie ihre Beziehungen modelliert und für die Konfiguration bereitgestellt worden sind, erlauben moderne Konfiguratoren im Zusammenhang mit parametrischer Konstruktion auch die Beeinflussung von Geometrieelementen innerhalb einer Komponente [1,2].

Für die technische Konfiguration sind sowohl die Repräsentation des Konstruktionswissens zur Ableitung der Gestalt, auch als Wissensbasis bezeichnet, als auch die Möglichkeit zur Akquise von Wissen zur Anpassung an neue Anforderungen essentielle Bestandteile [3].

Die Abbildung von hochdynamischen Produktsystemen, die häufigen Änderungen sowie einer großen Variationsbandbreite unterliegen, und Systemen, die aus einer großen Anzahl änderbarer Komponenten bestehen und dementsprechend über eine große Anzahl von Konstruktionsregeln beschrieben werden, stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. Darüber hinaus ist der Einsatz solcher Konfigurationssysteme in den frühen Phasen der Produktentwicklung nur eingeschränkt möglich, weil hier üblicherweise nicht ausreichend explizites Wissen für eine hinreichende Modellierung vorhanden ist, um z.B. für einen Konzeptentscheid valide Daten zu liefern. Eine Lösung für solche Systeme, bei denen insbesondere nicht ausreichend Konstruktionsregeln definiert werden können, stellen fallbasierte Konfigurationssysteme dar [4].

2 Grundprinzipien der technischen Konfiguration

Expertensysteme und Konfiguratoren haben grundsätzlich einen ähnlichen Aufbau. Sie bestehen aus einer Wissensbasis, in der das explizite Wissen formalisiert ist, einer sog. Inferenzmaschine, welche dazu dient, aus der Wissensbasis durch Schlussfolgerungen neue Aussagen oder Konfigurationen abzuleiten, und einem Zugriffsteil, durch den die Kommunikation mit dem Nutzer für Datenein- und -ausgabe realisiert wird.

2.1 Inferenzmechanismen

Grundsätzlich sind drei Strategien erkennbar, mit denen ein Inferenzmechanismus aufgebaut werden kann:

- Regelbasiert: Prozeduraler Ablauf von Wenn-Dann-Beziehungen, die in keinem kausalen Zusammenhang stehen müssen (aber können; Regeln können für das Auslösen untergeordneter Regeln eingesetzt werden).

-
- **Modellbasiert:** Die Einschränkung des Lösungsraumes erfolgt auf Basis eines Produktmodells, welches aus den Systemkomponenten und seinen Beziehungen besteht. Die Beziehungen können z.B. physikalisch oder logisch modelliert werden (constraint-based) oder auf Basis von Ressourcenerbereitstellungs- und -verzehrfunctionen [6].
 - **Fallbasiert:** Es werden keine expliziten Konfigurationsregeln definiert. Schlussfolgerungen werden auf Basis von bereits gespeicherten Lösungen / Konfigurationen (Fällen) getroffen.

2.2 Variation von geometrischen Strukturen mittels Konfiguration

Zur Beschreibung von geometrischen Strukturen innerhalb eines parametrischen CAD-Modells stehen nach [7] grundsätzlich 4 Arten von Parametern zur Verfügung, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Änderung der Produktgestalt haben: Geometrieparameter beschreiben die Abmaße, Lage, Orientierung sowie Anzahl einer Komponente. Änderungen sind im Vorfeld durch Constraints oder Regeln planbar, die Struktur der Abhängigkeiten ist eher flach ausgeprägt. Topologieparameter hingegen bilden konzeptionelle oder architektonische Änderungen ab, die meist große Bereiche des Modells betreffen, z.B. durch Wegfall von Schnittstellen oder Komponenten. Plausibilität und Modellstabilität sind durch vielschichtige Abhängigkeiten mit anderen Parametern nur mit wachsendem Aufwand durch Regeln oder Constraints kontrollierbar [8]. Bei physikalischen sowie Prozess-/Technologieparametern ist dies ähnlich.

3 Gestaltvariationen mittels „Generative Design Approach“

Um konzeptionelle Änderungen bei der technischen Konfiguration realisieren zu können, müssen demnach die Abhängigkeiten zwischen den Parametern vereinfacht, bzw. aufgelöst werden. Aufgrund der Verknüpfung von Funktion, Physik und Gestalt ist dies durch eine Optimierung von Constraints und Regeln nur partiell möglich. Deshalb wird in diesem Beitrag ein Ansatz vorgeschlagen, mit dem die Struktur eines parametrischen Modells im Vorfeld so aufgebaut werden kann, dass die Abhängigkeiten auf eine spezifische Konfigurationsaufgabe angepasst und möglichst flach ausgebildet sind.

Kern des Ansatzes ist es, ein Produkt in Gestaltungszonen einzuteilen, in denen für die Konfiguration mögliche Gestaltausprägungen möglichst unabhängig voneinander und von der inneren Struktur der Komponenten modelliert werden können. Für jede Gestaltungszone werden anschließend Gestaltungselemente erzeugt, die konzeptionell unterschiedliche konstruktive Lösungen

abbilden. Alle Geometrieparameter, die lokal auf die Gestaltungszone beschränkt sind, werden nur innerhalb der zugehörigen Gestaltelemente definiert und durch Constraints und Regeln miteinander in Beziehung gesetzt. Die Kompliziertheit der Struktur der Abhängigkeiten wird so von der System- auf Elementebene transformiert. Diejenigen Parameter, welche mit übergeordneten Führungsparametern in Beziehung stehen, werden für alle Elemente einer Zone einheitlich als Konfigurationsparameter definiert. Anders ausgedrückt: Alle Gestaltelemente einer Zone verfügen über denselben Konfigurationsparametersatz, übersetzen diesen jedoch in unterschiedliche Gestaltausprägungen.

Die Konfigurationsparametersätze aller Gestaltungszoneen werden zentral über ein Skeleton angesteuert, welches selbst keine Gestaltausprägung besitzt. Darüber hinaus enthält das Skeleton Führungsparameter für das Produkt selbst, wie auch für die Lage und Orientierung jeder Gestaltungszone. Sowohl physikalische als auch Prozess-/Technologieparameter werden ebenfalls mit dem Skeleton definiert. Eine Transformation auf die jeweiligen Gestaltungszoneen erfolgt durch Constraints und Regeln auf Skeletonebene. Zur Abbildung konzeptioneller Gestaltvarianten ist jedem Gestaltelement wiederum ein bestimmter Wertebereich eines jeden Technologieparameters zugeordnet. Das Element kann nur dann verwendet werden, wenn dieser Wertebereich aktiv ist.

Die Produktgestalt bildet sich letztendlich über die Aggregation von Gestaltelementinstanzen an definierte Positionen im Skeleton.

4 Anwendungsbeispiel Kranbrückenträger

Der Ansatz sowie dessen Anwendung in einem parametrischen CAD-System werden anhand eines Modells zur Konfiguration eines Kranbrückenträgers verdeutlicht. Bei Laufkränen werden diese Stahlbaukonstruktionen zur Führung der Laufkatze und zur Übertragung der Betriebskräfte auf die Laufbahn eingesetzt. Je nach den kundenspezifischen Anforderungen gibt es unterschiedliche Konzepte für die Anordnung der Laufkatze, der Abstützung auf der Laufbahn sowie der konstruktiven Gestaltung des Kranbrückenträgers selbst. In Abbildung 1 sind exemplarisch drei dieser Konzepte vorgestellt: Bei einem Einträger-Deckenkran ist die Laufkatze unterhalb des Kranbrückenträgers angeordnet. Die Laufbahn befindet sich an der Decke und der Kranbrückenträger ist über zwei Führungen von dieser abgehängt. Der Kranbrückenträger ist als I-Profil konstruiert. Das Konzept des Einträger-Laufkrans ist ähnlich, allerdings ist die Laufbahn seitlich angeordnet. Die Abstützung auf den Schienen der Laufbahn erfolgt durch zwei Querträger. Der Kranbrückenträger ist

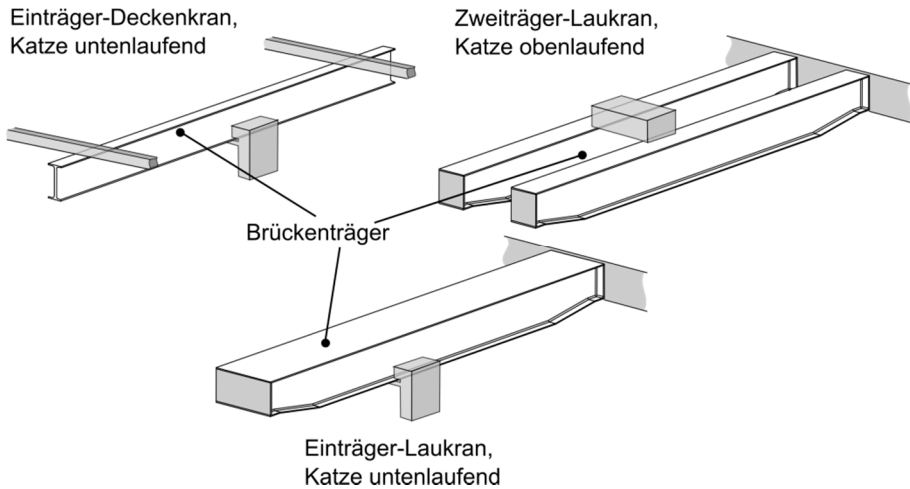


Abbildung 1: Verschiedene Konzepte eines Kranbrückentragers für einen Laufkran

als geschweißter Kastenträger ausgeführt. Bei einem Zweiträger-Laukran befindet sich die Laufbahn ebenfalls seitlich. Dieser besteht jedoch aus zwei geschweißten Kastenträgern. Die Laufkatze ist obenlaufend ausgeführt und stützt sich seitlich auf den Kastenträgern auf Schienen ab. Alle drei Konzepte sind grundlegend verschieden, weisen jedoch konstruktiv ähnliche Merkmale auf.

Die Auswahl des Krankonzeptes für einen kundenspezifischen Anwendungsfall erfolgt auf Basis einer Reihe von Anforderungen: Die Ausführung der Laufbahn ist anhängig von der Hallenkontur und dem zur Verfügung stehenden Bauraum. Das konstruktive Konzept des Kranbrückentragers und der Laufkatze wird durch die maximale Hublast, der Dynamik sowie dem erforderlichen Fahrweg bestimmt. Hinzu kommen eine Reihe von konfigurierbaren Komponenten wie beispielsweise die Art des Hubzeuges, das als Seil- oder Kettenzug ausgeführt werden kann.

Die mechanischen Eigenschaften des Gesamtsystems sind von einer Vielzahl von Parametern abhängig, was die Formulierung von Regeln zur Konfiguration dieser Konstruktion erschwert. Erst durch einen iterativen (Optimierungs-)Prozess erfolgt eine kundenindividuelle Anpassung. Bei dem vorgestellten Kranbrückentragern sind dies hauptsächlich Festigkeit, Steifigkeit sowie Masse. Diese sind sowohl von physikalischen Parametern als auch von Geometrie-, Topologie- und Technologieparametern abhängig.

4.1 Modellierung des Skeletons

Bezogen auf unseren Modellierungsansatz wird der Kranbrückenträger zunächst in Gestaltungszonen eingeteilt. Die Anzahl dieser Zonen ist abhängig vom Detaillierungsgrad des Konfigurationsmodells: Werden nur wenige Gestaltungszonen verwendet, steigt die Kompliziertheit der einzelnen Gestaltelemente, da sehr viele Parameter und Zwangsbedingungen benötigt werden, um unterschiedliche konstruktive Varianten abzubilden. Wird jedoch eine große Anzahl Gestaltungszonen definiert, werden sehr viele Gestaltelemente benötigt, wodurch die Parametrierung der Schnittstellen zunehmend komplizierter wird. Das hier vorgestellte Modell repräsentiert hauptsächlich mechanische und geometrische Eigenschaften der Kranbrückenträger. Außerdem weisen die verschiedenen Kranbrückenträgerkonzepte trotz unterschiedlicher konstruktiver Ausführung überschaubare geometrische Freiheitsgrade auf, was auf die Restriktionen einer geschweißten Blechkonstruktion zurückzuführen ist. Daher wird die Anzahl der Gestaltungszonen gering gehalten.

Gestaltungszonen
des Brückenträgers

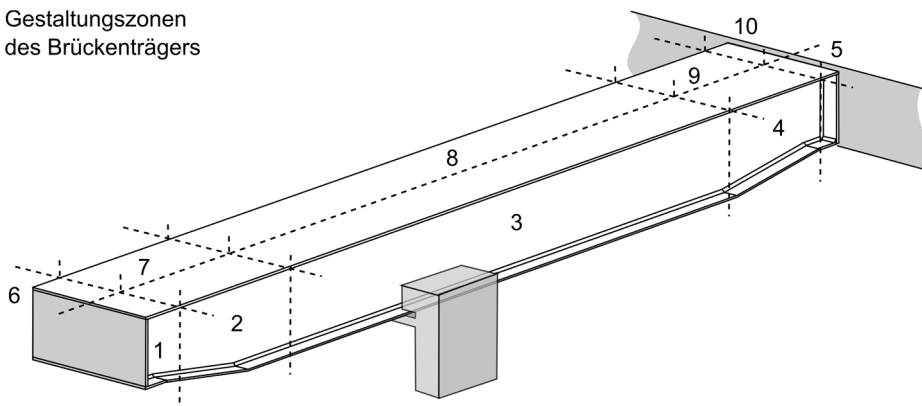


Abbildung 2: Gestaltungszonen des Kranbrückenträgers

Es werden insgesamt zehn Zonen definiert (Abbildung 2). Der Kranbrückenträger wird zunächst in der Mittelebene in zwei Bereiche (Zonen 1-5 sowie 6-10) eingeteilt, um zwischen Ein- und Zweiträgervarianten unterscheiden zu können. Jeder Bereich besteht aus zwei Anschlusszonen, um die Verbindung zu den Laufbahnen zu modellieren (Zonen 1, 5, 6, 10). Der mittlere Bereich der Kranbrückenträger, in dem sich die Bahn der Laufkatze befindet, wird ebenfalls als eigene Gestaltungszone definiert (Zonen 3, 8). Die Verbindung dieser mittleren Bereiche mit den Anschlusszonen erfolgt über die Gestaltungszonen 2 und 7 sowie 4 und 9. Diese Übergangszonen ermöglichen

beispielsweise die Modellierung von Änderungen der Profilabmaße des Kranbrückenträgers, wie der Abschrägung in der in Abbildung 2 gezeigten Variante. Anhand der definierten Gestaltungszonen kann dann das Skeleton entwickelt werden (Abbildung 3).

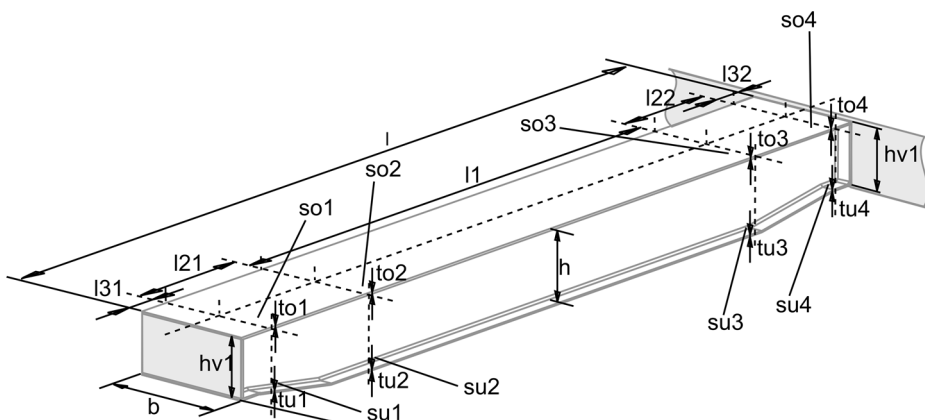


Abbildung 3: Skeleton des Kranbrückenträgers

Dieses enthält zunächst die globalen Geometrieparameter des Kranbrückenträgers, wie Länge (l), Breite (b) sowie die maximale Höhe (h). Weiterhin werden Geometrieparameter für die Schnittstellen der einzelnen Gestaltungszonen definiert: Die Konfiguration der Längsteilung des Trägers erfolgt über vier Lageparameter (p_{11} - p_{14}), über die die fünf Abmaße für die Länge der Gestaltungszonen ($l_1, l_{21}, l_{22}, l_{31}, l_{32}$) bestimmt werden. Die Lageparameter weisen einen Definitionsbereich von 0...1 auf. Die Abmaße werden anhand folgender Formeln ermittelt:

$$l_1 = l \cdot p_{11}$$

$$l_{21} = \frac{(l-l_1)}{((1+p_{12}) \cdot (1+p_{13}))}$$

$$l_{31} = p_{13} \cdot l_{21}$$

$$l_{22} = \frac{(l_1+l_{31}+l_{21})}{(1+p_{14})}$$

$$l_{32} = p_{14} \cdot l_{22}$$

Dadurch, dass die Abmaße für die Länge der Gestaltungszonen nicht direkt als Konfigurationsparameter zur Verfügung stehen, wird sichergestellt, dass bezogen auf die Gesamtlänge des Trägers (l) eine gültige Einteilung erfolgt und die Summe der Zonenlängen die Gesamtlänge nicht überschreitet. Weiterhin wird die Höhe an den Enden des Kranbrückenträgers (h_{v1}) als Produkt der Höhe (h) mit einem Faktor (p_{hv1} , Wertebereich 0...1) bestimmt. Darüber hinaus spielen die Blechstärken für einen kontinuierlichen Übergang zwischen den Gestaltungszonen eine wichtige Rolle. Deshalb wird für jeden Übergangsbereich je für Ober- und Untergurt ein Geometrieparameter für die Blechstärke (to_1 - to_4 , tu_1 - tu_4) eingefügt. Für die Breite der Schweißnähte wird analog vorgegangen (so_1 - so_4 , su_1 - su_4).

Neben den Geometrieparametern für die globalen Abmaße des Brückenträgers und den Gestaltungszonen werden für jede Gestaltungszone selbst eine Reihe von normierten Geometrieparametern definiert. Diese weisen ebenfalls einen Wertebereich von 0...1 auf, werden jedoch von Gestaltelementen für die jeweilige Zone unterschiedlich interpretiert. Für die Beschreibung von Rundungen enthält jede Zone beispielsweise einen Parameter. Während dieser bei einem Gestaltelement mit Aussparungen für die Modellierung von der Aussparungsverrundung eingesetzt wird, wird bei einem anderen Element ein Biegeradius durch den Parameter beschrieben. Auf diese Weise wird mit einem festen normierten Parametersatz für jede Zone die Beschreibung unterschiedlicher konstruktiver Lösungen ermöglicht. Dabei gilt: Je komplizierter die Gestalt einzelner Gestaltelemente modelliert ist, desto mehr Geometrieparameter muss die entsprechende Zone im Skeleton beinhalten.

Weiterhin verfügt das Skeleton über einen Konfigurationsparameter für jede Gestaltungszone, der den Wechsel zwischen unterschiedlichen Gestaltelementen und damit unterschiedlichen konstruktiven Lösungen abbildet (Abbildung 4). Alle zur Konfiguration zur Verfügung stehenden Gestaltelemente sind zunächst in einer Bibliothek abgelegt und je einer Zone fest zugeordnet. Die Konfigurationsparameter jeder Gestaltungszone weisen einen festen Wertebereich auf, der anhand der Anzahl der jeweiligen Gestaltelemente in der Bibliothek in Bereiche unterteilt wird. Wird der Wert eines solchen Parameters so verändert, dass dieser einem anderen Gestaltelement entspricht, wird das bestehende Element im Modell mit dem entsprechenden Gestaltelement ersetzt. In Abbildung 4 ist die Elementvariation exemplarisch für die Gestaltungszone 3 dargestellt: Das geschlossene Trägerelement wird durch ein Element mit Aussparungen ersetzt.

Variation eines
Gestaltelementes

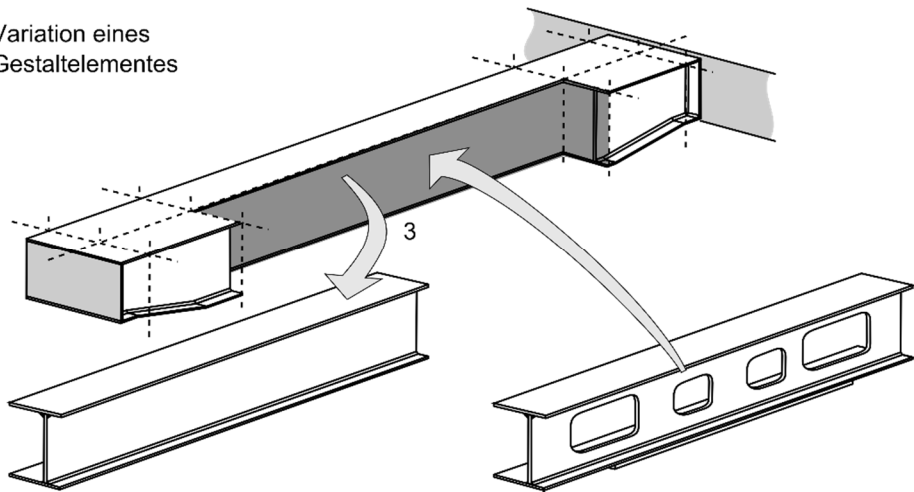


Abbildung 4: Variation eines Gestaltelementes

Um konzeptionell ungültige Kombinationen auszuschließen, wie beispielsweise die Verwendung von Gestaltelementen für Einträger- mit denen von Zweiträgervarianten, wird außerdem ein Konzeptparameter eingeführt. Jedes Gestaltelement in der Bibliothek wird einem Konzept zugeordnet und die Auswahl bei der Variation der Konfigurationsparameter der Gestaltungszonen auf diejenigen Elemente beschränkt, die dem aktuellen Konzeptparameter entsprechen.

4.2 Modellierung der Gestaltelemente

Für jede Gestaltungzone werden alle konstruktiven Varianten als Gestaltelemente modelliert und in der Bibliothek abgelegt. Dadurch werden sowohl konzeptionelle Varianten des Kranträgers abgebildet, als auch konstruktive Varianten für die jeweiligen Gestaltungszonen selbst. Ein Gestaltelement besteht aus einem parametrischen CAD-Modell, das über eine Schnittstelle zum Skeleton in Form von identischen Parametersätzen besteht. Dadurch kann jedes Gestaltelement unabhängig vom Konfigurationsmodell erstellt und mit Konstruktionsregeln ausgestattet werden. Wird das Gestaltelement in einem Konfigurationsmodell des Kranbrückenträgers verwendet, wird eine Kopie aus der Bibliothek erstellt und die Werte der zugehörigen Parameter der Gestaltungszone an das Gestaltelement übergeben. So wird das Element an die jeweiligen geometrischen Randbedingungen angepasst. In Abbildung 5 sind zwei Gestaltelemente der Zone 3 des Kranbrückenträgers dargestellt, die unterschiedliche Konzeptvarianten abbilden. Die Parameter des Gestaltelemen-

Gestaltelement für den Einträger-Laufkran

Gestaltelement für den Zweiträger-Laufkran

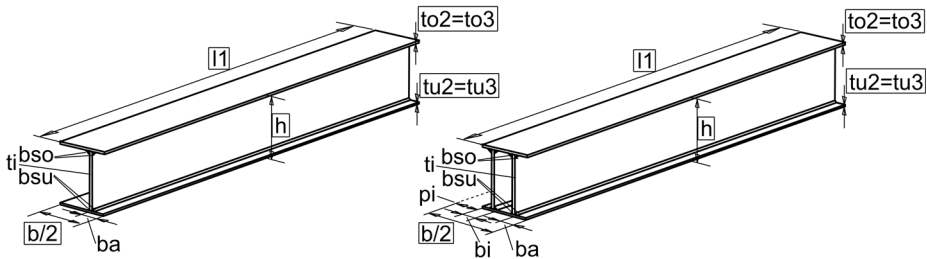


Abbildung 5: Gestaltelemente für Gestaltungszone 3 verschiedener Brückenträgerkonzepte

tes, die aus dem Skeleton übernommen werden, sind mit einem Rahmen gekennzeichnet. Alle anderen Parameter sind über Beziehungen und Konstruktionsregeln sowie normierten Geometrieparametern der Gestaltungszone mit diesen Parametern gekoppelt.

Anhand des Beispiels kann die unterschiedliche Interpretation der Skeletonparameter durch die Elemente verdeutlicht werden: Die Breite der Gestaltungszone 3 ($b/2$) wird beim Einträger-Laufkran direkt für die Breite des Ober- und Untergurt verwendet. Beim Zweiträger-Laufkran jedoch bestimmt $b/2$ die Breite des Gestaltelementes, wobei der Zwischenraum der Träger durch den Parameter p_i als Anteil von $b/2$ beschrieben wird. Bei beiden Varianten wird der Überhang von Ober- und Untergurt auf der Außenseite durch den Parameter ba beschrieben. Das Gestaltelement für den Zweiträger-Laufkran verfügt jedoch zusätzlich noch über einen Parameter b_i . Zur Bestimmung der Breite der Schweißnähte b_{so} und b_{su} wird eine prozedurale Konstruktionsregel hinterlegt: Basierend auf der aktuellen Geometrie des Gestaltelementes werden zunächst die technologisch minimal und maximal mögliche Breiten bestimmt und innerhalb des ermittelten Bereiches über den Skeletonparameter für die Schweißnahtbreite einen Wert bestimmt. Anhand einer hinterlegten Datenbasis wird der Wert dabei auf einen technologisch sinnvollen Wert gerundet. Die Konstruktionsregel wird erneut aufgerufen, wenn im Skeleton eine Parameteränderung erfolgt.

Ähnlich wird bei konstruktiv unterschiedlichen Varianten desselben Brückenträgerkonzeptes verfahren. In Abbildung 6 sind beispielhaft Kastenträgervarianten mit und ohne Aussparungen gezeigt.

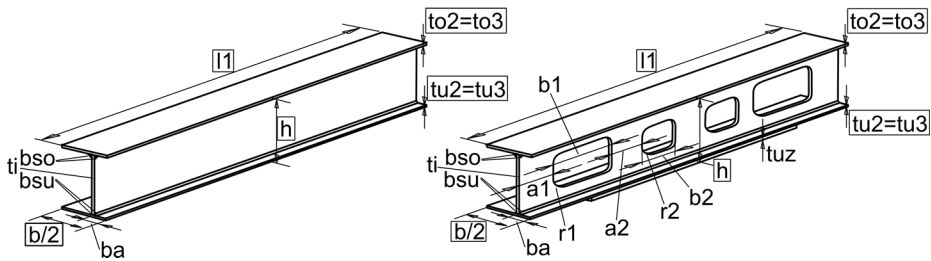


Abbildung 6: Gestaltelemente für Gestaltungszone 3 unterschiedlicher konstruktiver Varianten des Kastenträgers.

Zur Modellierung der Aussparungen wird zunächst von einer symmetrischen Anordnung der kleinen und großen Aussparungen zur Mittelebene ausgegangen. Zur Beschreibung der Geometrie werden sieben Konfigurationsparameter (gp_1 - gp_7) für die Gestaltungszone 3 eingeführt. Diese haben alle den Wertebereich von 0...1. Zunächst wird die Breite der großen Aussparung (b_1) in Abhängigkeit von $l_1/2$ und gp_1 bestimmt. Anhand der verbleibenden Länge, gp_2 sowie einem Faktor für einen Mindestabstand wird dann b_2 ermittelt. Die Abstände a_1 und a_2 werden wiederum über die verbleibenden Längen und die Parameter gp_3 und gp_4 berechnet. Für die Höhe der Aussparungen sowie die Verrundungen wird auf dieselbe Weise verfahren. Die sieben Konfigurationsparameter gp_1 - gp_7 werden durch das Gestaltelement ohne Aussparungen nicht interpretiert. Kompliziertere Varianten verwenden jedoch Teile oder den gesamten Satz Konfigurationsparameter für jeweils individuelle Konstruktionsregeln zur Bestimmung fehlender Geometrieparameter. Wird ein Gestaltelement im Brückenträgermodell ersetzt, wird so sichergestellt, dass ein gültiges Geometriemodell erstellt wird, dass auch bei einer Parametervariation stabil bleibt.

5 Fazit und Ausblick

Es wurde dargestellt, in wie weit die technische Konfiguration von Produkten mit dem Vorgehen des in Hannover entwickelten GDA gekoppelt werden kann. Hierbei wird auf zwei Grundprinzipien für die Ableitung neuer Konfigurationen zurückgegriffen. Auf der einen Seite wurde die Verwendung von regelbasierten Zusammenhängen vorgestellt, auf der anderen Seite wurden Modellzusammenhänge im Zuge von Constraints dargestellt.

Ein weiterer denkbarer Anwendungsfall des GDA ist im Zusammenhang mit der fallbasierten Konfiguration zu sehen. Dabei ist folgendes Szenario denkbar: In den Konfigurator wird ein definiertes Anforderungsprofil geladen,

mit dem eine gegebene Fallbasis abgeglichen wird. Findet sich hier ein Treffer, so ist der Konfigurationsprozess beendet und das vorhandene Ergebnis wird ausgegeben. Existiert kein passender Fall, werden aus der Fallbasis diejenigen ausgewählt, die den best fit für die jeweilige Anwendung ergeben. Danach beginnt der Inferenzmechanismus solange die einzelnen Parameter zu variieren, bis die Zielerreichung maximal oder vollständig ist. Hierbei ist die zu lösende Herausforderung, dass innerhalb des sich ergebenden Multi-Kriterien-Optimierungsproblems lokale Minima und Maxima ausgeschlossen werden müssen. Eine potenzielle Lösung mittels genetischer Algorithmen, mit der dieses sichergestellt werden kann, wird derzeit am IPeG untersucht.

Literatur

- [1] Sabin, D.; Weigel, R.: "Product Configuration Frameworks – A Survey", IEEE Intelligent systems, Juli/August 1998, S. 42-49.
- [2] Hirz, M.: "Integrated Computer-aided design in automotive development", Springer-Verlag, Berlin, 2013
- [3] Hvam, L.; Mortensen, N.H.; Riis, J.: "Product Customization", Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [4] Petersen, J.: "Ein baukastenartiges Expertensystem-Architekturmodell mit fuzzy-fallbasierter Schlussfolgerungskomponente", VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996
- [5] Sauthoff, B.; Lachmayer, R.: "Generative Design Approach for Modeling of Large Design Spaces", Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2014), Aalborg, Denmark, February 4th - 7th, 2014
- [6] Heinrich, M.; Jüngst, E.W.: "A Resource-Based Paradigm for the Configuring of Technical Systems from Modular Components.", IEEE Intelligent systems, 1991, S. 257-264
- [7] Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: "CAx für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung", 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2009
- [8] La Rocca, G.: „Knowledge Based Engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design.“, Advanced Engineering Informatics 26, 2012, S. 159-179

Konzept zur automatischen Bauteilerkennung innerhalb der FE-Software-Umgebung mittels Künstlichen Neuronalen Netzen

Tobias C. Spruegel und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

The Finite Element Method is a very powerful tool to enhance product quality and to reduce unnecessary and costly iterations during the product development process. However numerous errors can occur during the FE simulation. A promising way to realize precise and quick FE simulations is the comparison of the FE solution with analytical machine elements equations. This is only possible if the components in an assembly can be identified automatically. A promising way is to use the presented approach in this paper for part recognition with artificial neural networks and the use of detection surfaces.

Keywords: automatic part recognition, Artificial Neural Network, ANN, FEM, detection surface

1 Einleitung

Die Finite-Elemente-Methode trägt aktuell wesentlich zur Verkürzung der gesamten Produktentwicklungszeit bei und stellt dabei in Kombination mit CAD eines der leistungsfähigsten Verfahren dar, um die Ingenieurarbeit in der Produktentwicklung zu rationalisieren und qualitativ zu optimieren [1].

Der Produktentwickler sieht sich zusehens mit der Forderung nach verkürzten Entwicklungszeiten konfrontiert, die u. a. durch die Reduzierung unnötiger Iterationen im Produktentwicklungsprozess erreicht werden können. Aus dieser Forderung einerseits und den softwareseitigen Möglichkeiten andererseits erwachsen enorme Möglichkeiten zur Optimierung der virtuellen Produktentwicklung. Ein vielversprechender Weg zur Vermeidung von Iterationen besteht in der konstruktionsbegleitenden Berechnung mittels modernen FEA-Programmen. Aktuelle Forschungsvorhaben zielen daher auf die Plausibilitätsprüfung von FE-Ergebnissen durch den Abgleich mit Modellen der Technischen Mechanik ab (z. B. analytische Gleichungen für Maschinenelemente). Für automatisierte Nachrechnungen müssen Bauteile innerhalb der FE- oder CAD-Umgebung möglichst automatisch erkannt werden. Nur so können die passenden Berechnungen im Hintergrund erfolgen und für einen Abgleich mit der FE-Lösung herangezogen werden.

2 Ableitung des Handlungsbedarfs

In der VDI Richtlinie 2230 wird insbesondere bei kritischen Schraubenverbindungen auf die Notwendigkeit von experimentellen und/oder numerischen Untersuchungen zur Verifikation der analytischen Berechnungsergebnisse verwiesen [2]. Eine numerische Simulation sollte daher mit den Ergebnissen aus einer analytischen Berechnung verglichen werden können.

Trotz der Notwendigkeit der automatischen Bauteildetektion zur weiteren Nutzung in automatisierten Berechnungen (sowohl analytisch als auch numerisch) gibt es aktuell keine Möglichkeit zur sicheren automatisierten Erkennung von Bauteilen in CAD-Baugruppen. Gleiches gilt für die Detektion von Bauteilen innerhalb der FEA-Software-Umgebung. Mit dem hier dargestellten Konzept zur automatisierten Bauteilerkennung können unterschiedliche Bauteile innerhalb der FE-Software-Umgebung erkannt werden. Es findet hierbei ein Abgleich mit zuvor eingelesenen Bauteilen mittels Künstlichen Neuronalen Netzen statt. Zunächst wird auf die prinzipiellen Architektur und die Grundlagen von Künstlichen Neuronalen Netzen eingegangen und darauf aufbauend das Konzept zur automatisierten Bauteilerkennung vorgestellt.

3 Künstliche Neuronale Netze (KNN)

Künstliche Neuronale Netze haben zum Ziel die neuronalen Strukturen von Lebewesen nachzubilden. Anstelle von den natürlich vorkommenden Axonen und Dendriten wird die Verbindung zwischen den künstlichen Neuronen mit Gewichtungen modelliert [3]. Aufgrund des vielseitigen Aufbaus können KNN in diversen Aufgabenfeldern eingesetzt werden. Nach [4] sind dies u. a. An-

wendungsfelder der Klassifikation, Rauschminderung, Bildoptimierung, Zeitreihenvorhersage, Funktionsapproximierung und Regression. In diesem Beitrag werden KNN verwendet, da sich mit ihnen große Datensätze verarbeiten lassen und eine individuelle Anpassung der Netzeigenschaften auf die vorliegenden Datensätze möglich ist.

3.1 Architektur von KNN

Künstliche Neuronale Netze sind aus einer Eingabe- und Ausgabeschicht aus künstlichen Neuronen und mindestens einer verdeckten Neuronenschicht zwischen diesen aufgebaut. Die Anzahl der Neuronen in der Eingabeschicht ist identisch mit der Anzahl an Eingabeparametern. Dies gilt auch für die Neuronen in der Ausgabeschicht und die Ausgangsgrößen des KNN. Die Anzahl der Neuronen in der Zwischenschicht und die Anzahl an verdeckten Zwischenschichten sind beliebig anpassbar und bestimmt maßgeblich die Prognosequalität des Netzes. Dieser prinzipielle Aufbau kann Bild 1 entnommen werden. Die Verbindungen zwischen den Neuronen besitzen unterschiedliche Gewichtungen und müssen während dem Training des KNN berechnet werden.

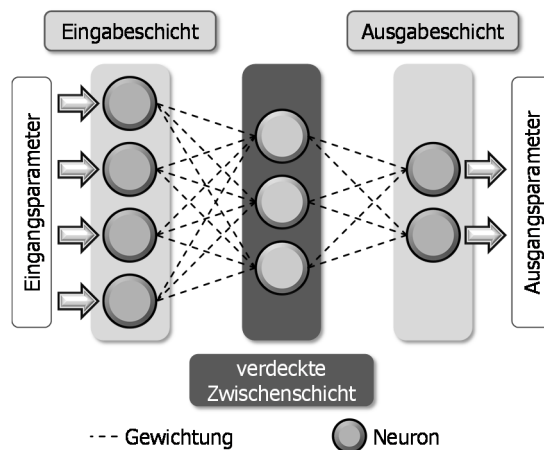


Bild 1: Struktur eines KNN mit einer verdeckten Neuronenschicht mit 3 Neuronen, 5 Eingangs- und 2 Ausgabegrößen

Die interne Berechnung der Ausgabegrößen des KNN ist abhängig von der verwendeten Transferfunktion in den jeweiligen Neuronen. Eine vielseitige und häufig genutzte Transferfunktion ist die Tangens Hyperbolicus Funktion. Die Berechnung innerhalb des KNN ist exemplarisch für ein Neuron in Bild 2 dargestellt.

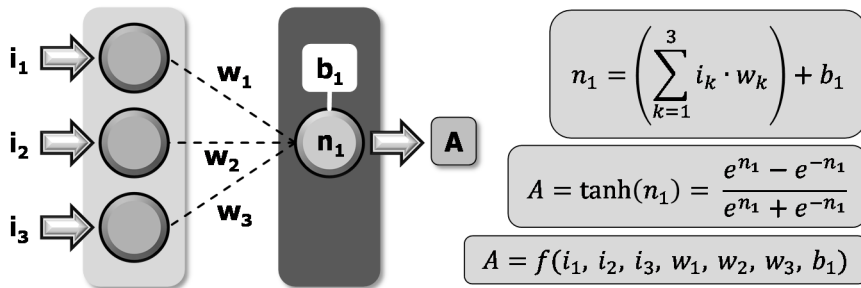


Bild 2: mathematischer Zusammenhang eines KNN mit *tanh*-Funktion

Im ersten Schritt der Berechnung des KNN werden die Eingangsgrößen des entsprechenden Neurons mit den Gewichtungen w multipliziert und dem statischen Biaswert des Neurons aufsummiert. Der Biaswert ermöglicht es den Wert der Zwischenvariable n_1 statisch zu beeinflussen und es kann somit eine weitere Anpassung des Verhaltens des einzelnen Neurons erreicht werden. Im zweiten Schritt wird die so berechnete Summe n der Transferfunktion übergeben und der Ausgabewert des Neurons wird ermittelt. Dieser Vorgang wird für jedes der Neurons separat berechnet. So können durch die Hintereinander- und Parallelschaltung von Neuronen mit unterschiedlichen Transferfunktionen sehr komplizierte und nichtlineare Zusammenhänge abgebildet werden.

3.2 Training und Anwendung von KNN

Vor der Anwendung eines KNN müssen zunächst die Gewichtungen und Bias-Werte errechnet werden. Dieser Vorgang wird als Training bezeichnet und stellt deutlich höhere Anforderungen an die Hardware als die spätere Anwendung des KNN. Typische Trainingsalgorithmen für KNN sind der Levenberg-Marquardt und der BFGS Quasi-Newton Algorithmus. Diese Algorithmen sind sehr effizient für das Training von Netzen mit wenigen Gewichtungen, sind jedoch schlechter geeignet für das Training von Netzen mit mehreren Tausend Gewichtungen [5]. Für das Training werden Eingangsgrößen und die dazu gehörigen Ausgangsgrößen an den Trainingsalgorithmus übergeben. Nach Abschluss des Trainings kann auf ein KNN zurückgegriffen werden, dass aus übergebenen Eingangswerten die zugehörigen Ausgangswerte mit einer bestimmten Prognosegenauigkeit berechnen kann. Dieser Vorgang wird als Anwenden des KNN bezeichnet. Der Vorgang des Trainings und des Anwendens eines KNN ist in Bild 3 zu erkennen.

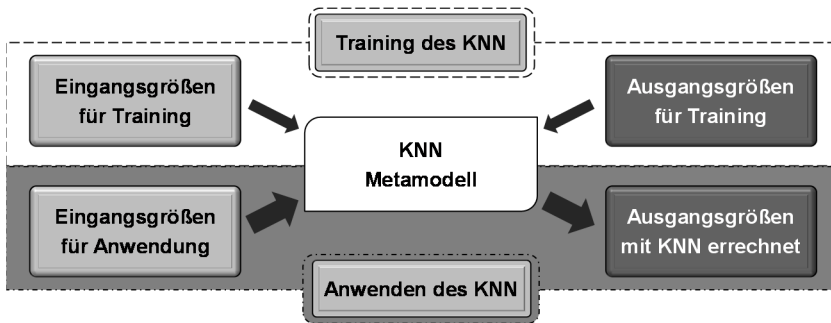


Bild 3: Training und Anwendung eines KNN

4 Vorstellung des Konzepts zur Bauteilerkennung mittels KNN

Zunächst wurde auf den prinzipiellen Aufbau und die Grundlagen von Künstlichen Neuronalen Netzen eingegangen. Im Folgenden wird das Konzept zur automatisierten Bauteilerkennung vorgestellt.

4.1 Orientierung von Bauteilen

In den zu untersuchenden virtuellen Baugruppen innerhalb der FE-Software können Bauteile, wie in realen Produkten auch, beliebig orientiert und verschoben im Raum vorliegen. Die Betrachtung der möglichen Verdrehungen um die drei Raumkoordinatenachsen erfolgt im Zuge dieses Konzeptes in vordefinierten Winkel-Schritten. Bei der Verdrehung einer Sechskantschraube nach ISO 4016 ergeben sich bei 20°-Winkel-Schritten um eine Raumachse zehn mögliche Orientierungen (dies verdeutlicht Bild 4 anhand der FE-Netz-Knoten).

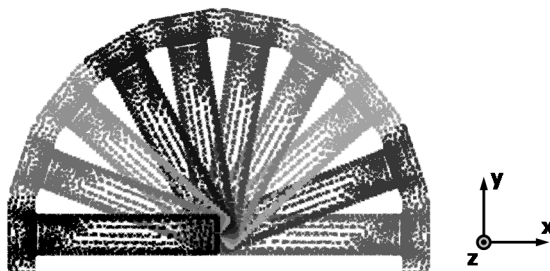


Bild 4: Mögliche Orientierungen einer Sechskantschraube bei Rotation um die z-Raumachse in 20°-Winkel-Schritten

Die Anzahl der zu untersuchenden Bauteil-Orientierungen schwankt von Bauteil zu Bauteil. Bei einer Sechskantschraube nach ISO 4016 müssen bei einer Schrittweite von 10° folgende Orientierungen untersucht werden:

- Rotation um x-Achse: 6 mögliche Orientierungen
- Rotation um y-Achse: 19 mögliche Orientierungen
- Rotation um z-Achse: 19 mögliche Orientierungen
- Zu untersuchende Orientierungen: $6 \times 19 \times 19 = 2.166$

Um die Bauteile mit dem vorgestellten Konzept erkennen zu können, muss jede einzelne dieser Orientierungen betrachtet werden. Dies gilt nicht nur für die Bauteilart (z. B. ISO 4016, ISO 4017), sondern auch für jede Größe der Bauteile nach der einzelnen Norm.

4.2 Vernetzung der Bauteile

Die Vernetzung der Bauteile erfolgt mit einer vorgegebenen Elementgröße von 3 mm und Tetraedern als Elementart. Die Wahl einer Elementgröße von 3 mm liegt darin begründet, dass möglichst wenige Knoten pro Bauteil verwendet werden sollten. Gleichzeitig aber eine ausreichende Anzahl für die weiteren Berechnungsschritte vorhanden sein muss. Die Vernetzung wird mit ANSYS Workbench durchgeführt und erfolgt mittels striktem Netzverhalten. Hierdurch wird die Anzahl der Teilungen auf einer Kante fix vorgegeben und der Vernetzungsalgorithmus kann die Anzahl der Elemente pro Kante nicht verändern. Dies führt einerseits zu einer höheren Fehleranfälligkeit bei der Vernetzung [6], garantiert aber andererseits eine identische Vernetzung bei einer erneuten Netzgenerierung des gleichen Bauteils.

4.3 Reduktion der Knoten mittels Detektorfläche

Unterschiedlich große Bauteile weisen bei gleicher Elementgröße eine unterschiedliche Anzahl an Knoten des FE-Netzes auf. Künstliche Neuronale Netze besitzen eine fix vorgegebene Anzahl an Eingangsneuronen und müssen daher stets eine gleiche Anzahl an Eingangsparametern übergeben bekommen. Aus diesem Grund können die Netzknoten des FE-Netzes nicht direkt an das KNN übertragen werden. Um die unterschiedlich großen Anzahlen an Netzknoten auf eine stets konstante Anzahl an Eingangsgrößen zu reduzieren, werden Detektormatrizen verwendet. Hierbei werden die Bauteile durch eine Detektorfläche betrachtet und die projizierten Knoten innerhalb jedes Detektorpixels gezählt. Vor der eigentlichen Betrachtung der Bauteile werden die Punkte der FE-Netzknoten so verschoben, dass diese innerhalb der Detektorfläche liegen. Hierfür werden die Minimalwerte in jeder der drei Koordina-

tenrichtungen berechnet und anschließend von jedem Knoten des Bauteils abgezogen. Die Bauteile werden dadurch in den linken unteren Rand der Detektorfläche verschoben (siehe Bild 5).

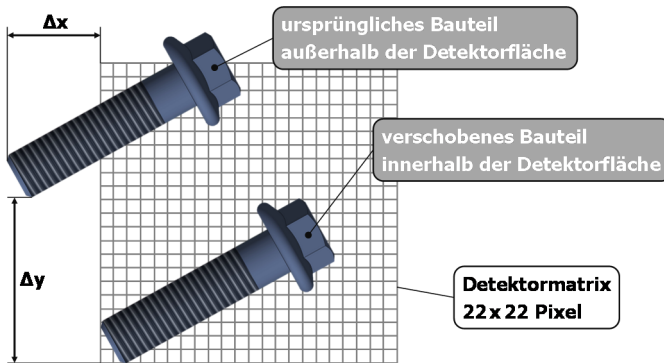


Bild 5: Verschiebung der zu erkennenden Bauteile in die Detektorfläche

Um den rechnerischen Aufwand bei der Erstellung der KNN zu verringern wird eine relativ kleine Detektorfläche mit $22 \times 22 = 484$ Pixeln verwendet. Prinzipiell kann ein Bauteil durch mehrere, zueinander verdrehte Detektormatrizen betrachtet und die Ergebnisse aller dieser Matrizen an das KNN übergeben werden. Dies hat den Vorteil, dass unterschiedliche Orientierungen der Bauteile besser erkannt werden können.

4.4 Training des KNN

Vor dem Training des KNN müssen die Detektormatrizen für jedes Bauteil und jede der zuvor erwähnten Orientierungen in einen Eingabevektor umgewandelt werden. Diese Umwandlung geschieht durch eine Transformation der Detektormatrix der Dimension 22×22 in einen Spaltenvektor der Größe 484×1 . Für die Berechnung der Gewichtungen des KNN muss neben dem Eingangsvektor ebenfalls ein Ausgabevektor übergeben werden. Hierbei wird jedem einzulesenden Bauteil (z.B. Sechskantschraube ISO 4016–M8x40) eine Ausgabewert zugewiesen (z.B. der Zahlenwert 10). Bei der Auswahl der Zahlenwerte ist auf einen ausreichenden Abstand der Zahlenwerte zwischen den betrachteten Bauteilen zu achten. So wird einer Sechskantschraube ISO 4016–M8x50 z.B. der Zahlenwert 20 zugewiesen. Der zugewiesene Ausgabewert wird dabei jeder Orientierung eines spezifischen Bauteils zugewiesen. Somit ergibt sich für den Eingangsdatensatz der erwähnten Sechskantschraube eine Matrix der Größe 484×2.166 mit einen zugehörigen Ausgabevektor

der Größe 1×2.166 . Dieser Ausgabevektor enthält immer den gleichen Wert da eine identische Schraube, aber in unterschiedlichen Orientierungen eine identische Schraube betrachtet wird.

Das Training des KNN stellt - in Abhängigkeit der verwendeten Trainingsalgorithmen - hohe Anforderungen an die verwendete Hardware. Dies liegt in der hohen Anzahl an Eingangsparametern (484), der Anzahl an verdeckten Neuronen in der Zwischenschicht (z. B. 100) und des Umfangs an Trainingsdatensätzen begründet. Der Umfang ergibt sich durch die zu untersuchenden Orientierungen (z. B. 2.166) pro Bauteil und die Gesamtanzahl an zu untersuchenden Normteilen in verschiedenen Größen.

Die Hardwareanforderungen bei der Generierung der KNN sind durch die Auswahl von besser geeigneten Transferfunktionen reduzierbar. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von Fast Elliot Sigmoid Transferfunktionen erfolgen, hierbei werden Exponentialfunktionen wie die Tangens Hyperbolicus Funktion vermieden [4]. Ebenso kann anstelle einer Berechnung mit allen Datensätzen ein schrittweises Trainieren des KNN mit mehreren kleineren Trainingsdatensätzen erfolgen.

4.5 Anwendung des KNN

Nach dem Training des KNN und der Berechnung der Gewichtungen zwischen den Neuronen kann das somit erzeugte Netz zur Bauteilerkennung herangezogen werden. Hierfür sind die Bauteile zunächst in einer zu untersuchenden Baugruppe innerhalb der FE-Umgebung mit den zuvor erwähnten Einstellungen (Elementart und -größe) zu vernetzen. Anschließend werden die X-, Y- und Z-Koordinaten der Elementknoten für jedes Bauteil ausgelesen. Nach der Betrachtung dieser Knoten durch die Detektorfläche und der Umwandlung der so erzeugten Detektormatrix in einen Eingabevektor kann dieser an das KNN übergeben werden. Das KNN berechnet aus diesem Eingabevektor den zugehörigen Ausgabewert. Je höher die Prognosequalität des KNN ist desto näher liegt der errechnete Wert des Netzes am tatsächlichen Wert. Durch die Berechnung des Ausgabewertes mit Exponentialfunktionen und unterschiedlichen Gewichtungen berechnet das KNN keine exakten Ganzzahlen und die Ausgabe muss entsprechend gerundet werden. Nach der Rückführung des Ausgabewertes in die exakte Bauteilbezeichnung können automatisierte FE-Simulationen oder analytische Vergleichsrechnungen durchgeführt werden. Die nachgelagerten Schritte sollten dabei möglichst automatisiert durchführbar sein um mit dem vorgestellten Konzept eine deutliche Effizienzsteigerung in der virtuellen Produktentwicklung zu erreichen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit FE-Simulationen können Bauteile bereits in der virtuellen Phase der Produktentwicklung hinsichtlich ihrer beanspruchungsgerechten Gestaltung überprüft werden. Hierfür ist es notwendig, schnelle und präzise FE-Simulationen durchzuführen. Zur Validierung von FE-Ergebnissen können auch analytische Maschinenelemente-Gleichungen herangezogen werden. Allerdings muss hierfür bekannt sein, welche Normteile in einer zu untersuchenden Baugruppe vorliegen. Bisher standen dazu keine anwendbaren Ansätze oder Methoden zur Verfügung. Mit dem vorgestellten Konzept zur automatisierten Bauteilerkennung mittels Künstlichen Neuronalen Netzen können unbekannte Bauteile in einer in der FE-Umgebung vorliegenden Baugruppe mit zuvor eingelesenen Bauteilen verglichen und erkannt werden. Nach dem Training des KNN ist die Erkennung von Bauteilen mittels der Detektorflächen und der Anwendung des KNN zur Klassifizierung schnell und ohne große Hardwareanforderungen möglich.

Im Zuge der weiteren Forschung ist das Konzept auf die Möglichkeit zur Erkennung von ähnlichen Bauteilen und Bauteilen mit geringen geometrischen Unterschieden hin zu überprüfen. Durch die bisherige Verwendung von Standardeinstellungen bei der Erzeugung des KNN können diverse Parameter variiert werden, um die Prognosequalität des Netzes zu erhöhen. Diese Parameter sind beispielsweise die Anzahl der Zwischenschichten des KNN, die darauf befindliche Anzahl von künstlichen Neuronen, die Transferfunktion jedes einzelnen Neurons oder der verwendete Trainingsalgorithmus. Darüber hinaus können die untersuchte Elementgröße der FE-Netze, die Anzahl der Pixel auf der Detektorfläche und die Winkelschritte der betrachteten Orientierungen adaptiert werden. Durch die Möglichkeit einer Anpassung dieser Parameter ist sichergestellt, dass mit dem KNN eine hohe Prognosequalität zur Bauteilerkennung erreicht werden kann.

Literatur

- [1] Klein, B.: "FEM, Grundlagen und Anwendung der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau", Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [2] VDI 2230: "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrischer Einschraubverbindungen", 2003.
- [3] Ertel, W.: "Grundkurs künstliche Intelligenz, Eine praxisorientierte Einführung", Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [4] Masters, T.: "Practical neural network recipes in C++", Academic Press, Boston, 1993.
- [5] Beale, M. H., et al.: "Matlab Neural Network Toolbox, User's Guide R2013a", MathWorks, 2013.
- [6] ANSYS® 15.0: "Meshing User's Guide", ANSYS, Inc.

Das hier vorgestellte Vorgehen ist Bestandteil des Teilprojekts 7 des BFS Forschungsverbunds FORPRO² (AZ 1071-13). Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung für die finanzielle Unterstützung.

Simulation von naturfaserverstärkten, spritzgegossenen Kunststoffen

Albrecht, K.¹; Osswald, T.²; Wartzack, S.³ & Müssig, J.¹

¹ Fakultät 5 – Bionik / AG Biologische Werkstoffe, Hochschule Bremen, D

² Polymer Engineering Center, University of Wisconsin - Madison, USA

³ Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, D

Abstract

The interest in the use of renewable resources (RRs) increases, especially in the automotive industry. Due to the high density-related strength of natural fibres (NF), lightweight constructions can be realized by RRs. In the car development process it is essential that all components are compatible with CAE methods. For glass fibre-reinforced polymers models have been well investigated. However, data for the simulation of NF-reinforced composites are essentially non-existent. Therefore different natural fibres were characterized according to their mechanical and morphological properties and the orientation was determined in injection moulded samples. The experimentally determined properties were used as input for the simulation. The simulative results could be confirmed by the experiments.

Keywords: natural fibres, lightweight construction, injection moulding, simulation

1 Hintergrund

Zu den wichtigsten Aspekten beim Kauf eines Neuwagens gehören geringer Kraftstoffverbrauch und Fahrzeugsicherheit [1]. Auch das Interesse an der Verwendung von *Nachwachsenden Rohstoffen* spielt vor dem Hintergrund der CO₂-Einsparung eine immer größere Rolle für die Automobilindustrie. Naturfaserverstärkte Kunststoffe sind hierfür dank der geringen Dichte von Naturfasern (circa 1,5 g/cm³ im Vergleich zu Glasfasern mit 2,5 g/cm³) eine attraktive Option: Durch die höhere dichtebezogene Steifigkeit von Bastfasern lässt sich Leichtbau hier auf exzellente Weise mit *Nachwachsenden Rohstoffen* realisieren.

Die Fahrzeugsicherheit, insbesondere die Crash-Sicherheit muss vom Autohersteller gewährleistet werden. Für die Auswahl geeigneter Werkstoffe werden daher schon in frühen Stadien des Entwicklungsprozesses Crashesimulationen durchgeführt. Im Automobilentwicklungsprozess werden nur Werkstoffe berücksichtigt, die simulierbar sind, um die hohen sicherheitsrelevanten Anforderungen frühzeitig bewerten zu können und teure experimentelle Tests zu ersetzen. Gängige Simulationsprogramme für Spritzgussprozesse, wie MOLDFLOW, CADMOULD oder MOLDEX3D, beinhalten bereits Funktionen für die Prozesssimulation von glasfaser- oder kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Diese fehlen allerdings bisher für Naturfasern.

Hierzu wurde das Projekt „Werkstoff- und Fließmodelle für naturfaserverstärkte Spritzgießmaterialien für den praktischen Einsatz in der Automobilindustrie“ (kurz: NFC-Simulation) mit 11 Projektpartner ins Leben gerufen [2], [3].

2 Aufgabenstellung

Die Charakterisierung der Naturfasern stellt in diesem Projekt eine zentrale Rolle dar. Hierbei sind vor allem die drei folgenden Leitfragen relevant:

1. Welche mechanischen Fasereigenschaften sind für die Crash- & Spritzgussimulation relevant?
2. Wie lassen sich die morphologischen Fasereigenschaften reproduzierbar ermitteln & das micro-mechanische Model (Faserbruchsimulation und Bestimmung von Faserorientierungs-Simulationsparameter während des Spritzgusses [4]) anhand experimenteller Untersuchungen validieren?
3. Wie lassen sich die Faserorientierungswerte der Simulation am Bauteil experimentell validieren?

3 Methode

Granulate mit einer Polypropylen (PP) Matrix wurden mit jeweils 30% Fasermassenanteil für jeden Fasertyp (Sisal, Hanf, Flachs und Regeneratcellulose) an der Hochschule Hannover (im Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe) hergestellt. Weiterhin wurden aus allen Compounds Probeplatten (30 x 16 x 3,2 mm³) spritzgegossen. [5]

1. Zur Ermittlung der mechanischen Fasereigenschaften wurden Zugversuche an einzelnen Fasern (Regeneratcellulose) bzw. Faserbündeln (Sisal, Hanf und Flachs) durchgeführt. Die Naturfasern wurden dazu vor den Untersuchungen für mindestens 24 h im Fasernormalklima (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte; DIN EN 20139) im Klimaschrank Vötsch VCL 4003 (Vötsch, Balingen) klimatisiert. Die Zugeigenschaften der Fasern wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Elastizitätsmodul wurden mit der Faserzugprüfmaschine Fafegraph M (Textechno, Mönchengladbach) ermittelt. Die Fasern wurden mit einer freien Einspannlänge von 3,2 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min untersucht. Die so ermittelten Zugfestigkeiten und E-Moduli dienten als Input für die Faserbruchsimulation.

2. Um die Faserlängeneinkürzung während des Compoundierens und des Spritzgießens bestimmen zu können, mussten die Naturfasern wieder aus der Polymermatrix herausgelöst werden. Im Gegensatz zu Glasfasern kann bei Naturfasern wegen der zu hohen Temperaturen die Veraschungsmethode nicht angewandt werden. Die Naturfasern wurden deshalb mittels eines organischen Lösungsmittels aus den Granulaten und an jeweils vier Positionen der Probenplatten (Bild 1) extrahiert. Die Originalfasern und die aus Granulat bzw. Platten extrahierten Fasern wurden bildanalytisch untersucht. Zur Ermittlung der Verteilung der Längen wurden zunächst die Originalfasern mit einem Flachbettscanner Epson Scan (Auflösung: 1200 dpi) und die extrahierten Fasern mit einem Diascanner CanoScan FS 4000 US (Auflösung: 4000 dpi) eingescannt. Für die Analyse der Faserlängen diente die Software FibreShape Messsystem 5.1.1 (IST AG, Vilters, Schweiz). Hierzu wurden die Messmasken für jeden Fasertyp angepasst. Die so ermittelten Faserlängeneinkürzungen wurden mit den Ergebnissen der Faserbruchsimulation verglichen.

3. Für die Bestimmung der Faserorientierungen in den spritzgegossenen Platten wurden Mikrotomschnitte hergestellt. Dazu wurden Proben an zwei Positionen (M2 und M3; s. Bild 1) der Probeplatten entnommen. Mit einem Mikrotom wurden an den Proben an sieben definierten Stellen über die Plattendicke 35 µm dicke Mikrotomschnitte hergestellt. Bei einer Plattendicke von 3000 µm wurden Mikrotomschnitte an den folgenden Positionen der Platten-

tiefe angefertigt: 100 μm , 500 μm , 1000 μm , 1500 μm (rote Markierung in Bild 2), 2000 μm und 2900 μm . Die Faserorientierung wurde mit einem bildanalytischen Verfahren zur Validierung der Ergebnisse der Spritzgussimulation bestimmt.

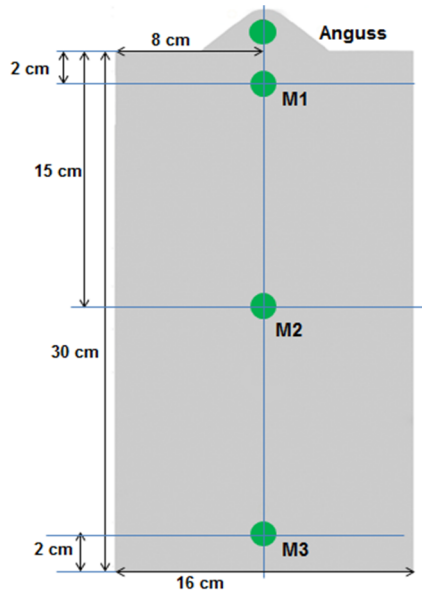


Bild 1: Zur Ermittlung der Faserlängen wurden an vier Stellen (Anguss, M1, M2 und M3) der spritzgegossenen Platte Fasern extrahiert.

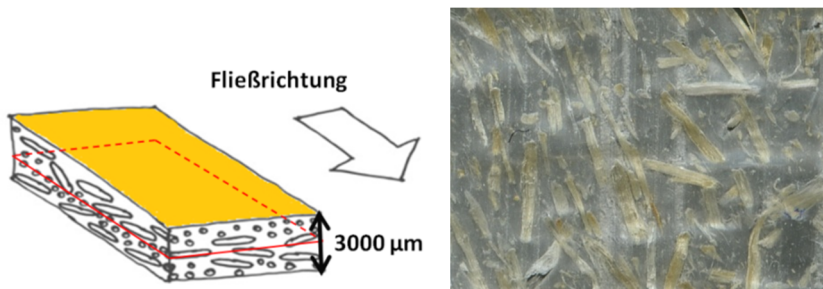


Bild 2: Links: Mikrotomschnittnahme über die Plattendicke. Die rote Markierung entspricht einem Mikrotomschnitt bei der Probentiefe von 1500 μm . Rechts: Exemplarischer Mikrotomschnitt aus der sisalfaserverstärkten Platte (Schnittdicke: 35 μm)



4 Ergebnisse und Diskussion

1. Die Zugfestigkeiten und E-Module unterscheiden sich stark zwischen den unterschiedlichen Naturfasern (s. Bild 3) und zeigen daher auch unterschiedliches Bruchverhalten. Die ermittelten mechanischen Fasereigenschaften flossen direkt in das micro-mechanischen Model ein und dienten somit der Faserbruchsimulation und der Bestimmung von Faserorientierungs-Simulationsparameter während des Spritzgusses.

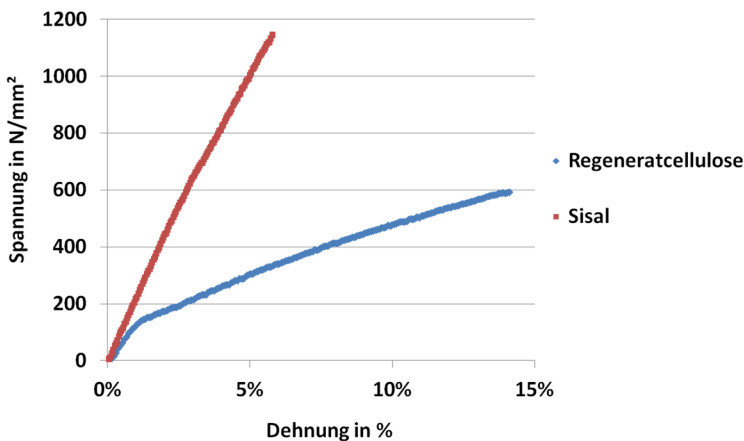


Bild 3: Exemplarische Spannung-Dehnung-Kurven für Regeneratcellulose-Fasern, Sisalfaserbündel und Flachsfaserbündel.

2. Die bildanalytische Auswertung der Faserlängen zeigt eine starke Längeneinkürzung der Naturfasern auf 500 bis 600 μm während des Compoundierungsprozesses. Während des Spritzgussprozesses konnte keine weitere Einkürzung der Faserlängen festgestellt werden. Die Simulation zeigt ebenfalls, dass die Naturfasern bei einer Länge von 500 bis 600 μm im Spritzgussprozess nicht weiter eingekürzt werden (s. Bild 4). Die simulativen Ergebnisse zeigen weiterhin, dass längere Naturfasern (≥ 1 mm für Hanf- und Flachsfaserbündel und ≥ 2 mm für Sisalfaserbündel) im Spritzgussprozess brechen würden (Bild 4). Das unterschiedliche Bruchverhalten der Naturfasern ist auf deren Unterschiede im E-Modul, der Festigkeit und Feinheit zurückzuführen.

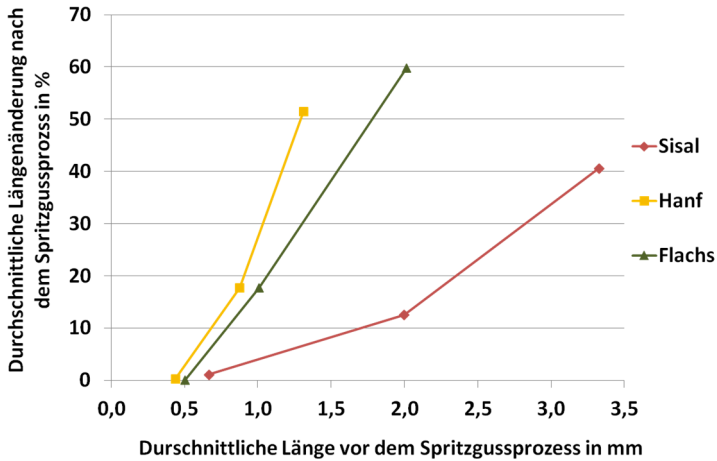


Bild 4: Relative Fasereinkürzung während des Spritzgussprozesses simuliert mit dem micro-mechanischen Modell.

3. Die Auswertung der Mikrotomschnitte zeigt eine Faserorientierung in den äußeren Schichten der Platte in Fließrichtung der Polymerschmelze (s. Bild 5, rechts, Schnitttiefe 2900 μm). Wohingegen die Fasern im Kern der Platte eher unorientiert vorliegen (s. Bild 5, links, Schnitttiefe 1500 μm).

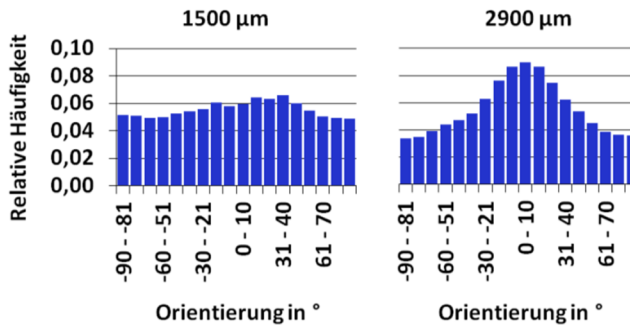


Bild 5: Ergebnisse der Orientierungsmessungen der Mikrotomschnitte an einer sisalfaserverstärkten Platte an der Position M2 (s. Bild 1); exemplarisch für zwei verschiedenen Schnitttiefen 1500 μm (entspricht Plattenmitte) und 2900 μm (Randbereich der Platte), Plattendicke: 3000 μm . 0° entsprechen der Spritzguss-Fließrichtung.

5 Ausblick

Ein Compound aus Polypropylen (PP) mit 30% Sisalfasern wurde ausgewählt um weitere Versuche mit einem crash-relevanten Bauteil durchzuführen. Hierzu wurden bei IAC (International Automotive Components, Ebersberg) Handschuhfächer (s. Bild 6) spritzgegossen, die anschließend experimentell von Ford im Crashtests untersucht wurden. Die Spritzgussimulation von Simcon (Simcon kunststofftechnische Software GmbH, Würselen) und der simulative Crashtest von Ford (Ford Forschungszentrum Aachen GmbH, Aachen) stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Bauteilprüfungen überein. Der erste geschlossene Entwicklungszyklus für ein sisalfaserverstärktes, spritzgegossenes Bauteil konnte somit von der Spritzgussimulation, über die Bauteilfertigung & Bauteilprüfung bis zur Crash-Simulation im Rahmen des NFC-Simulations-Projektes realisiert werden. In weiteren Arbeiten wird die Übertragbarkeit des Konzeptes auf andere Natur- und Cellulosefasern analysiert und evaluiert.



Bild 6: Spritzgegossenes Handschuhfach aus sisalfaserverstärktem Polypropylen (PP).

6 Danksagung

Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL; Förderkennzeichen: 22005511) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR, Gülzow).

Die Projektpartner sind: Ford Forschungszentrum Aachen GmbH, Aachen; IAC (International Automotive Components), Ebersberg; LyondellBasell, Frankfurt; Kunststoffwerk Voerde Hueck & Schade GmbH & Co. KG, Ennepetal; Simcon Kunststofftechnische Software GmbH, Würselen; M-Base Engineering + Software GmbH, Aachen; University of Wisconsin-Madison, Madison (USA); Hochschule Hannover, Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Hannover; Hochschule Bremen, AG Biologische Werkstoffe, Bremen; Technische Universität Clausthal, Institut f. Polymerwerkstoffe u. Kunststofftechnik, Clausthal und Fraunhofer LBF, Darmstadt.

Literatur

- [1] TNS Market research: "Public Opinion survey on Energy Efficient Cars", August, 2008.
- [2] Baranowski, T.; Franzen, M. & Magnani, M.: Werkstoff- und Fließmodelle für naturfaserverstärkte Spritzgießmaterialien für den praktischen Einsatz in der Automobilindustrie. In: Vortragsveranstaltung im Rahmen des Biopolymernetzwerkes bei der FNR, (Landesvertretung Sachsen-Anhalt, Luisenstr. 18, Berlin, 14. November 2013), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, Deutschland <<http://biopolymernetzwerk.fnr.de/netzwerk/arbeitsweise-themen/einsatz-von-biobasierten-werkstoffen-im-automotivbereich/netzwerkveranstaltung-14-november-2013/>>, 14 Seiten, 2013.
- [3] Müssig, J.: Simulation of bio-based composites – NFC-Simulation. In: Reux, F. & Verpoest, I. (Editors): Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry - What's new in 2014?-. Paris, France, JEC composites, 2014, Co-published CELC/JEC GROUP. Contributors: the experts of the European Scientific Committee of CELC, (ISBN 978-2-9526276-2-7), S. 37 - 39, 2014.
- [4] Baur, E. Goris, G. Ramirez, D. Schmidtke P. & Osswald, T.: Mechanistic Model to determine Fiber Orientation Simulation Material Parameters. In: SPE-ANTEC® 2014, Las Vegas, Nevada, USA (28. – 30. April 2014) Tech. Papers, S. 1605 – 1610, 2014. - Proceedings
- [5] Neudecker, M. & Endres, H.-J.: Processing and Manufacturing of Natural Fiber Reinforced Plastics to Specimens for Generating Simulation Data (NFC-Simulation). In: SPE-ANTEC® 2014, Las Vegas, Nevada, USA (28. – 30. April 2014) Tech. Papers, 2014. - Proceedings

Entwicklung von virtuellen Testverfahren für Sandwichstrukturen

Ralf Seemann und Dieter Krause
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT);
Technische Universität Hamburg-Harburg*

Abstract

The prediction of the mechanical properties of structural elements using advanced finite element analysis is an important part of the product development process of light weight structures. In this context, the term virtual testing has been established. This term refers to a complex system of hierarchical models, structural tests and analysis methods with the objective of ensuring the fidelity of the simulation. The present contribution introduces an approach for developing virtual test methods for sandwich structures using the example of potted honeycomb sandwich inserts.

Keywords: virtual testing, honeycomb sandwich, sandwich insert, FEA

1 Einleitung

In der Produktentwicklung stellt der durchgehende Einsatz von rechnergestützten Werkzeugen eine Möglichkeit dar, Kosten und Entwicklungszeit zu reduzieren und gleichzeitig die Produktqualität zu erhöhen. Ein Hauptziel dieses virtuellen Produktentwicklungsprozesses (PEP) ist die Analyse der späteren Produkteigenschaften in frühen Entwicklungsphasen [1]. Im Entwicklungsprozess von Leichtbauprodukten spielt die Analyse der strukturmechanischen Produkteigenschaften eine übergeordnete Rolle. Das komplexe Versagensverhalten der im Leichtbau häufig verwendeten anisotropen Faserkunst-

stoffverbunde (FKV) sowie das Bestreben nach verbesserter Materialausnutzung erfordert kontinuierlich entwicklungsbegleitende Material- und Komponententests. Im Sinne der virtuellen Produktentwicklung ist daher die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von Leichtbau-Strukturelementen durch Simulationsmodelle basierend auf der Finiten Elemente Methode (FEM) wichtiger Bestandteil des PEP. Aus strukturmechanischer Sicht erfordern hierbei die Krafterleitungselemente, z.B. an Fügstellen, aufgrund der hier vorherrschenden komplizierten Spannungszustände spezielle Aufmerksamkeit. Insbesondere FKV-Sandwichstrukturen, deren mechanisch schwacher Kern generell nicht geeignet ist lokal eingeleitete Kräfte adäquat zu übertragen, müssen an Fügstellen daher lokal verstärkt werden, was zu Spannungskonzentrationen und schließlich zum häufigen Versagen an den Verbindungsstellen führt [2]. Im Rahmen dieses Beitrages wird zunächst der Stand der Technik im Bereich Struktursimulation von FKV-Sandwichverbunden sowie virtuelles Testen von Leichtbaustrukturen beschrieben, bevor ein Ansatz für den systematischen Aufbau von virtuellen Testverfahren von Sandwichstrukturen am Beispiel von Sandwichverbindungen mit Honigwabenkern vorgestellt wird.

2 Stand der Forschung

Zur Vorhersage der Struktureigenschaften während des PEP sind anwendungsspezifische virtuelle Testmethoden zur Abbildung des komplizierten Versagensverhaltens von FKV-Sandwichstrukturen notwendig. Im Folgenden wird zunächst der Begriff *virtuelles Testen* eingeführt. Anschließend wird die Modellierung von Sandwichverbunden beschrieben bevor abschließend ein Sandwichinsertsystem als Beispielproblem vorgestellt wird.

2.1 Virtuelles Testen von Leichtbaustrukturen

Im Kontext der Leichtbauproduktentwicklung geht der Begriff *virtuelles Testen* weit über die bloße Anwendung von fortschrittlichen Simulationsverfahren anstelle von realen Tests hinaus. Die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von Leichtbaustrukturen erfordert ein umfassendes System aus hierarchischen Modellen, Strukturtests und unterstützenden Analysemethoden, um die Aussagefähigkeit der Simulation sicherzustellen [3]. Dabei wird typischerweise die Fähigkeit angestrebt, progressive Materialschädigungen bis hin zu lokalem Materialversagen sowie alle kaskadierenden Effekte bis hin zum Totalversagen der Gesamtstruktur simulativ beschreiben zu können [4]. Ein Großteil der vorhandenen Literatur auf diesem Gebiet entstammt der materialwissenschaftlichen Sicht auf das Problem und fokussiert die Bruchmechanik von FKV mit dem Ziel, die Entwicklung von neuartigen Materialverbunden zu unterstützen. Dabei wird grundsätzlich zwischen einem *Bottom-Up* oder *Top-*

Down Vorgehen unterschieden. Ersteres basiert auf der Bestimmung des Konstituentenverhaltens von kleineren zu größeren Längenmaßstäben. Das *Top-Down* Vorgehen beginnt hingegen mit einem makroskopischen Modell, welches nur nach Bedarf durch Einbeziehung von Informationen aus detaillierteren Untersuchungen erweitert wird [3]. Die kürzlich erschienene Arbeit von OKEREKE et al. [6] beschreibt den Stand der Forschung dieser materialwissenschaftlichen Sicht umfassend. Zusätzlich dazu sind in der Literatur konstruktiv-technische Ansätze zur Auslegung von Leichtbaugesamtstrukturen beschrieben. Analog zu den zuvor beschriebenen materialwissenschaftlichen Ansätzen wird die Strukturanalyse auf verschiedenen Ebenen der Komplexität der Zielstruktur durchgeführt. Hierbei wird typischerweise in einem *Bottom-Up* Vorgehen von einfachen Prüfkörpern über Subkomponenten und Komponenten bis hin zur Gesamtstruktur vorgegangen. Dabei baut jede Ebene auf den Erfahrungsgewinn der Vorigen auf und ermöglicht so sukzessive den Aufbau komplizierter Modelle. Dieses Vorgehen wird allgemein hin als „*Building Block Approach*“ (BBA) bezeichnet [5] und hat sich insbesondere in der Luftfahrt bei der Entwicklung und Auslegung von FKV-Leichtbaustrukturen etabliert.

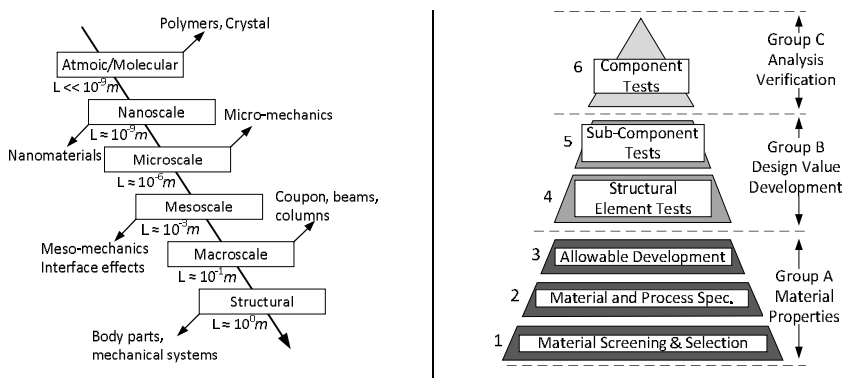


Bild 1 *links*: Längenmaßstäbe beim virtuellen Testen von Materialien [6]; *rechts*: Building Block Approach in typischer Pyramidendarstellung [5]

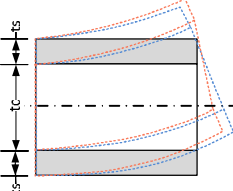
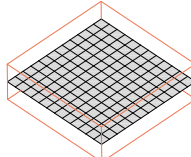
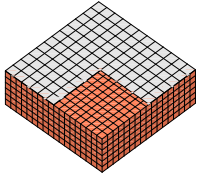
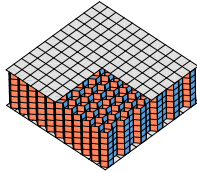
Beide beschriebenen Sichten haben das Ziel durch die synergetische Kombination aus hierarchischen Simulationen und Tests, Entwicklungsaufwand zu reduzieren und dabei die Ergebnisqualität zu erhöhen. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in dem abgedeckten Längenmaßstab und damit in ihrem primären Anwendungsgebiet sowie den eingesetzten Methoden. Die Übergänge zwischen beiden Sichten sind jedoch fließend. Die materialwissenschaftliche Sicht befasst sich typischerweise mit deutlich kleineren Längenmaßstäben, beginnend bei molekularen Zusammenhängen und häufig endend bei Coupongröße (s. Bild 1). Beim BBA dagegen wird in der Regel darauf hingearbeitet, große Gesamtstrukturen, wie zum Beispiel die Tragflä-

che eines Flugzeuges, zu analysieren und auszulegen (s. Bild 1). Das Anwendungsbeispiel der vorliegenden Arbeit siedelt sich zwischen beiden Sichten an. Es geht dabei einerseits um die Auslegung von Sandwichverbindungen, wofür sich der BBA anbietet. Das Problem ist gleichzeitig jedoch sehr lokal und erfordert einen hohen Detailgrad und damit einen eher kleinen Längenmaßstab.

2.2 Modellierung von Sandwichstrukturen

Die Besonderheit der Sandwichbauweise im Vergleich zu reinen FKV-Strukturen ist der mechanisch schwache Kern, welcher das Versagen des Verbundes maßgeblich beeinflusst. Je nach erforderlichem Detailgrad, kann zwischen verschiedenen Herangehensweisen beim Aufbau von Simulationsmodellen für Sandwichstrukturen (SWS) unterschieden werden. Tabelle 1 stellt z.B. die Unterteilung in vier Kategorien nach NOOR et. al [7] dar.

Tabelle 1: Herangehensweisen zur Modellierung von Sandwichstrukturen

Vereinfachte Modelle	2D Schalen- und Plattenelemente	3D-Kontinuummmodelle	Detaillierte Modelle
			
Sandwichbalkentheorie	Diskrete Lagen	z.B. Shell-Solid-Shell	Meso/Micro Ebene

Vereinfachte Modelle basieren meist auf analytischen Gleichungssystemen und werden in der Regel zur Modellierung von einzelnen spezifischen Effekten entwickelt (z.B. Verformung im Biegeversuch, Deckschichtknittern im Druckversuch ect.). 2D Schalen- und Plattenelemente, basierend auf homogenisierten Eigenschaften oder diskreten Lagenaufbauten, stellen die einfachste numerische Modellierung auf Basis der FEM dar. Entsprechende Modelle sind geeignet die globale Verformung von Sandwichstrukturen abzubilden. Die wichtigen transversalen Versagensmodi können jedoch nicht berücksichtigt werden. Diese Modelle werden aufgrund des geringen Modellierungsaufwandes häufig in frühen Entwicklungsphasen zum Beispiel zur Abschätzung von externen Schnittstellenkräften von Kabineninterieur eingesetzt [8]. Die Modellierung des Sandwichkerns mithilfe von 3D-Kontinuummelementen erlaubt die Berücksichtigung von transversalen Versagensmechanismen und wird daher trotz deutlich erhöhtem Modellierungs- und Berechnungsaufwands zur detaillierten Abbildung von Gesamtstrukturen bis hin zur Bauteilebene eingesetzt [9]. Die Kategorie der detaillierten Modelle umfasst alle Modellierungsmetho-

den die über den Einsatz von homogenisierten Kontinuumelementen hinausgehen. Dies ist insbesondere bei zellulären Strukturkernen zur Berücksichtigung von lokalen Kräfteinleitungen notwendig. Dabei wird die tatsächliche Geometrie des Strukturkerns nachmodelliert. Bei Honigwabenkernen bedeutet dies, dass die dünnen Zellwände ausmodelliert werden, um so realistische Verformungen der Zellen infolge von Stabilitätsversagen abbilden zu können. Die numerische nicht-lineare Berechnung dieses hohen Detailgrades erfordert leistungsfähige Rechnersysteme und hat sich erst in der vergangenen Dekade insbesondere für die Untersuchung von Impact-Problemen bei Sandwichpanels etabliert [10].

2.3 Virtuelles Testen von Sandwichverbindungen

Sandwichverbunde eignen sich generell nicht für die Einleitung von lokalen Kräften, weil der Kern nicht die Steifigkeit besitzt die Kräfte adäquat zu übertragen [2]. Das Fügen von Sandwichstrukturen lässt sich jedoch häufig nicht vermeiden. Die dafür erforderlichen lokalen Verstärkungen führen zu komplizierten Spannungszuständen und erfordern besondere Aufmerksamkeit in der Auslegung. Ein typisches Beispiel für lokal verstärkte Sandwichverbindungen sind eingeklebte metallische Gewindeinserts zum Verschrauben von Elementen senkrecht zur Panelfläche (Bild 2).

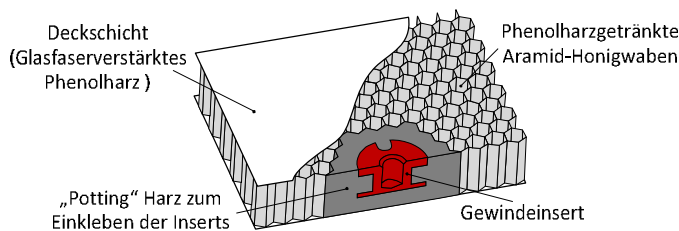


Bild 2 Typisches Sandwich-Gewindeinsertsystem

Zur Abschätzung der Festigkeit dieser Verbindungen in frühen Phasen des PEP gibt es vereinfachte Modelle basierend auf der Sandwichplattentheorie höherer Ordnung [11]. Aufgrund der gemachten Vereinfachungen, insbesondere für den zellulären Kern, eignen sich diese Modelle jedoch nicht für einen virtuellen Test wie in Abschnitt 2.1 beschreiben. Die letztendliche Festigkeitsbestimmung dieser Verbindungen erfordert aktuell in der Regel Realtests. Bei der Vielzahl von tatsächlich vorkommenden Varianten dieser Verbindung, wäre es wünschenswert die Anzahl der nötigen Tests zu reduzieren. Wenn beispielsweise nur ein Systemparameter (z.B. Deckschicht) im Vergleich zu einer bereits getesteten Verbindung variiert wird, liegt es nahe diese neue Variante durch einen virtuellen Test abzudecken. In der Literatur gibt es erste

Ansätze diese Insertverbindung durch detaillierte Modelle (vgl. Tabelle 1) basierend auf der FEM zu berechnen [12]. Die bisher durchgeführten numerischen Studien dienen jedoch ausschließlich zur Nachvollziehung der komplizierten Versagensmechanismen. Virtuelle Tests sind in der Literatur bisher nicht beschrieben. Die Entwicklung eines virtuellen Testverfahrens für diese Insertverbindungen dient als Anwendungsbeispiel in der vorliegenden Arbeit.

3 Ansatz zum Aufbau virtuellen Testverfahrens für Sandwichinserts

Der hier vorgestellte Ansatz orientiert sich prinzipiell an die in 2.1 vorgestellten grundsätzlichen Ansätze. Dabei werden die Besonderheiten der Sandwichbauweise im speziellen berücksichtigt. Bild 3 stellt das Vorgehen am Beispiel einer Sandwichinsertverbindung dar. Der Kern des Vorgehens ist ein hierarchisches System aus verschiedenen Detailebenen, wobei in jeder Ebene prinzipiell die gleichen Schritte zur Modellbildung durchlaufen werden. Dieser Modellentwicklung geht eine umfassende Problemanalyse sowie die Definition des Detailgrads voraus. Für eine Einbindung in den PEP enthält das Vorgehen letztlich den Schritt der Modelverwendung und Rückführung der Ergebnisse. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte und die jeweils eingesetzten Methoden am Anwendungsbeispiel der Insertverbindung kurz erläutert.

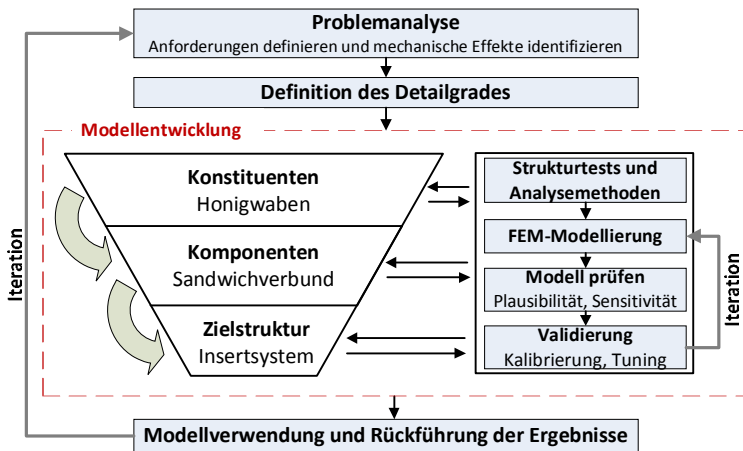


Bild 3: Ansatz zum Vorgehen bei der Entwicklung von virtuellen Testverfahren für Sandwichstrukturen am Beispiel von Sandwichinserts

3.1 Problemanalyse

Die Grundlage für jeden Problemlösungsprozess ist die Analyse der Problemstellung und die damit einher gehende Definition der Anforderungen. Wie

in Abschnitt 2.1 beschrieben, ist die Anforderung an einen virtuellen Strukturtest typischerweise die Abbildung des nicht-linearen Materialverhaltens bis hin zum Totalversagen der Struktur in Folge eines definierten Lastkollektivs. In erweiterten Anwendungen, kann zusätzlich die Vorhersage der Versagenswahrscheinlichkeit basierend auf einer adäquaten Berücksichtigung der auftretenden Unsicherheiten gefordert sein. Weiterhin kann auch die Anzahl der abzubildenden Lastkollektive zunehmen, sodass neben quasi-statischen auch hochdynamische oder zyklische Lasten abgebildet werden sollen. In dem Anwendungsbeispiel dieser Arbeit geht es jedoch zunächst nur darum, das nicht-lineare Kraft-Weg-Verhalten beim quasi-statischen Auszugsversuch des Inserts bis zum Totalversagen abzubilden.

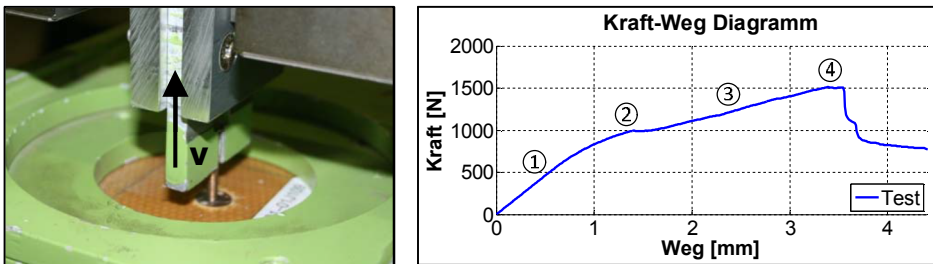


Bild 3: Prüfaufbau für Zugversuch an Sandwichinserts mit Kraft-Weg Kurve des Zugversuchs (zur Verfügung gestellt von der Fa. DIEHL Service Modules)

Die zugrunde liegenden Testergebnisse basieren auf dem Prüfaufbau und der Versuchsdurchführung, wie sie im Insert Design Handbook (IDH) [13] vorgeschlagen werden. Ein quadratisches Sandwichpanel, in dessen Mitte das Insert eingebracht ist, wird an eine kreisförmig ausgeschnittene Gegenhaltervorrichtung angelegt und das Insert durch konstante Verfahrensgeschwindigkeit der Prüfmaschine herausgezogen (Bild 3). Zur Nachbildung der Kraft-Weg Kurve ist es zunächst wichtig die mechanischen Effekte, die den Verlauf der Kurve definieren zu verstehen. Dazu wird zunächst der Verlauf der Kurve analysiert. Auf Basis der Versuchsbeobachtung sowie vorhandener Literatur werden dann die maßgeblichen mechanischen Effekte dem Kurvenverlauf zugeordnet. Es können vier Phasen im Kurvenverlauf ausgemacht werden. Phase ① entspricht der linear-elastischen Verformung des schadensfreien Systems. In Phase ② kommt es zu einem parabelförmigen Abflachen der Kurve. Dies ist auf das Schubbeulen der Honigwabenzellwände zurückzuführen. Dies kann zwar nicht direkt im Versuch beobachtet werden, es wurde jedoch in früheren Arbeiten mithilfe von numerischen Studien nachgewiesen [12]. Phase ③ entspricht erneut einem linearen Verlauf. Aufgrund des Schubversagens des Kerns, kann vermutet werden, dass nun die Deckschichten die Hauptlast in Form einer Zugbelastung aufnehmen und sich dabei line-

ar-elastisch weiter verformen. In Phase ④ kommt es zum Bruch der oberen Deckschicht und schließlich zum Totalversagen der Verbindung. Damit sind die Anforderungen definiert, der angestrebte Kurvenverlauf beschrieben und die wesentlichen mechanischen Effekte sind zugeordnet.

3.2 Definition des Detailgrades

Der nächste Schritt ist die Festlegung des notwendigen Detailgrads des virtuellen Testmodells. In Abschnitt 2.2 werden die detaillierten Modelle als Voraussetzung für eine realistische Modellierung der Zellwandverformung von Honigwabensandwichstrukturen eingeführt. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel ist es notwendig die Krafteinleitung in die einzelnen Zellwände richtig abzubilden, um damit das Schubbeulen als ersten Versagensmodus simulieren zu können. Als Detailgrad wird daher ein detailliertes Modell mit 2D 4-Knotenelementen für Zellwände und Deckschichten festgelegt.

3.3 Modellentwicklung

Für die hierarchische Modellentwicklung müssen zunächst die erforderlichen Untersuchungsebenen („Building Blocks“) festgelegt werden. Dies sollte nach Bedarf auf Basis der Problemanalyse und der Festlegung des Detailgrades erfolgen. Das Ausziehen der Inserts wird durch zwei mechanische Effekte maßgeblich definiert. Das Schubbeulen der Waben sowie der Bruch der Deckschicht. Die Wahl der Untersuchungsebenen sollte sich daran orientieren. Entsprechend wird der Wabekern als erster Building Block definiert. Die Deckschichten könnten zusätzlich auf unterster Ebene in Coupon Tests untersucht werden. Diese Ergebnisse liegen jedoch bereits durch frühere Untersuchungen vor. Auf Basis dieser vorhandenen Materialdaten wird als zweite Untersuchungsebene der Sandwichverbund definiert. Dies erlaubt es das Zusammenspiel von Kern und Deckschichtmaterial zu charakterisieren, wobei die vorhandenen Deckschicht-Materialdaten noch einmal überprüft werden und ggf. angepasst werden können. Als letzte Untersuchungsebene folgt der Auszugsversuch des Insertsystems als Zielstruktur. Die zwei weiteren Komponenten Metallinsert und Klebermasse werden damit zunächst vernachlässigt, da die Problemanalyse darauf hindeutet, dass ihr Einfluss auf das nicht-lineare Verhalten des Gesamtsystems klein ist. Es werden elastische Materialwerte der Literatur für beide Komponenten angenommen. Im Folgenden werden die einzelnen Untersuchungsebenen kurz erläutert. Dabei werden für die erste Ebene die einzelnen Arbeitsschritte beispielhaft etwas näher beschrieben.

Honigwabekern Der untersuchte Wabekern besteht aus Nomex-Aramidpapier. Die für eine Detailmodellierung erforderlichen Materialdaten

des Zellwandmaterials sind schwierig direkt zu bestimmen und werden nicht von den Herstellern angegeben. Die Materialwerte können jedoch in einem Top-Down Vorgehen aus einem makroskopischen Test, welcher dann möglichst exakt virtuell nachgebildet wird, abgeleitet werden. Dieser Prozess ist für das hier untersuchte Material detailliert in [14] erläutert. Die einzelnen Schritte werden in diesem Beitrag nur kurz beschrieben.

Strukturtest und Analysemethoden Voraussetzung in jeder Ebene sind geeignete Strukturtests zur Charakterisierung des Materials. Für Honigwabenkerne sollte mindestens der Kompressionstest (z.B. nach ASTM C363, siehe Bild 4) zur Abbildung des transversalen Versagens sowie Schubversuche in Längs- und Querrichtung (z.B. nach ASTM C273) für das Schubversagen in die Bestimmung der Materialparameter einbezogen werden. Unterstützend dazu sind immer auch weitere Analysemethoden erforderlich. Im einfachsten Fall sollten Lichtmikroskopmessungen der Wandstärken der Zellwände durchgeführt werden. Zusätzlich sollte geprüft werden ob es sich bei dem gefertigten Honigwabenmuster tatsächlich um regelmäßige Honigwaben handelt. In aufwändigeren Studien können auch 3D CT-Messungen eingesetzt werden um die tatsächliche Geometrie der Waben mit allen geometrischen Imperfektionen zu berücksichtigen

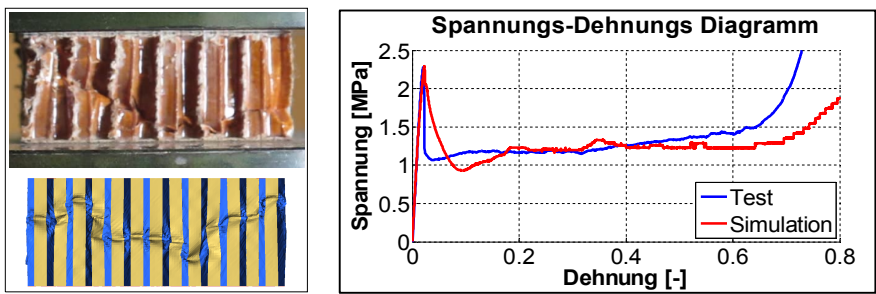


Bild 4 Virtueller Test des Wabenkerns am Beispiel des Kompressionsversuches nach ASTM C363 zur Bestimmung der Zellwandmaterialparameter

FEM-Modellierung Die FEM-Modellierung auf Basis der Strukturtests sowie der Analysemethoden sollte parametrisch (z.B. skriptbasiert) erfolgen, sodass verschiedene Geometrien und Netzfeinheiten schnell generiert werden können. Dies vereinfacht die folgende Modellprüfung erheblich.

Modell prüfen Bevor das FEM-Modell für die Validierung genutzt wird, sollte es eingehend geprüft werden. Dies beinhaltet neben standardmäßigen Netzkonvergenzstudien auch Skalenstudien, zur Bestimmung der erforderlichen Modellgröße (Anzahl Zellen). Weiterhin sollten verschiedene Randbedingungen geprüft werden (z.B. periodische Randbedingungen bei Honigwabenker-

nen). Wird eine Lösung mittels expliziter FEM angestrebt, sollte geprüft werden inwieweit Massenskalierung sowie Dehnratenerhöhung eingesetzt werden können ohne das Ergebnis maßgeblich zu beeinflussen. Bei impliziten Methoden müssen ggf. Stabilisierungsfaktoren zur Unterstützung der Konvergenz angepasst werden. Schließlich müssen ggf. auch verschiedene Materialmodelle auf ihre Eignung geprüft und deren Funktionsweise nachvollzogen werden, um im nächsten Schritt die Validierung durchführen zu können.

Validierung Die Validierung des Modells erfolgt abschließend durch Vergleich der Versuchsdaten mit der Simulation. Das Modeltuning der Materialparameter kann bei einfachen Materialmodellen manuell erfolgen. Alternativ können Optimierungsverfahren eingesetzt werden. In jedem Fall müssen geeignete Kriterien bestimmt werden, welche definieren wann das Modeltuning abgeschlossen ist.

Sandwichverbund Analog zum Kernmaterial wird in der folgenden Untersuchungsebene der Sandwichverbund untersucht. Hierfür eignet sich der 4-Punktbiegeversuch (z.B. nach ASTM C393) sehr gut, da dieser eine Vielzahl verschiedener Versagensmechanismen hervorrufen kann. Es sollte untersucht werden ob das Verbundmodell lokales Eindringen, Schubversagen und Deckschichtversagen richtig abbilden kann. Das Ergebnis für die zweite Untersuchungsebene ist in Bild 5 beispielhaft dargestellt.

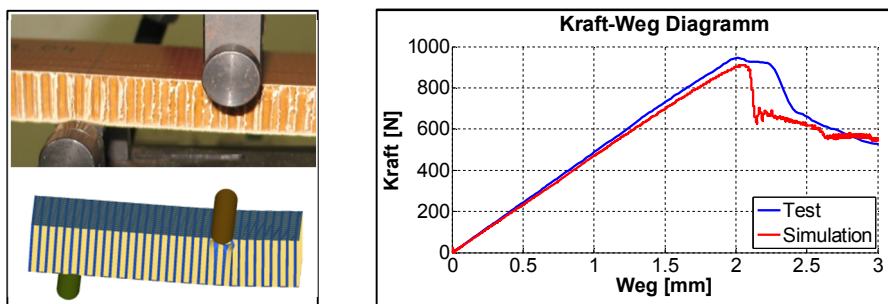


Bild 5: Virtueller Test des Sandwichverbundes am Beispiel des 4-Punkt-biegeversuchs nach ASTM C393 zur Validierung des Verbundmodells

Zielstruktur Abschließend werden die Erkenntnisse aus den zuvor analysierten Ebenen in das Modell der Zielstruktur integriert. Das vorläufige Ergebnis der durchgeführten Studie ist in Bild 6 dargestellt. Das Schubversagen des Kerns scheint richtig abgebildet zu werden. Der lineare Verlauf in Phase ③ wird vom virtuellen Modell jedoch überschätzt, während das Totalversagen zu früh auftritt. Eine mögliche Erklärung wäre, dass der Effekt des Ablösens der Klebmasse von der unteren Deckschicht eine wichtigere Rolle als zunächst

angenommen spielt. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um der auftretende Abweichung zwischen virtuellem und realem Test nachzugehen.

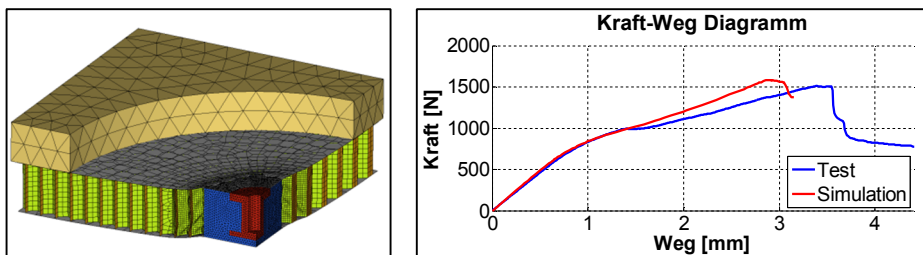


Bild 6: Virtueller Test der Zielstruktur (Insertauszugversuch)

3.4 Modellverwendung und Rückführung der Ergebnisse

Abschließend erfolgt die Nutzung des entwickelten Modells sowie die Rückführung der gewonnen Erkenntnisse in den PEP. Im Anwendungsbeispiel ist das Primärziel in Zukunft frühzeitig abschätzen zu können, wie sich die Festigkeit der Verbindung bei der Verwendung von alternativen Kernmaterialien und Deckschichten verändert. Der Einfluss eines anderen Kerns könnte beispielsweise durch die Wiederholung der ersten Ebene und die anschließende Integration der neuen Parameter ins Gesamtmodell vorhergesagt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird auf Basis bestehender Ansätze zum Aufbau virtueller Testverfahren, ein angepasstes anwendungsnahes Vorgehen zur Entwicklung eines virtuellen Testmodells für Sandwichstrukturen am Beispiel einer Honigwaben-Insertverbindung vorgestellt. Das vorläufige Ergebnis des entwickelten Modells liefert bereits eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich um die noch auftretenden Abweichungen erklären zu können. Weiterhin muss noch nachgewiesen werden, dass das entwickelte Modell nicht nur die der Entwicklung zugrundeliegende Insertverbindung richtig abbildet, sondern auch Verbindungen mit variierenden Deckschichten und Kernmaterialien bzw. –geometrien. Schließlich soll das vorgestellte Vorgehen auf weitere Sandwichstrukturen angewendet und weiterentwickelt werden.

Literatur

- [1] Stark, R. et al.: "Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie" in: Informatik Spektrum, Vol. 34, S. 20-28, 2011

-
- [2] Zenkert, D.: "The Handbook of Sandwich Construction", EMAS Ltd., Worcestershire UK, 1997
- [3] Cox, B. N. et al.: "Practical Challenges in Formulating Virtual Tests for Structural Composites" In: Computational Methods in Applied Sciences, Vol. 10, S. 57-75, 2008
- [4] Wood K.: Virtual testing of composites: Beyond make & break, in: High-Performance Composites, Gardner Business Media Inc., Nov. 2012
- [5] "Composite Materials Handbook. Volume 3: Polymer Matrix Composites. Materials Usage, Design and Analysis" (MIL-HDBK-17-3F), Washington DC, Department of Defense, 2002.
- [6] Okereke, M.I. et al.: "Virtual testing of advanced composites, cellular materials and biomaterials: A review", Composites Part B (60), S.637-662, 2014.
- [7] Noor, A. et al. "Computational models for sandwich panels and shells", Applied Mechanics Reviews, Vol. 49, Nr. 3, S. 155-199, 1996.
- [8] Seemann, R. et al.: "FE-Modelling guidelines for the dimensioning of cabin interior under stationary dynamic loads", Proceed. of the ICAS 2014, St. Petersburg, accepted for publication, 2014.
- [9] Zinno, A. et al. "Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application", Composite Structures Vol. 92, Nr. 9, S. 2208–2219, 2010
- [10] Abrate, S. et al.: Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures, in Solid mechanics and its applications Vol. 192, Springer, 2013
- [11] Thomsen, O.T.: "Sandwich plates with 'through-the-thickness' and 'fully potted' inserts: evaluation of differences in structural performance", Composite Structures, Vol. 40, Nr .2, S. 159-174, 1998
- [12] Heimbs S. und Pein M., "Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts". Composite Structures, Vol. 89, Nr .4, S. 575-588, 2009
- [13] Insert Design Handbook, ECSS-E-30-06 Draft 3, European Cooperation for Space Standardization , 2005
- [14] Seemann, R. and Krause, D.: "Numerical Modelling of Nomex Honeycomb Cores for Detailed Analyses of Sandwich Panel Joints". Proceed. of the WCCM XI, Barcelona 2014.

Vergleich von Optimierungsalgorithmen anhand der Charakteristik von endlosfaserverstärkten Kunststoffen

Markus Kellermeyer^{1,2} und Sandro Wartzack¹

1 CADFEM GmbH

2 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg

Abstract

This paper gives a short overview for the most important possibilities for parametric optimization methods in the field of numerical simulations. Subsequently criterias are listed showing the optimization characteristics of continuous fiber reinforced plastics like CFK. The evaluation of the most important optimization settings is done by an automatic process using a benchmark from industry and ensuring reliable results by performing several optimization runs. For this typical composite benchmark properties are included which make it necessary to differ from established optimization settings. With a sensitivity study and these findings the engineer can be supported to make the right decisions with regard to optimization settings in order to save time due to less runs that are necessary for his composite optimization.

Keywords: optimization, composite, best practice

1 Vorwort

Die Bandbreite an parametrischen Optimierungsalgorithmen im Bereich der Simulation ist groß. Die Entscheidung, welcher dieser Algorithmen in einer bestimmten Situation am effektivsten arbeitet ist oft von großer Bedeutung,

wenn Ergebnisse für Designpunkte durch zeitintensive Simulationsrechnungen ermittelt werden müssen. Viele Möglichkeiten in Detaileinstellungen solcher Algorithmen machen die Thematik allerdings undurchsichtig, und es ist für den normalen Anwender fast unmöglich, situationsbedingt die beste Entscheidung zu treffen.

Endlosfaserverstärkte Kunststoffe im Speziellen weisen dabei Eigenschaften auf, welche es neben weiteren allgemeinen Kriterien notwendig machen, eine individuelle Optimierungscharakteristik zu ermitteln. Anhand dieser können der vielversprechendste Optimierungsalgorithmus sowie seine Detaileinstellungen ermittelt werden.

2 Optimierungsalgorithmen

In der Literatur ist eine Vielzahl an verschiedenen Optimierungsalgorithmen für parameterbasierte Modelle zu finden. Die Einsatzbereiche sind dabei vielfältig und stellen unterschiedliche Herausforderungen. Jede Optimierungsaufgabe besitzt also eine bestimmte Charakteristik, anhand derer einerseits die Stärken eines Optimierungsalgorithmus gewählt werden sollten, sowie deren Detaileinstellungen optimal angepasst sein sollten. Vor allem bei zeitintensiven Berechnungen wie es bei komplexen Faserverbundberechnungen der Fall ist, ist die Wahl des richtigen Algorithmus und seinen Einstellungen ganz entscheidend. Das Ziel muss eine zuverlässig zum potentiellen Optimum konvergierende sowie zeitsparende Optimierung sein. Zweites bedeutet konkret eine Optimierung mit möglichst wenigen Rechnungen. Im Folgenden werden die Grundzüge von häufig in der Praxis verwendeten Verfahren vorgestellt, sowie deren Stärken und Schwächen benannt. In Punkt 3 werden diese Punkte auf die konkreten Aufgabenstellungen von Simulationen endlosfaserverstärkter Kunststoffe übertragen.

2.1 Evolutionärer Algorithmus (EA)

Evolutionäre Algorithmen imitieren Prozesse aus der biologischen Evolution. Verschiedene Variationen sind in der Literatur zu finden, aber ihnen allen ist meist gemeinsam, dass von Generation zu Generation eine Selektion, eine Rekombination und eine Mutation stattfinden. Häufig verwendete evolutionäre Algorithmen kombinieren genetische Algorithmen mit evolutionären Strategien, um sowohl den globalen als auch lokalen Raum nach optimalen Designs abzusuchen. Als Basis dienen dazu die Arbeiten von [1] und [2].

Um eine Startpopulation festzulegen, greifen viele Methoden auf eine zufallsbasiert Designerstellung zurück. Sehr viel effektiver gestaltet sich allerdings

die Optimierung bei einer voran geschalteten Sensitivitätsstudie, in welcher eine geeignete Startpopulation manuell ermittelt werden kann. Bild 1 stellt den prinzipiellen Ablauf eines global und lokal agierenden evolutionären Algorithmus dar.

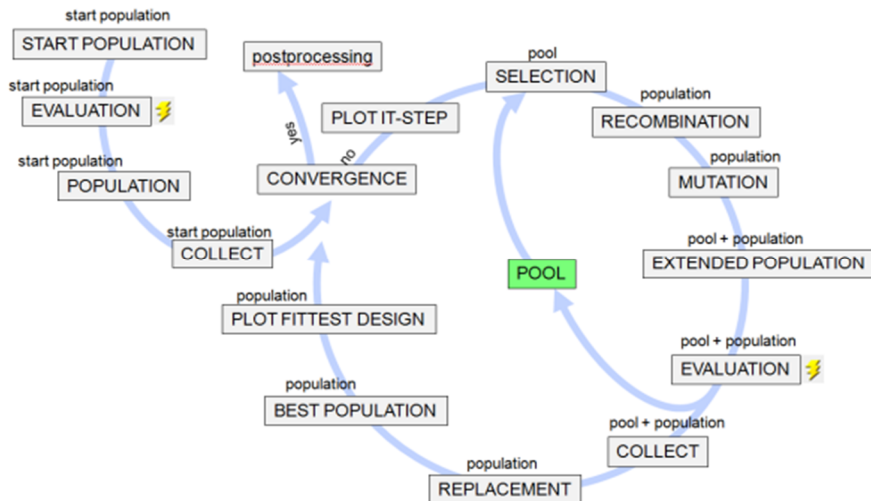


Bild 1: Ablaufschema eines evolutionären Algorithmus

Folgende Möglichkeiten für Detailsinstellungen in den Bereichen Population, Selektion, Rekombination und Mutation zeigen die Vielfältigkeit dieser Algorithmen, aber gleichzeitig auch die Schwierigkeit, die richtigen Einstellungen für Faserverbundaufgaben zu bestimmen:

1. Startpopulation
 - a. Zufallsbasiertes Festlegen der Startpopulation
 - b. Manuelles Festlegen der Startpopulation
2. Selektion
 - a. Sortierung der Designs nach ihrer Fitness
 - b. Sortierung der Designs nach dem Rang ihrer Fitness
 - c. Anzahl der zu selektierenden Designs (Eltern)
 - d. Einfluss bei Verletzung von Zwangsbedingungen bei der Selektion
3. Rekombination

- a. Jeder Parameter wird potentiell untereinander ausgetauscht. Eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit entscheidet darüber.
- b. Gruppenbildung von Parametern. Die Gruppen werden untereinander ausgetauscht. Der Benutzer entscheidet über die Anzahl der Gruppen.
- c. Arithmetisch - vom Benutzer kann der Anteil zum Parametertausch festgelegt werden

4. Mutation

- a. Mutationstyp
- b. Mutationsrate
- c. Standardabweichung der Verteilungskurve

Da Composite Aufgaben in den meisten Anwendungen sehr viele lokale Optima aufweisen, soll auch in den folgenden Studien ein besonderes Augenmerk auf eine globale Optimierung gelegt werden. Dabei stellt sich für den allgemeinen Anwender die Frage, mit welchen Einstellungen ein Evolutionärer Algorithmus ein befriedigendes und schnelles Ergebnis liefert. So können beispielsweise mit geringen Mutationsraten lokale Optima besser untersucht werden, bei großen hingegen potentiell noch bessere Kandidaten durch eine eher global ausgerichtete Suche erkannt werden. Den Unterschied zeigt Bild 2. Links wurde zu Beginn eine hohe und zum Ende hin eine geringe Streuung für die Standardabweichung der Mutation festgelegt. In der Mitte wurde sie sowohl zu Beginn als auch zum Ende hoch gesetzt und rechts beidemale gering.

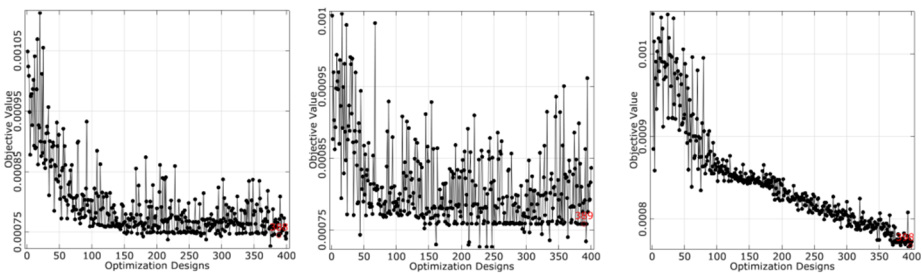


Bild 2: Einfluss der Mutationseinstellung auf den Optimierungsverlauf

Attraktiv ist der evolutionäre Algorithmus für Faservundberechnungen aus dem Grund, dass auch diskrete Parameter berücksichtigt werden können. So existieren beispielweise bei der Frage, wie viele Schichten verwendet werden

sollen ihrem Wert nach sortierbare diskrete Parameter und bei der Frage, in welcher Reihenfolge Schichten angeordnet werden sollen nicht sortierbare diskrete Parameter. Zudem sind in vielen Fällen mehrere Zielfunktionen zu erfüllen, was eine Pareto Optimierung notwendig macht. Von Nachteil sind sicherlich die langsamere Konvergenz sowie das notwendige Wissen über die vielen Möglichkeiten in den Detailinstellungen.

2.2 Particle Swarm Algorithmus (PSO)

Auch hier zeigen sich verschiedene Variationen, welche in [3] aufgezeigt werden. Es lässt sich allgemein sagen, dass der Particle Swarm Algorithmus das soziale Verhalten eines Schwarms imitiert. Durch einen regelmäßigen Austausch an Informationen kann der Schwarm seine Suche auf interessante Stellen konzentrieren, die ein Optimum darstellen könnten.

Auch hier wird also mit einer Population gearbeitet. Eine Weiterentwicklung wird einerseits durch das persönliche Verhalten eines jeden Individuums sowie durch das Gesamtverhalten des Schwarms beeinflusst. Dabei finden eine Selektion, eine Bewegung und eine Mutation statt. Die Selektion dient zur Ermittlung guter Positionen, in welche der Schwarm gelenkt werden kann. Sie ist in diesem Fall besonders wichtig bei Paretoaufgaben. Mit der Bewegung kann eine neue Suchrichtung ermittelt werden und die Mutation ist ähnlich wie bei dem evolutionären Algorithmus zu betrachten.

Folgende Variationsmöglichkeiten sollen wieder aufzeigen, dass bereits die Grundvariante des Particle Swarm Algorithmus sehr variabel einstellbar ist und damit ebenfalls auf die Optimierungscharakteristik der Aufgabe angepasst kann:

1. Startpopulation
 - a. Zufallsbasiertes Festlegen der Startpopulation
 - b. Manuelles Festlegen der Startpopulation
2. Selektion
 - a. Ermittlung der Fitness nach einer „strict dominance-based methode“
 - b. Ermittlung der Fitness nach einer „dominance based fitness method“
3. Bewegung
 - a. Suchstrategie
 - b. Persönlicher Anteil bei der Definition der neuen Suchrichtung (am Anfang und am Ende der Optimierung)

-
- c. Persönliche Beschleunigung und Schwarmbeschleunigung bei der neuen Suche (am Anfang und am Ende der Optimierung)
5. Mutation
- a. Mutationstyp
 - b. Mutationsrate
 - c. Standardabweichung der Verteilungskurve

Der Particle Swarm Algorithmus ist ebenfalls für diskrete Parameter geeignet und kann mit mehreren Zielfunktionen sowie Zwangsbedingungen gute Lösungen finden, was ihn für Faserverbundoptimierungen zu einer attraktiven Alternative macht. Er konzentriert sich anders als der evolutionäre Algorithmus auf eine ausgeprägte Darstellung einer möglichen Pareto Front, betreibt die Suche nach möglichen anderen Optima jedoch nicht so intensiv wie der EA.

2.3 Gradientenbasierte Algorithmen (NLPQL)

Diese Verfahren setzen voraus, dass über den Designraum eine repräsentative Antwortfläche erstellt werden kann. Für Compositeaufgabe stellt diese Optimierung nur dann eine Lösung da, wenn diskrete Parameter nicht existent sind – wenn also beispielsweise der Lagenaufbau selbst als nicht veränderbar angesehen wird und lediglich die Faserwinkel (aber eine geringe Anzahl) angepasst werden sollen. Auch wenn oft diskrete Parameter als kontinuierliche Parameter betrachtet werden ist dies nicht möglich wenn nicht sortierbare diskrete Parameter vorliegen.

2.4 Adaptive Response Surface Methoden (ARSM)

Auch hier ist die Eignung dann vorhanden, wenn lediglich kontinuierliche Parameter existieren. Über einen vordefinierten Designraum wird eine ‚einfache‘ Antwortfläche gespannt, anhand welcher ein Optimum bestimmt wird, welches als neuer Startpunkt dient. Um diesen wird eine verkleinerte neue Antwortfläche generiert. Dieses Vorgehen wiederholt sich solange bis sich eine Stagnation einstellt. Die ARSM ist v.a. dann geeignet, wenn viele kontinuierliche Parameter existieren.

2.5 Stochastic Design Improvement (SDI)

Stochastic Design Improvement gilt als einfacher Algorithmus, welcher v.a. bei Aufgaben eingesetzt wird, bei denen wenig über den Designraum bekannt ist. Mit Hilfe eines Latin Hypercube Samplings (LHS) werden Designs um einen Startpunkt herum erstellt. Das Beste dieser Designs bestimmt den

Startpunkt für ein erneutes LHS und lenkt somit das Optimum in eine bestimmte (lokale) Richtung. In diesen Betrachtungen ist dieses Verfahren eher ungeeignet, da eine globale Suche ein wesentlicher Erfolgsfaktor für eine Faserverbundoptimierung ist.

3 Optimierungskarakteristik von Faserverbundstrukturen

Die gezeigten Einstellungen der Algorithmen sollten in Abhängigkeit von der Optimierungskarakteristik gewählt werden. Dabei gibt es Kriterien, welche eindeutig von Anfang an festgelegt werden können (siehe [4]) sowie Kriterien die anhand von Voruntersuchungen mittels Sensitivitätsstudien ermittelt werden können. Neben Kriterien, die für allgemeine Optimierungsaufgabe angeführt werden können, lassen sich auch Kriterien für endlosfaserverstärkte Kunststoffe definieren.

3.1 Allgemeine Kriterien zur Festlegung der Optimierungskarakteristik

- Anzahl der Zielfunktionen
- Kontinuierliche oder diskrete Parameter
- Anzahl der (wichtigen) Eingangsparameter
- Optimierungspotential (Ermittlung in Sensitivitätsstudie)
- Höhe der Wahrscheinlichkeit für Designausfälle
- Häufigkeit der Verletzung von Zwangsbedingungen
- Numerisches Rauschen

3.2 Kriterien von endlosfaserverstärkten Kunststoffen

- Lokale Sprünge der Auswertestellen
- Wechsel der Versagensschicht
- Wechsel der Versagenskriterien
- Variationsbreite der Faserorientierungen
- Anzahl der Schichten
- Rechenzeit

4 Vergleich von Optimierungseinstellungen

Um die Qualität eines Optimierungsalgorithmus bewerten zu können, muss berücksichtigt werden, dass bei stochastisch basierten Verfahren bei jedem durchgeführten Optimierungslauf ein anderes Ergebnis zu erwarten

ist. Dabei kann das Optimum bei viel Glück schon nach wenigen Berechnungen gefunden worden sein, bei viel Pech erst nach sehr vielen. Eine Bewertung macht also nur dann Sinn, wenn die Performance über mehrere Testläufe durch den Mittelwert und seine Streuung bewertet wird. Dabei kann auf Vertrauensintervalle zurückgegriffen werden, welche z.B. eine Aussage mit einer 95%-igen Wahrscheinlichkeit liefern können, dass der tatsächliche für die Performance repräsentative Wert in einem bestimmten Intervall liegt. Bei den nachfolgenden Untersuchungen zeigte sich, dass eine Bewertung nach ca. 150 Durchläufen ein gutes Maß für einen Vergleich zwischen den Methoden und Einstellungsmöglichkeiten liefert. Bild 3 zeigt, wie sich bei einem evolutionären Algorithmus erst nach ca. 100 Optimierungen ein vernünftiges Vergleichsmaß für das Optimierungsziel und die dazu notwendigen Rechenläufe einstellt.

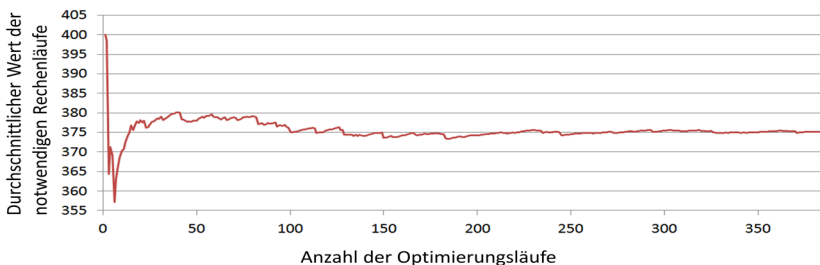


Bild 3: Entwicklung des Mittelwerts der notwendigen Rechenläufe

Aufgrund der daraus sich ergebenden Anzahl an notwendigen Rechnungen wurden im Vorfeld gezielt nur für interessant empfundene Algorithmen und Einstellungen gewählt.

5 Faserverbundbenchmark und Schlussfolgerungen

Verwendet wurde ein Modell aus der Praxis, welches möglichst viele unterschiedliche Charakteristiken von endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffen aufweist. Der Lagenaufbau wurde fertigungsgerecht und objektorientiert definiert. Nach der Definition von Materialdaten wurden Fabrics festgelegt, welche wiederum zu Stackups kombiniert wurden. Diese wurden dann zur Definition der Plies verwendet, welche zu Plygruppen zusammengefasst wurden. Diese Gruppen wurden anschließend unterschiedlichen Bereichen des Modells zugewiesen. Die Bereiche können sich dabei auch überlagern. Variabilität ist möglich in der Materialdefinition, den Fabrics, den Stackups, den Plies, den Plygroups und den Bereichen.

Somit können viele der genannten Kriterien untersucht werden. Verschiebungen von verstärkenden Bereichen führen beispielsweise zu Verlagerungen im Kraftfluss und somit zu einem Sprung der Versagensstellen. Auch ein Wechsel der Versagensschicht kann in diesem Modell beobachtet werden.

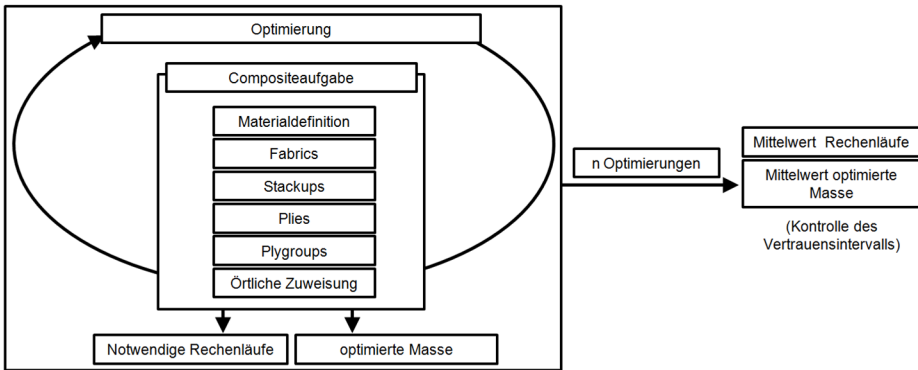


Bild 4: Ablauf der Optimierungsbenchmarks

Aus unterschiedlichen Algorithmen sowie deren Einstellungen bei Mutation, Population und Selektion ergeben die in Bild 5 dargestellten Ergebnisse:

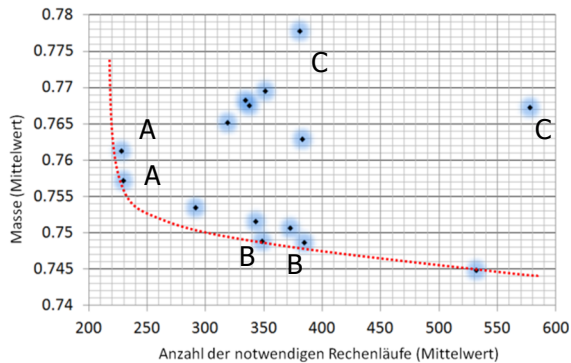


Bild 4: Performancebewertung der Algorithmen und Einstellungen

Daraus abgeleitet lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

1. Im Mittel sind evolutionäre Algorithmen zu bevorzugen (A,B)

-
2. Die schnellste Performance ergibt sich am ehesten bei extrem hohen Mutationsraten im EA oder einer Reduzierung der Designs pro Generation (A)
 3. Die Wahrscheinlichkeit, im Schnitt eine bessere Masse zu erhalten, kann am besten durch eine Erhöhung der Designs im Archiv des EA erreicht werden (B)
 4. Abzuraten ist von PSO mit hoher Populationszahl (C) aufgrund der sehr langsamen Konvergenz und der trotzdem nicht wesentlich besseren mittleren Massenreduktion im Vergleich zu EA

6 Ausblick

In weiteren Schritten soll die Wissensdatenbank noch weiter wachsen und dem Konstrukteur zur Entscheidungshilfe dienen. Damit können zukünftig viele Rechenläufe durch nicht optimale Optimierungseinstellungen gespart werden. Vielversprechend scheint auch ein Informationsaustausch zwischen parallel verlaufenden Optimierungsstrategien. Hierzu soll in den nächsten Schritten eine Steuereinheit eingesetzt werden, welche zwischen den Strategien vermittelt und somit Stagnation vermeiden soll.

Literatur

- [1] Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.
- [2] Rechenberg, I. (1973). *Evolutionstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog, Stuttgart
- [3] Coello, C.A. & Reyes-Sierra, M. (2006). Multi-objective particle swarm optimizers: A survey of the state-of-the-art. *International journal of Computational Intelligence Research*
- [4] Schneider, D; Ochsenfahrt, D. et al. (2010): "Benchmark of Nature – inspired Optimization Algorithms in fields of single and multiobjective scopes"

Darstellung der Herausforderungen einer ganzheitlichen Nutzerbeschreibung

Johanna Walter, Kristin Paetzold
*Institut für Technische Produktentwicklung;
Universität der Bundeswehr München*

Abstract

Products, which support people's autonomy and self-determination, have to be adapted to the users' wishes, needs and circumstances. For the development of those products it is not sensible to focus on performance restrictions, but the whole circumstances have to be considered in the description of the system of objectives. The approach described here is based on methods from socio sciences and allows to describe the users systematically. For this reason it is possible to get a more suitable description of the system of objectives. This procedure helps to reduce the development risk, as the aspects of acceptance are considered quite early in the design process.

Keywords: human centered design, user integration, technology acceptance, user description

1 Einleitung

Die Effektivität von Produkten wird heute sehr stark durch die Interaktionen zwischen dem Nutzer und dem Produkt beeinflusst. Dies liegt nicht nur an der ständig steigenden Komplexität der Produkte, sondern auch an der zunehmenden Komplexität der Mensch-Maschine-Interaktion. Die Effektivität der Produkte wird geprägt durch die Art und Weise, wie der Mensch mit ei-

nem Produkt umgeht. Die wiederum hängt von seiner Leistungsfähigkeit sowie seiner Lebens- und Handlungssituation ab.

Produkte werden für einen Systemzweck entwickelt. Die durch den Ingenieur vorauszudenkende Wirkung eines Produktes soll den Menschen in der Bewältigung seines Alltages in spezifischen Situationen unterstützen. Ziel der Entwicklungstätigkeit muss es sein, den Menschen in seinem Streben nach einem selbstbestimmten und selbständigen Leben zu unterstützen. Damit wird der Mensch für die Produktentwicklung zum Maß aller Dinge. In diesem Sinne wurden bislang in der Produktentwicklung Ansätze verfolgt, die auf die Leistungseinschränkungen des Menschen fokussieren.

Für die Produktentwicklung (PE) bedarf es daher einer ganzheitlichen Menschbetrachtung, um einerseits die Zieldefinition für die PE zu vervollständigen, andererseits aber auch Grundlagen für eine Produktvalidierung zu schaffen. Eine solche Sicht bedarf neben der Beschreibung der Leistungsfähigkeiten des Menschen als Nutzer auch seine Motivation zum Handeln, genauso wie das soziale Umfeld in dem das Produkt zum Einsatz kommen soll. Eine derart umfassende Menschbeschreibung bringt die Verschiebung der Systemgrenzen mit sich: betrachtet wird nicht mehr nur das technische System, sondern ein soziotechnisches System im Allgemeinen, woraus eine systemische Mensch-Technik-Integration im speziellen abgeleitet werden kann. Im Folgenden soll ein Ansatz zur Beschreibung des Menschen auf Basis sozialwissenschaftlicher Konzepte vorgestellt werden.

2 Interpretation des Produktes durch den Nutzer

Die auf die Leistungsfähigkeit des Menschen reduzierte Sichtweise ist für die Produktentwicklung aus zweierlei Sicht kontraproduktiv. Einerseits führt eine solch defizitorientierte Betrachtungsweise leicht zur Stigmatisierung, wie Erfahrungen aus der Entwicklung von Produkten für Senioren deutlich zeigen. Andererseits vernachlässigt eine solche Sichtweise, dass sich die Nutzung technischer Systeme nicht aus rein rationalen Gründen wie Leistungseinschränkungen erklären lassen, sondern auch andere weiche Faktoren für die Nutzung eine Rolle spielen. Die Definition des Systemzweck bzw. die Beschreibung des Zielsystems für die Entwicklung, die auf die Kompensation von Leistungseinschränkungen reduzierte ist, vernachlässigt Kumulationen von Leistungseinschränkungen, wie sie z.B. infolge von Multimorbidität im Alter häufig zu beobachten ist. Gleichzeitig werden natürliche Kompensationsmechanismen vernachlässigt (Blinde entwickeln z.B. häufig ein sehr gutes Gehör). Hinzu kommt weiterhin, dass motivationale bzw. psychologische Aspekte, genauso wie soziale Aspekte, die die Lebenssituation beschreiben, nicht

ausreichend berücksichtigt sind. Diese Aspekte sind aber essentiell, da sie die Ausnutzung der eigenen Leistungsfähigkeit beschreiben. Wird z.B. ein technisches System entwickelt, welches das Gehen unterstützen soll, ist es zwar irrelevant, was die Ursache der Gehbehinderung ist (Krankheit oder Alter), es bedarf aber einer Spezifizierung der Gehbehinderung, die sich in einem spezifischen Datensatz charakteristischer Parameter manifestiert, mit dem gleichzeitig die Leistungsgrenzen verbunden werden.

Nutzer und Entwickler haben sehr unterschiedliche Sichten auf ein Produkt. Sarodnik nennt dies „... wechselseitige symmetrische Ignoranz ...“ [1]. Dies lässt sich sehr gut mit einem Ansatz zur Erfassung und Beschreibung von Produktsprache verdeutlichen, wie in Bild 1 dargestellt. Während Ausgang aller Entwicklungstätigkeit durch den Ingenieur der Systemzweck ist, der durch Funktionen beschrieben wird, die immer weiter bis zum Produkt konkretisiert werden, sieht der Nutzer üblicherweise zuerst das Produkt und interpretiert dieses. Der Nutzer probiert das Produkt und erlebt den Nutzen in seiner spezifischen Lebens- und Handlungssituation, hierdurch erschließt er sich den Systemzweck [2].

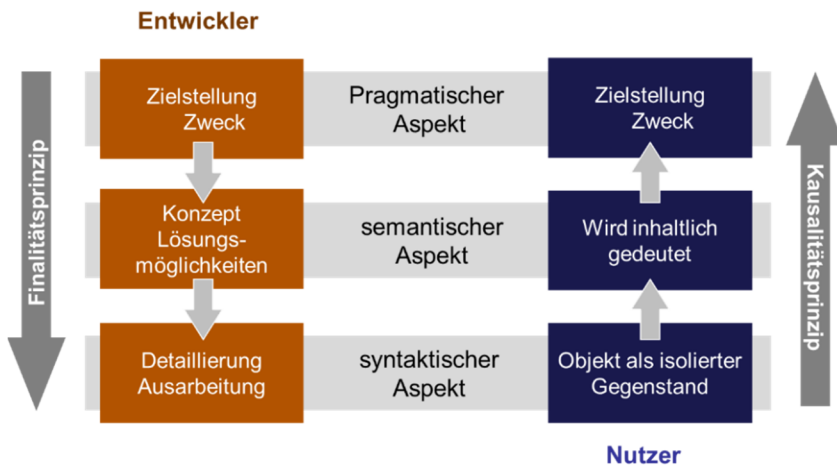


Bild 1: Unterschiedliche Sichten durch Entwickler und Nutzer auf ein Produkt

Der Entwickler muss also bereits in der Beschreibung des Zielsystems und der Transformation in Anforderungen nicht nur über die technische Funktion nachdenken, um die Akzeptanz abzusichern, sondern er muss auch wissen, wie die Prozesse der Interpretation ablaufen und welche Faktoren hierbei eine Rolle spielen.

3 Ansätze zur Interpretation des Nutzerverhaltens

Als Grundlage für die Zielsystembeschreibung bzw. für die Zweckbestimmung des Systems dient im Allgemeinen die grundsätzliche Überlegung, welche Tätigkeiten im Alltag oder im Berufsumfeld unterstützt werden sollen. Heute Standard ist dabei die Überlegung, welche Leistungsfähigkeiten der Mensch zur Verrichtung dieser Tätigkeiten mitbringt und welche fehlenden Fähigkeiten durch das technische System ergänzt werden müssen. Dabei ist es unerheblich, ob diese Leistungseinschränkungen alters- oder krankheitsbedingt sind oder ob die menschliche Leistungsfähigkeit prinzipiell nicht ausreicht, eine Tätigkeit zu verrichten (wie z.B. das Heben schwerer Gegenstände). Den zu unterstützenden Tätigkeiten können aus der erwarteten Leistungsfähigkeit heraus direkt technische Funktionen zugeordnet werden, die die Basis für die Entwicklungstätigkeit liefern. Aus dem Bereich der Arbeitswissenschaften stehen hierfür eine Vielzahl von Katalogen zur Verfügung, die einzelne Leistungsfähigkeiten des Menschen beschreiben und konkretisieren [3]. Im Kontext der senioren- bzw. generationengerechten Produktentwicklung wurden diese Kataloge ergänzt und erweitert, sodass auch Leistungseinschränkungen durch spezifische Lebenssituationen erfasst und beschrieben sind [z.B. 4].

Diese Berücksichtigung des Menschen reicht aber für die Optimierung der Anforderungen für die Entwicklung nicht aus, weil die Nutzerseite nur durch eine reine Funktionsbetrachtung integriert ist, der Interpretationsprozess durch den Nutzer aber weitestgehend vernachlässigt wird. Um der Herausforderung gerecht zu werden, die Nutzerinterpretation besser zu verstehen, stehen Methoden der Nutzerintegration sowie aus der Akzeptanzforschung zur Verfügung.

3.1 Methoden der Nutzerintegration

Reinicke definiert Nutzerintegration als „... die Einbindung von Nutzern in verschiedene Phasen der Produktentstehung...“ [5, S. 22], ursprünglich mit dem Ziel, Wünsche und Bedürfnisse des Nutzers besser zu verstehen. Mit der Methode der Nutzerintegration werden heute in erster Linie Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit (Usability) eines Produktes ermittelt, der Fokus hat sich aber in der letzten Zeit auf die Bewertung von User Experiences (UX) erweitert.

„Die Gebrauchstauglichkeit eines Produktes beschreibt das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Nutzer in einem Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effizient und zufriedenstellend zu errei-

chen" [6, S. 4]. Effizienz beschreibt hierbei das Aufwand-Nutzen-Verhältnis, die Effektivität beschreibt die Genauigkeit und Vollständigkeit der Zielerreichung und die Zufriedenheit beschreibt die positive Einstellung zum Produkt. Betrachtet man diese Einzelaspekte der Gebrauchstauglichkeit wird deutlich, dass sich die Einzelaspekte nur durch die Nutzung und das Erfahren des Produktes durch den Nutzer ergeben. Es wird auch deutlich, dass das damit einhergehende „Erleben“ des Produktes von Faktoren aus den persönlichen Erfahrungen des Nutzers, seiner Motivation zum Handeln, aber auch durch Einflüsse aus dem sozialen Umfeld geprägt sind. Damit wird zwar eine Gebrauchstauglichkeit ermittelt, die die „weichen“ Faktoren in der Bewertung berücksichtigt, diese aber nicht näher erfasst bzw. deren Einfluss nicht qualifizieren kann.

Vor allem bei der Nutzerintegration in frühen Phasen der Entwicklung wird eine Schwäche des Ansatzes deutlich: Stehen noch keine Prototypen für den Test zur Verfügung, wird häufig auf Produktmodelle wie z.B. 3D-CAD-Modelle, Bilder oder Skizzen zurück gegriffen, die der Nutzer nur bedingt intuitiv versteht und die dem Nutzer daher erklärt werden müssen. Dies führt dazu, dass der Nutzer auch die Intention hinter dem Produkt vom Entwickler dargestellt bekommt, was den Interpretationsprozess beeinflusst. Zudem erfolgt der Test häufig in spezifischen Situationen, die nur bedingt mit realen Handlungssituationen vergleichbar sind.

Vor allem dem letztgenannten Punkt kann mit dem erweiterten Konzept der Erfassung der User Experiences entgegen gewirkt werden. Während mit der Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit der Fokus stark auf der Nutzungsphase liegt, erweitert der Ansatz UX diese, indem bei der Interpretation des Produktes durch den Nutzer auch die Phasen vor und nach der Nutzung Berücksichtigung finden. Unter UX wird *„... a person's perception and response that result from the user and/or anticipated use of a product or service ...“* verstanden [7]. Hierin sind auch Emotionen, Erwartungen, Präferenzen, Wahrnehmungen, physiologische und psychologische Reaktionen und Verhaltensweisen berücksichtigt, die vor, während oder nach der Nutzung entstehen. Damit wird der Begriff der Gebrauchstauglichkeit deutlich erweitert. Ermittelt werden z.B. Emotionen oder die Wahrnehmung des Produktes, die die Nutzererfahrungen widerspiegeln und damit auch semantische Aspekte im Interpretationsprozess thematisieren.

Vor allem mit der Ermittlung der UX wird man der Forderung gerecht, dass soziale und psychologische Faktoren die Interpretation des Produktes beeinflussen und diese deshalb in der Produktbewertung zu berücksichtigen sind. Zielstellungen, die der Nutzer mit dem Produkt verfolgt, können auf-

grund der dem Interpretationsprozess zugrunde liegenden psychologischen und sozialen Einflussfaktoren grundsätzlich von der vom Entwickler mit der Entwicklung verfolgten Zielstellung abweichen (Bild 2). Für die Produktentwicklung selbst bringen die Erkenntnisse aber nur wenig Nutzen, weil zwar ermittelt wird, welche Funktionen des Produktes in welcher Art und Weise vom Nutzer angenommen werden, auf die Ursache für Annahme oder Ablehnung kann nur bedingt rückgeschlossen werden, weil die Einflussfaktoren auf den Entscheidungsprozess des Nutzers nicht bekannt sind. Deren Kenntnis aber ist Grundvoraussetzung, um die Funktion des Produktes von vornherein an den Nutzer anpassen zu können.

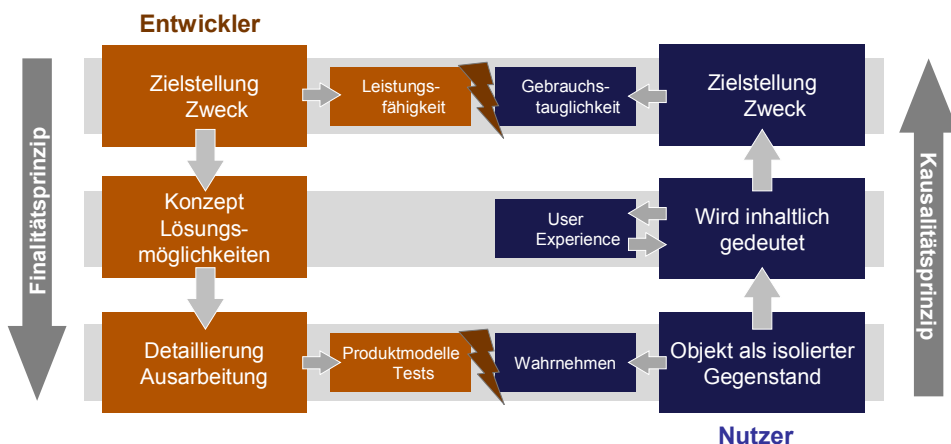


Bild 2: Methoden der Nutzerintegration im Interpretationsprozess

3.2 Methoden aus der Akzeptanzforschung

Eine andere Möglichkeit, die Nutzung des Produktes durch den Nutzer zu erfassen und zu beschreiben liefert die Akzeptanzforschung. Hierbei handelt es sich um ein breites Fachgebiet, bei dem sowohl verhaltenstheoretische, psychologische als auch ökonomische Aspekte in die Bewertung einfließen.

Technologieakzeptanzmodelle basieren auf der Theorie des überlegten Handelns nach [8]. Besonders erwähnt werden soll das Technikakzeptanzmodell (TAM) nach Davis [9] und die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) nach Venkatesh [10], da sich aus diesen eine Vielzahl von Ansätzen zur Akzeptanzbeschreibung ableiten lassen (Zusammenfassung z.B. in [11]). Als Basis für die Bewertung von Produkten mittels TAM werden Aussagen zur „wahrgenommenen Nützlichkeit“ und zur „wahrgenommenen

Einfachheit“ im Sinne von Kosten-Nutzen-Überlegungen abgeleitet. Produkte werden stärker aus dem Anwendungskontext des Nutzers heraus bewertet, damit fließen auch Lebens- und Handlungssituation mit ein.

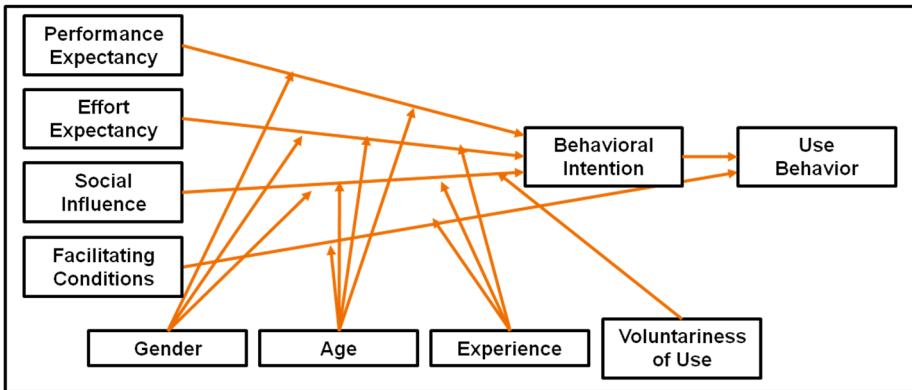


Bild 3: Modell zur Unified Theory of Acceptance and Use of Technology [12]

Der UTAUT-Ansatz ist deswegen von besonderer Bedeutung, weil die Grundidee hinter den Modellansätzen darin besteht, verschiedene Theorien aus der Akzeptanzforschung zu einem integrierten Modell zusammen zu fassen (Bild 3). Neuere Lösungsansätze versuchen der in der Realität erkennbaren Wechselwirkungen und Beeinflussungen von Technologien resp. dem Produkt und der Umwelt gerecht zu werden. Exemplarisch sei hier der „Mutual-Adaption-Ansatz“ nach Leonard-Barton [13] genannt. Dieser geht davon aus, dass weder die Technologie an den Nutzer noch der Nutzer an die Technologie angepasst wird, sondern dass eine dynamische wechselseitige Anpassung erfolgt.

Die Schwäche der Ansätze aus der Akzeptanzforschung ist darin zu sehen, dass die letztendlich erzeugte Aussage zur Akzeptanz keinen Bezug zum Produkt selbst hat. Damit sind keine Rückschlüsse möglich, welche zusätzlichen Anforderungen zu berücksichtigen sind, bzw. worauf in der Entwicklung und Konkretisierung von Produkten zu achten ist, um die Akzeptanz zu verbessern [14]. Einfluss nehmende Bedingungen wie Bildung, Geschlecht, Einkommen etc. beeinflussen die Einstellung zum Produkt und werden auch erfasst. Es erfolgt aber keine systematische Einbeziehung in die Erklärungsmodelle. Vielmehr werden diese im Sinne von „background factors“ den Erklärungsmodellen voran gestellt [15].

3.3 Zusammenfassung

Mit den Methoden der Akzeptanzforschung und der Nutzerintegration steht der Produktentwicklung heute ein Instrumentarium zur Verfügung, mit dem der Nutzen des Produktes ermittelt werden kann. Rückschlüsse auf Wünsche und Bedürfnisse des Nutzers sind vor allem über die Nutzerintegration ebenfalls ableitbar. Die bekannten Ansätze berücksichtigen in der Produktvalidierung zwar auch „weiche“ Faktoren, die sich aus psychologischen und sozialen Aspekten ergeben, eine genauere Klassifizierung der einzelnen Einflussfaktoren und damit deren Berücksichtigung in der Beschreibung der Zielsysteme für die Produktentwicklung ist nicht möglich. Speziell bei den Methoden der Akzeptanzforschung bleibt offen, wie psychologische und soziale Einflussfaktoren in der Beschreibung der Zielsysteme und im Sinne einer Anforderungskonkretisierung in konkrete technische Funktionen überführt werden können. Im Allgemeinen wird mit den verfügbaren Methoden nicht der Mensch beschrieben, sondern nur das Produkt aus der Sichtweise des Menschen als Nutzer.

4 Menschbeschreibung unter Nutzung sozialwissenschaftlicher Ansätze

In der Vergangenheit hat sich immer mehr die Erkenntnis durchgesetzt, dass Faktoren, wie die biographische Erfahrung oder das soziale und kulturelle Umfeld der Nutzer für die Verwendung von Technik im alltäglichen Umfeld von großer Bedeutung sind. Kenntnisse über diese Aspekte helfen, das Nutzungsverhalten und die Akzeptanz von Produkten zu verstehen und diese damit gezielter auf spezifische Nutzerbedürfnisse anzupassen.

Im Folgenden soll ein Ansatz vorgestellt werden, bei dem das Lebenslagekonzept nach Clemens [16] genutzt wird, um auf Basis qualitativer Untersuchungen herauszuarbeiten, welche Faktoren bzw. deren Ausprägungen das Nutzungsverhalten in welcher Art und Weise beeinflussen. Das Lebenslagekonzept beschreibt das soziale Umfeld in den Dimensionen (1) Vermögen, (2) Einkommen, (3) materielle Versorgung, (4) Kontakte und Kooperationen, (5) Bildung und Erfahrung, (6) Partizipation und Gesundheit und (7) Unterstützung bei Hilfebedarf. Mithilfe qualitativer Methoden aus den Sozialwissenschaften lassen sich für definierte Nutzergruppen (z.B. ältere Menschen) Restriktionen und Ressourcen ermitteln, die ihre Handlungsweise und damit auch die Produktnutzung beeinflussen. Daraus ergibt sich ein Ansatz zur Klassifikation von Nutzern, der nicht die Leistungsfähigkeit zugrunde liegt, sondern sein soziales und kulturelles Umfeld sowie hieraus abgeleitet deren Verständnis von Technik bzw. ihre Technikdeutung. Hierzu wird ein Konzept der Technik-

deutung herangezogen, welches Motive für bzw. gegen den Technikeinsatz in vier Ebenen unterscheidet: der instrumentellen, der ästhetisch-expressiven, der kognitiven und der sozialen.

Parallel zur Lebenslagebeschreibung gilt es Handlungsfelder zu definieren, für die nach spezifischem Unterstützungspotential zu suchen ist. Dies könnte z.B. die Mobilität im häuslichen Umfeld, also die Bewältigung der Hausarbeit sein. Die Analyse der Lebenslage im Beispiel von älteren Menschen im Kontext der Handlungssituation, nämlich der Bewältigung von täglicher Hausarbeit, erlaubt die Identifikation von Problemlagen (Bild 4).

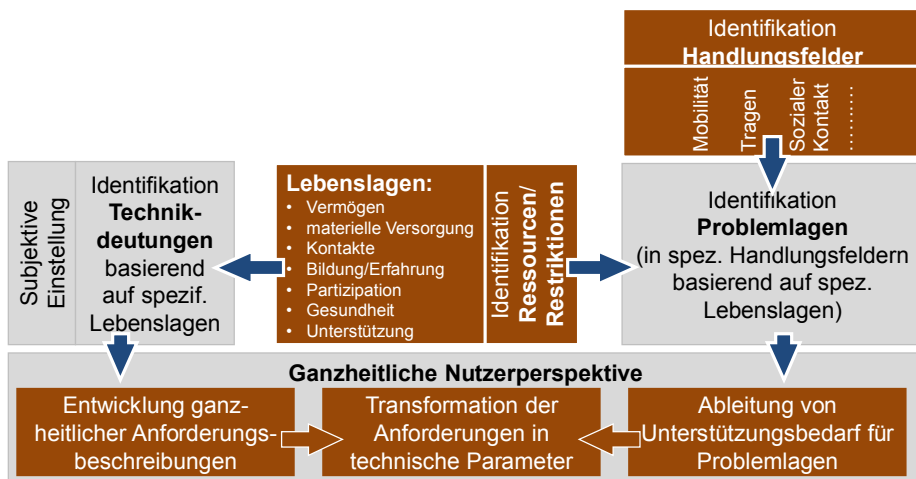


Bild 4: Konzept der Lebenslage zur Menschbeschreibung

Problemlagen beschreiben Handlungsfelder, die für das Wohlbefinden und die selbständige Lebensführung des Menschen von essentieller Bedeutung sind, aber wegen unterschiedlicher Restriktionen nicht angemessen bewältigt werden können. Im Ergebnis der Analyse erhält man eine strukturierte und differenzierte Betrachtung des Menschen in spezifischen Situationen und unter Berücksichtigung seiner Technikdeutung [17].

Die Herausforderung liegt jetzt darin, diese im Sinne einer erweiterten Nutzerbeschreibung der Produktentwicklung zugänglich zu machen. Basis für den Transformationsprozess bildet der Ansatz, dass sich Problemlagen prinzipiell als zu unterstützende Funktionen beschrieben und damit in technische Funktionen überführt werden können. Diese Funktionsbeschreibungen vervollständigen die Zielsystembeschreibungen. Restriktionen und Ressourcen

aus dem Lebenslagekonzept beinhalten über die Dimension „Gesundheit und Partizipation“ auch individuelle bzw. nutzergruppenspezifische Leistungseinschränkungen. Diese fließen jetzt aber nur als ein Teil einer Gesamtbetrachtung in die Zielsystembeschreibung ein und sind damit nicht mehr in zentraler Position. Als Beispiel: eine reduzierte Feinmotorik der Hände im Alter muss dann möglicherweise nicht mehr durch die Gestaltung des technischen Systems berücksichtigt werden, wenn der Mensch mit anderen Personen (z.B. Familienmitgliedern) lebt, die bestimmte Tätigkeiten übernehmen. Die ermittelten Funktionsbeschreibungen werden durch die Berücksichtigung der Restriktionen und Ressourcen der betrachteten Zielgruppe präzisiert. Sie erlauben Konkretisierungen der Funktionsbeschreibungen z.B. durch Wertebereiche oder definierte Zustände, begründen aber auch, welche Lösungsansätze für die Umsetzung geeignet oder auch nicht geeignet sind. Damit sind die Grundlagen geschaffen, eine um die Lebenssituation des Menschen ergänzte Zielsystembeschreibung in konkrete Anforderungen zu überführen.

Im Sinne einer nachhaltigen Unterstützung des Menschen gilt es weiterhin, eine Hierarchie in der Unterstützung zu berücksichtigen [18]. Um den Menschen seine Lebensqualität so lange wie möglich zu erhalten, gilt es in erster Linie ihn zu eigenem Handeln zu motivieren. In der nächsten Ebene steht das Training bzw. die Ausnutzung von Restleistungsfähigkeiten im Fokus. Auch hier kann das Lebenslagekonzept zu einer ganzheitlichen Betrachtung beitragen, weil die Leistungsfähigkeit nicht allein an der körperlichen Konstitution ansetzt, sondern auch das Umfeld des Menschen mit berücksichtigt. Nur wenn diese Kompensationen nicht mehr ausreichen, sollte die notwendigen Fähigkeiten durch technische Funktionen ersetzt werden. Setzt man nun die Schwere der Restriktionen in ein Verhältnis zu den durchschnittlichen Ressourcen und Fähigkeiten, können aus der Lebenslagebeschreibung auch Aussagen zum Unterstützungsgrad abgeleitet werden.

5 Resümee

Um den Menschen in seiner selbständigen und selbstbestimmten Lebensführung effektiver unterstützen zu können ist es erforderlich, Produkte besser an sowohl seine Wünsche und Bedürfnisse als auch seine Lebens- und Handlungssituation anzupassen. Eine solche Sichtweise auf das Produkt erfordert eine stärkere Berücksichtigung des Menschen in der Beschreibung von Zielsystemen für die Produktentwicklung. Heute verfügbare Methoden der Nutzerintegration bzw. der Akzeptanzforschung schließen zwar den Menschen explizit in die Betrachtungen ein, eine konkretere Menschbeschreibung liegt aber nicht zu Grunde.

Vorgestellt wird ein Ansatz, wie auf Basis sozialwissenschaftlicher Konzepte und Methoden eine systematische Erfassung und Interpretation von spezifischer Ressourcen und Restriktionen des Menschen und der daraus abgeleiteten Technikdeutungen, die Zielsystembeschreibung für die Produktentwicklung vervollständigt werden kann. Der Ansatz trägt dazu bei, die heute übliche soziologische Begleitforschung nicht erst in die späten Phasen der Entwicklung zu legen, sondern bereits in der Ideenentwicklung und Anforderungsbeschreibung zu berücksichtigen. Dies hilft, das Entwicklungsrisiko zu reduzieren und die spätere Akzeptanz des Produktes zu verbessern.

Literatur

- [1] Sarodnick, F. & Brau, H.: Methoden der Usability Evaluation – Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung, Bern: Huber 2006.
- [2] Steffen, Dagmar: Design als Produktsprache - Der „Offenbacher Ansatz“ in Theorie und Praxis. Frankfurt, Verlag Form GmbH 2000.
- [3] DIN 33402-2:2005-12 Ergonomie- Körpermaße des Menschen- Teil 2: Werte (Ergonomics- Human body dimensions- Part 2: Values). Berlin: Beuth Verlag.
- [4] Weißmantel, H.; Biermann, H.: Seniorengerechtes Konstruieren: SENSI – Das Design seniorengerechter Geräte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.
- [5] Reinicke, T.: Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung. Technische Universität Berlin, Dissertation Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, Berlin, 2004.
- [6] DIN EN ISO 9241-110:2008-09 Ergonomie der Mensch-System- Interaktion- Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006) (Ergonomics of human-system interaction - Part 110: Dialogue principles) Berlin: Beuth Verlag.
- [7] DIN EN ISO 9241-210:2011-01 Ergonomie der Mensch-System Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (Ergonomics of human-system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems). Berlin: Beuth Verlag.
- [8] Fishbein, M.;Ajzen, I.: Belief, Attitude, Intention and Behavior.: Addison-Wesley, London (1975).

-
- [9] Davis, F. D. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology, In: *MIS Quarterly* 13, S.319–340, 1989.
- [10] Venkatesh, V.: Determinants of Perceived Ease of Use: Integrating Control, Intrinsic Motivation, and Emotion into the Technology Acceptance Model. In: *Information Systems Research* 11, S.342–365, 2000.
- [11] Kornmeyer, K.: Determinanten der Endkundenakzeptanz mobilkommunikationsbasierter Zahlungssysteme - Eine theoretische und empirische Analyse. Dissertation, Universität Duisbur-Essen, 2009.
- [12] Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27 (3), 425-478.
- [13] Leonard-Barton, D.: Implementation as mutual adaptation of technology and organization. In: *Research Policy* 17, S.251–267, 1988.
- [14] Birken, T.: IT-basierte Innovation als Implementationsproblem. Evolution und Grenzen des Technikakzeptanzmodell-Paradigmas, alternative Forschungsansätze und Anknüpfungspunkte für eine praxistheoretische Perspektive auf Innovationsprozesse. ISF, München 2014.
- [15] Fishbein, M., Ajzen, I.: The Influence of Attitudes on Behavior, in: D. Albarracin, B.T. Johnson, & M. P. Zanna (Ed.), *The Handbook of Attitudes*, New Jersey: Erlbaum, 2005, 173-221
- [16] Clemens, W.: Lebenslage u. Lebensführung im Alter - zwei Seiten einer Medaille? In: G. Backes, W. Clemens, H. Künemund (Ed.), *Lebensformen u. Lebensführung im Alter*. Wiesbaden, VS Verlag, S. 3-58, 2004.
- [17] Pelizäus, H.; Paetzold, K.: Structuring of Application Fields for Technology for Elderly People from the User Perspective. International Conference on Human Behavior in Design, October 2014, zur Veröffentlichung angenommen.
- [18] Paetzold, K.; Wartzack, S.: Challenges in the Design of Products for Elderly People. 9th International Workshop on Integrated Product Development, IPD Workshop, Magdeburg, 2012.

Subjektive Adaptionsfähigkeit im Kontext der alternssensiblen Produktentwicklung

Stefan T. Kamin¹, Thomas Luft², Jörg Miebling²,
Bettina Williger¹, Frieder R. Lang¹, Sandro Wartzack²

¹*Institut für Psychogerontologie, FAU Erlangen-Nürnberg;*

²*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, FAU Erlangen-Nürnberg;*

Abstract

Successful user involvement in user-centered product development should consider the motivational differences of older adults. We explored the influence of motivation when evaluating new technological products. We report findings based on the Subjective Technology Adaptivity Inventory – a measure of inter-individual differences in the motivation to use technology. Older adults participated in focus groups over a period of one year. Sessions involved the subjective evaluation of different technological products. Findings suggest that subjective technology adaptivity was associated with higher perceived usefulness of products. This association was stronger with increasing age. We discuss the findings with regard to the development of technological products for older adults.

Keywords: User-centered product development, User involvement, Aging, Subjective Technology Adaptivity Inventory.

1 Einleitung und Motivation

Technische Entwicklungen werden von älteren Menschen dann genutzt, wenn diese die vielfältigen Kompetenzen und Möglichkeiten der Zielgruppe optimal ansprechen [1]. Daher ist es bei der Entwicklung innovativer Produkte

für ältere Menschen erforderlich die technischen, wirtschaftlichen sowie die nutzerspezifischen Anforderungen zu erheben und detailliert zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung von Nutzeranforderungen ist Gegenstand der nutzerzentrierten Produktentwicklung (user centered design) und in der Norm ISO 9241-210:2010 zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme verankert [2]. Diese fordert potentielle Nutzer in die Entstehung und Evaluation technischer Entwicklungen einzubeziehen. Die Ermittlung der Anforderungen älterer Nutzer orientiert sich bislang überwiegend an den angenommenen Defiziten der Zielgruppe. Der SENSI-Katalog [3] formuliert beispielsweise Handlungsempfehlungen für die Gestaltung alternsensibler Produkte auf Grundlage der Leistungs- und Funktionseinschränkungen älterer Nutzer. Das interdisziplinäre Forschungsfeld Human Factors betrachtet durchschnittliche Altersverläufe von körperlichen und kognitiven Fähigkeiten (z.B. Sehfähigkeit, Koordination, Aufmerksamkeit) und versucht diese in Richtlinien für die Entwicklung technischer Lösungen zu übersetzen [4]. Auch die Auswahl von Probanden für die Evaluation technischer Lösungen orientiert sich eher an diesen Merkmalen älterer Menschen. Eine zentrale Herausforderung bei der Einbindung älterer Erwachsener in die Produktentwicklung ist die adäquate Repräsentation der Heterogenität der Nutzergruppe [5]. Die Abbildung dieser Heterogenität erfordert nicht nur die Berücksichtigung kognitiver und körperlicher Veränderungen sondern auch ein Verständnis interindividueller Unterschiede in motivationalen Ressourcen. Ebenso sind die Implikationen motivationaler Bedingungen der Techniknutzung in der alternsensitiven Produktentwicklung nicht gut verstanden.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zu der Frage, ob die Berücksichtigung motivationaler Bedingungen der Techniknutzung im Alter zu einem besseren Verständnis der Nutzeranforderungen älterer Menschen führt. Hierzu stellt der Beitrag das Kurzinstrument „Subjektives-Technik-Adaptionsfähigkeits-Inventar“ (STAI) zur Erfassung motivationaler subjektiver Anpassungskompetenz an technische Produkte vor [6]. Wir untersuchen den Einfluss subjektiver Adaptionsfähigkeit auf die Evaluation technischer Innovationen im Rahmen der Nutzereinbindung mit älteren Menschen. Darüber hinaus wird gezeigt, wie interindividuelle Unterschiede in subjektiver motivationaler Adaptionsfähigkeit in der Produktentwicklung einbezogen und somit Erfolg und Akzeptanz neuer Produkte bei zukünftigen Nutzern frühzeitig abgeschätzt werden können.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

Nachfolgend werden grundlegende Probleme und Ansätze zur Nutzereinbindung und das Subjektive-Technik-Adaptionsfähigkeits-Inventar vorgestellt.

2.1 Einbindung von Nutzern in die Produktentwicklung

Durch die frühzeitige Einbindung älterer Nutzer lassen sich deren Anforderungen besser berücksichtigen, Produktinnovationen verbessern und somit die Wahrscheinlichkeit des Produkt- und Unternehmenserfolgs erhöhen. Jedoch wird die Einbindung des Nutzers in der Unternehmenspraxis wenig genutzt [7]. Eine ganzheitliche Nutzerzentrierung ist nur bei wenigen Unternehmen vorhanden. Zudem fokussieren entsprechende Abteilungen in der Regel lediglich auf die Überprüfung der Usability von Produkten und beeinflussen somit erst in späten Entwicklungsphasen die Produktgestaltung [8]. Darüber hinaus wird die Berücksichtigung der sich verändernden differenziellen Anforderungen und Potentiale älterer Menschen durch die zunehmende Heterogenität im Alter erschwert [9].

Die Literatur beschreibt eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze, Methoden und Werkzeuge zur nutzerzentrierten Produktentwicklung. Nach GLENDE [7] können Ansätze zur Nutzerzentrierung in die folgenden Teilbereiche gegliedert werden: Statische Standards und Checklisten (z.B. DIN 9241, IEC Draft-Guide 71), Prozedurale Standards und Methoden (z.B. Quality Function Deployment, DIN 62366), Menschmodelle und Simulationen (z.B. Anthropometrische bzw. biomechanische Körpermodelle, Age-Explorer-Anzug), Empathische Produktentwicklung und Nutzereinbindung (z.B. SENTHA-Methode, Konzeptbewertung). Hinsichtlich der Nutzereinbindung unterscheiden WILLIGER UND LANG [10] zwischen einstellungs- (z.B. Interviews, Fragebogen) und verhaltensbasierten (z.B. Beobachtung, Thinking-Aloud) Methoden. Die Einbindung von Endnutzern erfordert ein umfassendes Verständnis der Zielgruppe. Die Endnutzer, die in den Entwicklungsprozess eingebunden werden, sollten die zukünftige Nutzergruppe repräsentieren [2]. Gleichwohl zeigen Arbeiten aus dem Bereich Information Systems Research, dass auch bei festgelegten Nutzergruppen interindividuelle Unterschiede in der Bewertung von Produkten bestehen [11]. Die Berücksichtigung solcher Unterschiede erfordert ein Verständnis der Persönlichkeitsmerkmale die für konsistente Erlebens- und Verhaltensmuster über die Zeit verantwortlich sind.

2.2 Subjektives-Technik-Adaptionsfähigkeits-Inventar (STAI)

Die Nutzung technischer Produkte im Alter erfordert die Investition von Ressourcen. Zum Beispiel müssen ältere Nutzer in Abhängigkeit von der Komplexität eines Produktes dazu bereit sein kognitive und körperliche Fähigkeiten, aber auch Zeit und Mühe zu investieren um ein Produkt zu nutzen. Hierzu gehört sowohl die Auswahl technikbezogener Handlungsziele („ich möchte das Produkt nutzen“), als auch die Verfolgung von Handlungszielen („ich nutze

das Produkt“). In unserer Arbeit gehen wir davon aus, dass sich ältere Menschen in dieser technikbezogenen Handlungsregulation unterscheiden [6]. In diesem Zusammenhang werden interindividuelle Unterschiede der motivationalen Selbststeuerung über die subjektive Adaptionsfähigkeit beschrieben. Die subjektive Adaptionsfähigkeit stellt eine motivationale Ressource der Nutzerkompetenz in der Auseinandersetzung mit technischen Anforderungen dar. Das STAI wurde entwickelt um interindividuelle Unterschiede subjektiver Adaptionsfähigkeit im Alter zu erfassen [6]. Die subjektive Adaptionsfähigkeit wird hierbei durch das Zusammenspiel von drei distinkten motivationalen Faktoren bestimmt, die sich vor einem lebensspannentheoretischen Hintergrund auf Prozesse der Zielauswahl und Zielverfolgung beziehen lassen (siehe Bild 1).

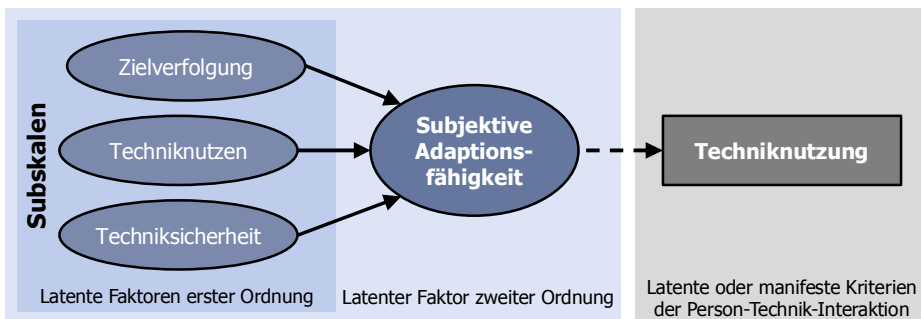


Bild 1: Komponenten des STAI

Der Faktor *technikbezogene Zielverfolgung* erfasst in Anlehnung an die Kontrolltheorie von HECKHAUSEN ET AL. [12] die motivationale Fähigkeit Handlungsmittel für die Umsetzung von Nutzungszielen einzusetzen. So müssen Personen den Umgang mit neuer Technik erlernen und bereit sein, die Investition von Ressourcen aufrechtzuerhalten, auch wenn die Anforderungen des technischen Systems hoch sind (z.B. „Ich strengte mich so lange an, bis ein Gerät funktioniert, wie ich es will“).

Der Faktor *Techniknutzen* erfasst generalisierte subjektive Nutzungsvorteile technischer Produkte (z.B. „Die Nutzung moderner Technik hilft mir bei der Bewältigung des Alltags“). Befunde zeigen, dass die Entscheidung Technik zu nutzen vor allem auf der Basis von Nutzungsvorteilen erfolgt, die mit der Nutzung oder Nichtnutzung verbunden werden [13]. Dieser Faktor lässt sich darauf zurückführen, dass es im Alter zunehmend bedeutsamer wird Handlungsoptionen einzugrenzen und vorhandene Ressourcen gewissenhaft einzusetzen. Entsprechend sollte die generelle Überzeugung, dass Technik zu einer

Aufrechterhaltung von Handlungsfähigkeit im täglichen Leben beiträgt, einen wichtigen motivationalen Faktor der Techniknutzung im Alter darzustellen.

Der Faktor *Techniksicherheit* beschreibt eine kompensatorische motivationale Ressource, die mit einem Gefühl der Sicherheit gegenüber technischen Produkten verbunden ist (z.B. „Moderne Technik gibt mir ein Gefühl der Sicherheit“). Befunde zeigen die Bedeutung von Angst und Unsicherheit gegenüber technischen Innovationen im Alter [14]. Wir argumentieren, dass Technik im Alter dann genutzt wird, wenn diese Sicherheit und Vertrautheit herstellt. Entsprechend stellt dieser Faktor eine kompensatorische Ressource gegenüber potentiellen Verlusten dar, die mit der Nutzung technischer Produkte im Alter einhergehen können.

Die faktorielle Validität dieser drei Faktoren ist empirisch bestätigt und in Bild 1 verdeutlicht. Die Kovariation der Faktoren erster Ordnung ist Ausdruck eines allgemeinen Faktors zweiter Ordnung. Interindividuelle Unterschiede der subjektiven Adaptionsfähigkeit gehen somit auf die Ausprägungen der Faktoren technikbezogene Zielverfolgung, Techniknutzen und Techniksicherheit zurück. Das Zusammenspiel dieser Faktoren bildet eine generelle motivationale Ressource der Nutzerkompetenz in der Auseinandersetzung mit technischen Anforderungen. Empirische Befunde bestätigen die psychometrische Qualität des STAI und zeigen, dass die subjektive Adaptionsfähigkeit die Techniknutzung im Alter (z.B. Anzahl genutzter Geräte) vorhersagt [6].

3 Ziele der Studie

Im empirischen Teil dieser Arbeit soll der Einfluss subjektiver Adaptionsfähigkeit auf die Bewertung neuer technischer Produkte durch ältere Menschen untersucht werden. Die Produktbewertung ist auf die spezifische Nützlichkeit der jeweiligen technischen Lösungen bezogen. Die Bewertung der Nützlichkeit von Produkten ist ein verbreiteter Ansatz um die Akzeptanz technischer Systeme bei Nutzern abzuschätzen [11]. Gleichwohl ist nicht gut verstanden, welche generellen motivationalen Faktoren die spezifische Bewertung von Produkten im Alter beeinflussen. Wir argumentieren, dass Personen mit einer höheren subjektiven Adaptionsfähigkeit offener gegenüber neuen technischen Entwicklungen sind und eher die Vorteile der Nutzung technischer Produkte fokussieren. Weiterhin gehen wir davon aus, dass ältere Menschen technische Produkte in Abhängigkeit altersbezogener Ressourcen selektiv bewerten [13]. Entsprechend sollte die subjektive Adaptionsfähigkeit eine motivationale Ressource in der Auseinandersetzung mit neuen technischen Produkten im Alter darstellen und die Vorteile technischer Innovationen im höheren Lebensalter besser erkennen lassen.

4 Methoden

4.1 Beschreibung der Stichprobe und des methodischen Vorgehens

Im Rahmen des Forschungsverbundes FitForAge wurden über einen Zeitraum von zwölf Monaten sieben thematisch unterschiedliche Sitzungsreihen durchgeführt, in deren Rahmen ältere Erwachsene in die Entwicklung technischer Produkte (siehe Tabelle 1) eingebunden wurden [15]. In jeder Sitzungsreihe wurden mehreren Sitzungen mit Kleingruppen mit maximal zehn Personen durchgeführt. Die Teilnehmer nahmen an durchschnittlich 4 ($SD=1.81$) Sitzungen teil. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Teilnehmer der Sitzungsreihen. Zum Ende jeder Sitzung wurden die Teilnehmer gebeten, die vorgestellten Produkte hinsichtlich der wahrgenommenen Nützlichkeit zu evaluieren. Zum Ende des gesamten Erhebungszeitraums bearbeiteten die Teilnehmer einen Fragebogen, in dem neben der subjektiven Adaptionsfähigkeit auch soziodemographische Informationen erhoben wurden.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Sitzungsreihen nach Alter, Geschlecht und hohem Bildungsniveau sowie Bewertung der Nützlichkeit der Produkte

Sitzungsreihe	<i>n</i>	Alter <i>M (SD)</i>	Männlich	Hohe Bildung	Nützlich- keit <i>M (SD)</i>
Fußgängernavigation	50	66.62 (4.56)	82%	57%	2.46 (.94)
Elektroscooter	41	67.46 (5.44)	69%	52%	3.20 (1.08)
Sprachsteuerung	43	67.81 (4.54)	65%	42%	3.29 (.88)
Telemedizin	93	67.53 (5.00)	71%	54%	2.73 (.91)
Haustechnik	42	66.29 (4.57)	76%	67%	2.90 (.76)
Fahrerassistenz	80	67.19 (5.24)	73%	57%	2.63 (.94)
Mobilität	44	68.32 (5.22)	68%	48%	1.96 (.82)

M = Mittelwert; *SD* = Standardabweichung

4.2 Erhebungsinstrumente

Die subjektive Adaptionsfähigkeit wurde über das STAI erhoben [6]. Das Instrument umfasst 12 Aussagen, die auf einer Skala von 1 (stimme nicht zu) bis 5 (stimme völlig zu) beurteilt werden. Jeweils vier Items dienen dabei der Erfassung der Subskalen technikbezogene Zielverfolgung, Techniknutzen und Techniksicherheit. Die subjektive Adaptionsfähigkeit wurde über den gemittelten Gesamtwert aller Items berechnet. Die Werte der Skala lagen zwischen 1.8 und 5 ($M=3.62$; $SD=.53$). Die Gesamtskala zeigte eine gute interne Konsistenz von .83.

Die wahrgenommene Nützlichkeit der spezifischen Produkte wurde in jeder Sitzung mit 10 Items auf einer Skala von 1 (trifft gar nicht zu) bis 5 (trifft voll und ganz zu) erfasst. Die Items wurden in Anlehnung an das Technikakzeptanzmodell [11] formuliert und auf den Kontext der erfolgreichen Lebensgestaltung im Alter adaptiert (z.B. Die Fußgängernavigation kann mir helfen am gesellschaftlichen Leben teilzunehmen). Tabelle 1 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Produkte. Für die Auswertung wurde ein durchschnittlicher Gesamtwert der Nützlichkeit über alle Produkte gebildet ($M=2.7$; $SD=.69$). Die Skala zeigte über alle Sitzungen eine interne Konsistenz zwischen .89 und .95. Soziodemographische Variablen umfassten das chronologische Alter sowie Dummykodierungen für Geschlecht (1=weiblich) und Bildung (1=Fachhochschul- oder Hochschulreife).

5 Ergebnisse

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse von zwei multiplen Regressionsmodellen dargestellt. Modell 1 untersucht die Frage, ob die durch das STAI erfasste subjektive Adaptionsfähigkeit ein Prädiktor der wahrgenommenen Nützlichkeit der in dem Projekt evaluierten technischen Produkte ist. Die Ergebnisse zeigen einen signifikant positiven Haupteffekt für das STAI. Dieser Effekt gibt die absolute Veränderung der wahrgenommenen Nützlichkeit über alle Produkte an, wenn die subjektive Adaptionsfähigkeit um eine Einheit zunimmt. Dies bedeutet, dass eine höhere subjektive Adaptionsfähigkeit mit einer positiveren Bewertung der technischen Lösungen verbunden war. Dieser Effekt ist stabil, auch unter Berücksichtigung soziodemographischer Faktoren.

Tabelle 2: Multiple Regressionen zur Vorhersage der wahrgenommenen Nützlichkeit über alle Produkte ($N = 103$)

Prädiktoren	Modell 1		Modell 2	
	<i>B</i>	<i>SE</i>	<i>B</i>	<i>SE</i>
Alter	-.01	.01	-.23*	.11
Geschlecht	.05	.16	.01	.16
Bildung	-.12	.14	-.10	.14
STAI	.38**	.13	-3.88*	1.96
Alter × STAI			.06*	.03

* $p < .05$. ** $p < .01$.

Modell 2 untersucht den altersabhängigen Einfluss der subjektiven Adaptionsfähigkeit auf die wahrgenommene Nützlichkeit der technischen Produkte. Hierzu wurde ein Interaktionseffekt aus Alter und subjektiver Adaptionsfähigkeit berechnet. Das Modell zeigt einen signifikanten Interaktionseffekt, der

dahingehend interpretiert werden kann, dass Personen mit einer geringen subjektiven Adaptionfähigkeit die im Projekt vorgestellten technischen Lösungen mit zunehmendem Alter eher negativ beurteilen. Eine hohe subjektive Adaptionfähigkeit führt dagegen mit zunehmendem Alter zu einer positiveren Bewertung der Produkte. Dieser Effekt ist in Bild 2 dargestellt. Das Bild zeigt die einfachen Regressionsgeraden für das Alter nach geringen, mittleren und hohen Ausprägungen der subjektiven Adaptionfähigkeit. Die Einteilung der Gruppen erfolgte anhand eines Terzilsplit.

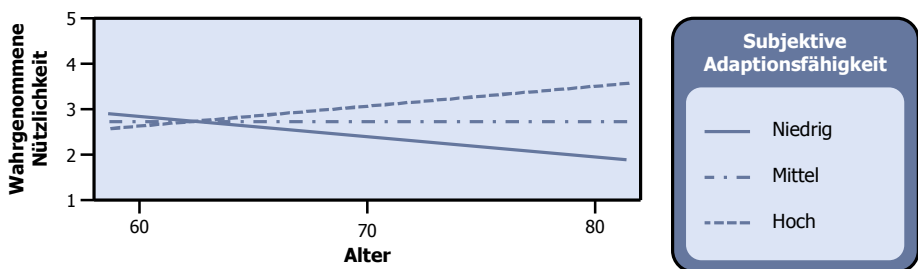


Bild 2: Vorhersage der wahrgenommenen Nützlichkeit durch das Alter bei unterschiedlichen Ausprägungen subjektiver Adaptionfähigkeit

6 Diskussion

Die Studie bestätigt, dass die subjektive Adaptionfähigkeit ein signifikanter Prädiktor der Bewertung der wahrgenommenen Nützlichkeit technischer Produkte im Alter ist. Zudem bewerteten Personen mit zunehmendem Alter technische Entwicklungen positiver, wenn Sie eine hohe subjektive Adaptionfähigkeit berichteten. Dagegen bewerteten Personen mit zunehmendem Alter und geringeren motivationalen Ressourcen die Nützlichkeit technische Innovationen eher negativ. Die Befunde unterstreichen die Bedeutung der subjektiven Adaptionfähigkeit im Rahmen der Nutzereinbindung in der alternerssensiblen Produktentwicklung.

Die Befunde unterstützen die Annahme, dass Menschen mit zunehmendem Alter die Nutzungsvorteile technischer Produkte in Abhängigkeit altersdifferenzieller Ressourcen bewerten [13]. Offenbar stellt die subjektive Adaptionfähigkeit eine motivationale Ressource der Nutzerkompetenz dar, die mit zunehmendem Alter die positive Selektion von Nutzungsvorteilen technischer Innovationen unterstützt. Die Anwendung und Interpretation von Methoden der Nutzereinbindung kann im Rahmen der alternerssensiblen Produktentwicklung von einem besseren Verständnis dieser motivationalen Prozesse profitie-

ren. So können ältere Nutzer in Abhängigkeit ihrer Nutzerkompetenz spezifisch für die Nutzereinbindung rekrutiert werden. Weiterhin erleichtert die Kenntnis der subjektiven Adaptionfähigkeit von Probanden die Bewertung von Rückmeldungen und Anforderungen im Rahmen der eingesetzten Methoden. Beispielsweise ist es möglich, dass sich die Rückmeldungen verschiedener Fokusgruppen in Abhängigkeit der Verteilung motivationaler Ressourcen der jeweiligen Teilnehmer unterscheiden.

Informationen über die potentiellen späteren Nutzer werden grundsätzlich in allen Phasen der Produktentwicklung benötigt. Die subjektive Adaptionfähigkeit sollte jedoch besonders in der strategischen Produktplanung [16], in der die Produkthanforderungen definiert werden sowie in der Planungs- und Konzeptphase aus dem Produktentwicklungsprozess nach PAHL/BEITZ [17] Beachtung finden. Zur Integration motivationaler Ressourcen kann ein um die strategische Produktplanung erweitertes V-Modell in Anlehnung an die VDI 2206 [18] herangezogen werden (Bild 3). Das Wissen über die subjektive Adaptionfähigkeit späterer Nutzer kann Entwicklungsmanagern in der strategischen Produktplanungsphase Nutzeranforderungen erkennen lassen und somit bei der Entscheidung über die Weiterverfolgung von Produktideen helfen [16].

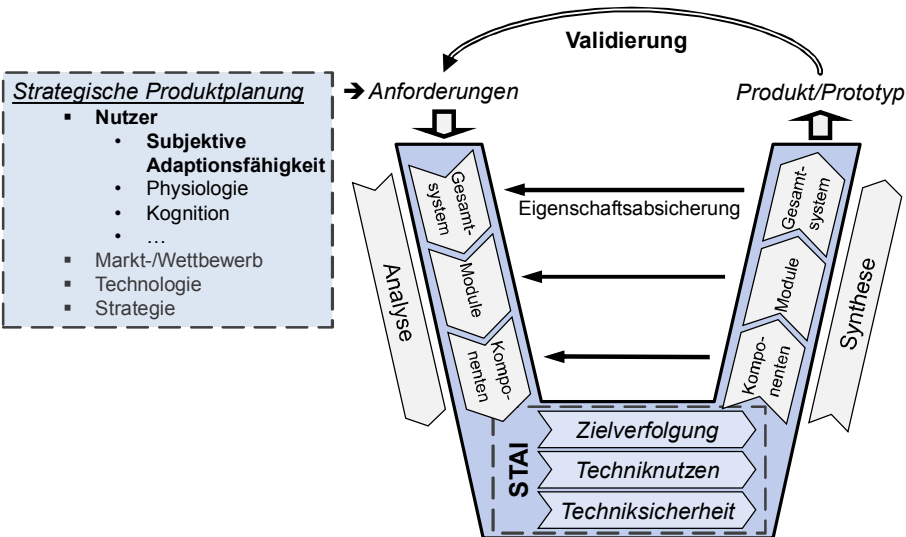


Bild 3: Vorgehensweise zur Berücksichtigung der subjektiven Adaptionfähigkeit anhand eines erweiterten V-Modells in Anlehnung an die VDI 2206 [18]

Die subjektive Adaptionsfähigkeit kann den geplanten Funktionsumfang zu entwickelnder Produkte beeinflussen. Beispielsweise könnten Nutzern mit einer geringen Adaptionsfähigkeit vor allem Basisfunktionalitäten bereitgestellt werden. Hier kann eine modulare Produktstruktur zur Zielerreichung beitragen. Auch die Informationen aus den einzelnen Subskalen des STAI sollten bei der Anforderungserhebung berücksichtigt werden. Beispielsweise werden Nutzer mit geringen Ausprägungen auf der Skala Techniksicherheit eher die Befürchtung haben, technischen Funktionalitäten ausgeliefert zu sein. Die eigenschaftsbasierten Produktentwicklung erlaubt es mittels einer matrixbasierten Produktbeschreibung entsprechende Anforderungen zu den zu realisierenden Produkteigenschaften in Beziehung setzen (vgl. [9]). Das in der Analyse entwickelte Produkt ist während der Synthese hinsichtlich der jeweils realisierten Eigenschaften im Sinne eines Soll-Ist-Vergleichs zu überprüfen und dadurch abzusichern. Das am Ende des V-Modells erstellte prototypische Produkt ist vor der Serienherstellung hinsichtlich der zuvor festgelegten Anforderungen durch die Einbindung von Endnutzern zu validieren (z.B. Nutzertests, Fokusgruppen).

Die Einordnung der Befunde erfordert die Beachtung methodischer Aspekte dieser Studie. Die Befunde basieren auf querschnittlichen Daten. Entsprechend können keine Aussagen über Veränderungsprozesse im Hinblick auf den Zusammenhang zwischen chronologischem Alter und subjektiver Adaptionsfähigkeit getroffen werden. Durch längsschnittliche Studien können Entwicklungsverläufe in subjektiver Adaptionsfähigkeit und deren altersdifferenzieller Einfluss im Rahmen der Nutzereinbindung besser betrachtet werden. Weiterhin handelt es sich bei den Daten um abhängige Beobachtungen. So ist es denkbar, dass Personen mit multipler Sitzungsteilnahme Antworttendenzen entwickeln, die zu einer Verzerrung von Effekten führen können. Zukünftige Arbeiten sollten die Abhängigkeit von Datenstrukturen besser beachten.

Zusammenfassend unterstreichen die Befunde die Bedeutung motivationaler Faktoren für die alternersensible Produktentwicklung. Das übergeordnete Ziel dieser interdisziplinären Kooperation ist die Entwicklung eines integrativen Vorgehensmodells für die nutzerzentrierte Produktentwicklung zur Berücksichtigung der vielfältigen Kompetenzen und Bedürfnisse älterer Nutzer. Die subjektive Adaptionsfähigkeit trägt hierbei zu einem besseren Verständnis der Nutzerkompetenz älterer Menschen bei.

Danksagung

Diese Arbeit ist Rahmen des Forschungsverbundes „FitForAge – Zukunftsorientierte Produkte und Dienstleistungen für die demographischen Herausforderungen-, Teilprojekt Fit4Use – Akzeptanz und Nutzung von Assistenzsystemen im Alter“ mit Förderung durch die Bayerische Forschungstiftung entstanden (Förderkennzeichen: 780-07).

Literatur

- [1] Williger, B.; Lang, F. R.: "Senioren als Zielgruppe der Produktentwicklung", Leitfaden für die altersgerechte Produktentwicklung, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012, 13–25.
- [2] Iivari, J.; Iivari, N.: Varieties of user-centredness: an analysis of four systems development methods. *Information Systems Journal*, Band 21, Nr. 2, 2011.
- [3] Biermann, H.; Weißmantel, H.: Regelkatalog SENSI-Geräte, Bedienungsfreundlich und barrierefrei durch das richtige Design. Darmstadt, 2003.
- [4] Fisk, A. D.; Rogers, W. A.; Charness, N.; Czaja, S. J.; Sharit, J.: Designing for older adults: Principles and creative human factors approaches. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [5] Iivari, J.; Isomäki, H.; Pekkola, S.: The user - the great unknown of systems development: reasons, forms, challenges, experiences and intellectual contributions of user involvement. *Information Systems Journal*, Band 20, Nr. 2, 2010.
- [6] Kamin, S. T.; Lang, F. R.: The Subjective Technology Adaptivity Inventory (STAI): A motivational measure of technology usage in old age. *Gerontechnology*, Band 12, Nr. 1, 2013.
- [7] Glende, S.: Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung – mit Fokus auf die „Generation Plus“. Berlin, Technische Universität, Dissertation 2010.
- [8] Marsh, M.; Suri, J.: Scenario building as an ergonomics method in consumer product design. *Applied Ergonomics*, Band 31, Nr. 2, 2000.

-
- [9] Luft, T.; Kamin, S. T.; Miebling, J.; Lang, F. R.; Wartzack, S.: Die eigenschaftsbasierte Produktentwicklung unter Berücksichtigung der differenziellen Anforderungen älterer Nutzer. Design for X, Beiträge zum 24. DfX Symposium 2013. Hamburg: TuTech-Verlag, 2013.
- [10] Williger, B.; Lang, F. R.: "Methoden der Nutzereinbindung", Leitfaden für die altersgerechte Produktentwicklung, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012, 132–161.
- [11] Davis, F. D.: Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of technology. *MIS Quarterly*, Band 13, Nr. 3, 1989.
- [12] Heckhausen, J.; Wrosch, C.; Schulz, R.: A motivational theory of life-span development. *Psychological Review*, Band 117, Nr. 1, 2010.
- [13] Melenhorst, A. S.; Rogers, W. A.; Bouwhuis, D. G.: Older adults' motivated choice for technological innovation: Evidence for benefit-driven selectivity. *Psychology and Aging*, Band 21, Nr. 1, 2006.
- [14] Czaja, S. J.; Charness, N.; Fisk, A. D.; Hertzog, C.; Nair, S. N.; Rogers, W. A.; Sharit, J.: Factors predicting the use of technology: Findings from the center for research and education on aging and technology enhancement (create). *Psychology and Aging*, Band 21, Nr. 2, 2006.
- [15] FitForAge – Zukunftsorientierte Produkte und Dienstleistungen für die demographischen Herausforderungen, München, Abschlussbericht, 2011
- [16] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München: Carl Hanser-Verlag, 2001.
- [17] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [18] VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004.

Biomechanische Betrachtungen der Berechnung von Kräften mit Menschmodellen

Rainer Göbbling, Henrik Eicker, Marcel Bartz, Beate Bender
*Lehrstuhl für Produktentwicklung;
Ruhr-Universität Bochum*

Abstract

Im vorliegenden Beitrag werden zwei Methoden für die Berechnung der im Muskel-Skelett-System wirkenden Kräfte vorgestellt. Am Beispiel der Abduktion des Oberarms werden die hierfür benötigten Muskelkräfte berechnet. Zum einen werden Berechnungen mithilfe von Ganzkörpermodellen auf der Grundlage der inversen Dynamik genutzt. Zum anderen werden FE-Analysen unter der Prämisse der Biegeminimierung für die Berechnung durchgeführt. Die verwendeten Ansätze unterscheiden sich damit sowohl in ihren Berechnungsgrundlagen als auch in der Annahme des zugrundeliegenden Optimierungskriteriums für die Aktivierung der Muskulatur. Es zeigt sich, dass beide Berechnungswege zu ähnlichen Muskelkräften führen.

There are several methods to calculate muscle forces acting in the skeletal muscle system. In this article, two different methods are shown, using the example of the abduction of the upper arm. On the one hand, a full body model is used to determine the muscle forces by the help of inverse dynamic calculations. On the other hand, finite element analyses, under the boundary condition to reduce the bending stress inside the bone, lead to a different method to calculate the muscle forces. Both methods differ in basic principles of calculations as well as in the underlying optimization criterion for the muscle activity. Both methods are compared, which leads to the result, that the forces are similar in both ways.

1 Einleitung

Die Bedeutung der virtuellen Simulation des Menschen und seiner Interaktion mit der Umwelt sind in vielen Forschungsbereichen von großem Interesse. Im Rahmen der Produktentwicklung gewinnen die hierfür eingesetzten Methoden immer größere Bedeutung. Durch Simulationen lassen sich ergonomische Studien durchführen, mit denen sich Entwicklungszeiten und Kosten reduzieren lassen. Ein weiteres Forschungsfeld der Simulationen mit Menschmodellen ist die Biomechanik. Bedarfe ergeben sich unter anderem durch den demografischen Wandel, da z.B. der Einsatz von Endoprothesen mit der steigenden Lebenserwartung zunimmt. Hierbei können Simulationen von Muskel-Skelett-Modellen zur Berechnung der im Skelett auftretenden Kräfte genutzt werden. Hintergrund sind mögliche präoperative Planungen, die unter anderem Aussagen über das Tragverhalten von Endoprothesen zulassen [1]. Um Kräfte und Beanspruchungen im Skelett zu untersuchen, lassen sich verschiedene Ansätze und Methoden einsetzen. Neben empirischen Untersuchungen, die z.B. mithilfe von instrumentierten Endoprothesen Gelenkkräfte im Körper der Patienten messen [5], finden sich deduktive Ansätze, die die Belastungen und Beanspruchungen im Skelett simulieren. Durch empirische Untersuchungen lassen sich nur die in den Gelenken wirkenden Kräfte ermitteln, darüber hinaus ist mit den Messungen immer ein Eingriff in das System verbunden. Die Schwierigkeit von Simulationen liegt in der Vielzahl von Muskeln mit denen eine bestimmte Bewegung ausgeführt werden kann. An jedem Gelenk sind mehr Muskeln als Freiheitsgrade vorhanden, wodurch sich unendlich viele Lösungen für die Gleichgewichtsbedingungen ergeben. Für die Berechnung der Muskelkräfte muss daher ein Optimierungskriterium angenommen werden. Eine weitere Unsicherheit der Simulation liegt in der Validierung ihrer Ergebnisse. Da die Aussagekraft empirischer und deduktiver Ansätze begrenzt ist, besteht keine Klarheit über die biomechanischen Grundlagen der im Skelett wirkenden Kräfte. Daher nimmt die Entwicklung neuer Simulationmethoden einen hohen Stellenwert ein. Im vorliegenden Beitrag werden zwei Methoden für die Berechnung der im Muskel-Skelett-System wirkenden Kräfte vorgestellt. Die Methoden unterscheiden sich sowohl in ihren Berechnungsgrundlagen als auch in der Annahme des Optimierungskriteriums für die Berechnung der Muskelkräfte.

2 Methoden

Die im Muskel-Skelett-System wirkenden Kräfte können durch invers-dynamische Berechnungen bestimmen werden. Eine für diesen Zweck eingesetzte Software ist AnyBody. Speziell für biomechanische und ergonomische Studien entwickelt, dient sie zur Berechnung von statischen und dynamischen

Problemen der Mechanik. Neben den vorhandenen Menschmodellen lassen sich durch die eigens entwickelte Programmiersprache Anyscript beliebige Muskel-Skelett-Strukturen erzeugen. Mithilfe dieser Modelle lassen sich unterschiedliche Einwirkungen auf das Muskel-Skelett-System untersuchen. Durch die Simulation von Bewegungen und den Berechnungen der auftretenden Interaktionskräfte des Modells mit seiner Umgebung lässt sich AnyBody nicht nur für biomechanische Fragestellungen, sondern auch Ergonomie-Studien einsetzen. Abbildung 1 verdeutlicht den Ablauf der Simulation mit AnyBody [10]. Ausgehend von einem biomechanischen Modell wird mithilfe von kinematischen Größen und externen Kräften eine kinematische Analyse durchgeführt. Aus den ermittelten Beschleunigungen werden unter Berücksichtigung der externen Lasten die Massenkräfte der einzelnen Körpersegmente errechnet. Hieraus lassen sich mithilfe eines Optimierungskriteriums Muskel- und Gelenkkräfte berechnen. Als Kriterium dient die minimal berechnete Ermüdung der Muskeln [6].



Abbildung 1: Ablauf Berechnung von Muskel- und Gelenkkräften mit Anybody

Eine Validierung der berechneten Gelenkkräfte kann durch den Vergleich mit Messwerten erfolgen. Ein Problem stellt jedoch die Überprüfung der Muskelkräfte dar. Mit elektromyographischen Messungen (EMG) lässt sich zwar die Aktivität der Muskulatur messen, die Beträge der Muskelkräfte sowie die genauen Richtungen können jedoch nicht ermittelt werden.

Ein weiterer Ansatz um Muskel- und Gelenkkräfte zu bestimmen, basiert auf der Korrelation zwischen den Beanspruchungen und der Morphologie eines Knochens [1]. Hierbei werden jedoch bislang nur die Belastungen einzelner Skelettelemente ermittelt. In einer FE-Simulation wird durch die Variation der Muskelkräfte eines anatomischen Modells die Biegebeanspruchung des Knochens minimiert. Diese Methode basiert auf den Adaptionsprozessen von Knochen. Knochen ist ein Gewebe das permanenten Umbauprozessen unterliegt. Diese Prozesse dienen nicht nur der Erneuerung der Zellen und dem Heilen von kleinen und größeren Schäden, sondern auch zu Vermehrung und Verringerung der Knochenmasse. Die hiermit verbundenen Auf- und Abbauprozesse sind an mechanische Reize gekoppelt, sodass eine erhöhte Aktivität und eine damit einhergehende Steigerung der Beanspruchung des Knochens einen Zuwachs der Knochenmasse zufolge hat. Der umgekehrte Fall, bei dem

es zu einer Reduktion der Knochenmasse kommt, ist mit einer Aktivitätsverminderung in Verbindung zu bringen, wie sie z.B. bei einem länger andauernden Zustand der Immobilisation vorkommt. Diese Prozesse können die Form eines Knochens ändern. Unter physiologischen Belastungen befinden sich Auf- und Abbauprozesse im Gleichgewicht, dieser Zustand wird als Homöostase bezeichnet. Das Modell des Mechanostat [2] bildet das Verhalten des Knochens ab und gibt Schwellwerte für die Beanspruchungen für die Auf- und Abbau an. Dieses Verhalten von Knochen führt zur Annahme, dass physiologische Belastungen, die durch die alltäglichen Bewegungen eines Menschen entstehen zur Beanspruchungen der Knochen führen, die innerhalb der Schwellwerte liegen. Diese Zusammenhänge zeigen die Verbindung zwischen einem Knochen und seinen Beanspruchungen. Um die Beanspruchungen möglichst gering zu halten, damit Masse und Ressourcen eingespart werden können, kommt es durch die Motorik und die Koaktivierung von Muskeln zu einer aktiven Minimierung der Biegemomente im Skelett [2]. Diese Minimierung wird in den Berechnungen als Optimierungskriterium verwendet [7]. Abbildung 2 zeigt den Ablauf dieses funktionellen Ansatzes. Eine Validierung der berechneten Kräfte kann auch hier nur über den Vergleich zu empirisch ermittelten Gelenkkräften erfolgen.



Abbildung 2: Berechnung der Muskel- und Gelenkkräfte mit Biegeminimierung

3 Fallbeispiel Oberarm

Im Folgenden werden die vorgestellten Methoden genutzt, um die Muskelkräfte des Oberarms bei einer Abduktion von 90° zu berechnen. Da die Beanspruchungen des Knochens ein Kriterium für die berechneten Muskelkräfte darstellen, werden diese für beide Methoden berechnet. Abbildung 3 stellt die Methoden gegenüber und verdeutlicht den Aufbau der Studie.

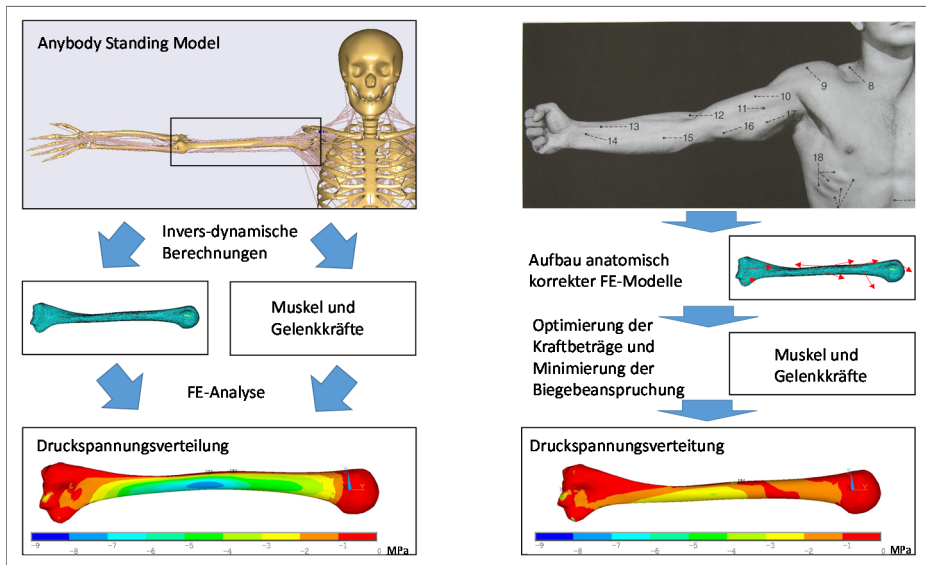


Abbildung 3: Gegenüberstellung der beiden Methoden

3.1 Invers-dynamische Berechnungen von Muskelkräften

Für die Berechnungen mit der Software AnyBody wurde das StandingModel verwendet, das Teil des AnyBody Managed Model Repository ist. Das 180cm große und 75kg schwere Menschmodell bildet mit Ausnahme des Kopfes, der Füße und der Hände alle Muskeln, Knochen und Gelenke realitätsnah ab. Die Partie der Schulter basiert auf den anatomischen Daten der Dutch-Shoulder-Group (vgl. [9]). Als Muskelmodell wird für die Berechnungen das Simplemuscle-Modell verwendet, das lediglich isometrische Muskelkrafteigenschaften abbildet. Da in dieser Studie die Berechnung eines statischen Falls durchgeführt wird, sind keine weiteren Muskeleigenschaften erforderlich. Die Schulterpartie des für die in der Berechnungen eingesetzten Modells ist in Abbildung 3 dargestellt. Nach den Berechnungen der Muskelkräfte wird das Modell mit den zugehörigen Randbedingungen in die FE-Software Ansys 14 überführt.

Als Elementtyp für die FE-Berechnungen werden zehnknotige tetraedische Elemente vom Typ Solid 187 verwendet. Das massive Modell besitzt isotrope Materialeigenschaften mit einem E-Modul von 10000 MPa und einer Querkontraktionszahl von 0.3. Insgesamt besitzt das Volumenmodell ca. 96.000 Ele-

mente und 140.000 Knoten. Die berechneten Spannungen sind in Abbildung 4 und Muskelkräfte in Tabelle 1 dargestellt

3.2 FE-Analysen zur Berechnung der Muskelkräfte

Zur Bestimmung der Muskelkräfte durch eine FE-Analyse wird ebenfalls die FE-Software Ansys verwendet. Um das Ergebnis mit denen der invers-dynamischen Berechnung vergleichbar zu machen, wird dasselbe Modell des Oberarms verwendet. Im Unterschied zur invers-dynamischen Berechnungen werden die Muskelkräfte als variabel angedenkt. Mithilfe des Ansys eigenen Optimierungstools werden die Muskelkräfte variiert um die Biegebeanspruchungen des Oberarmes zu minimieren. Da die Anzahl der Optimierungsvariablen durch das Programm begrenzt ist, werden die unterschiedlichen Muskelstränge eines Muskels in einer Variable zusammengefasst, sodass die Optimierung mit 33 Variablen durchgeführt wird. Die Kraftangriffspunkte im Modell bleiben die gleichen wie bei der invers-dynamischen Berechnung. Als Optimierungsverfahren kommt die Subproblem Approximation Method (SUBP) zum Einsatz. Dieses Verfahren ist eine Annäherungsmethode an beschränkte Zielfunktionen. Zur besseren Lösbarkeit wird hierbei für jede beschränkte Zielfunktion eine neue unbeschränkte Funktion erstellt. Bei dieser Methode gibt es eine zu optimierende Größe. In der durchgeführten Rechnung wird als Optimierungskriterium eine minimale Verschiebung der Mitte des Knochens angenommen. Durch die Vorgabe weitere Zwangsbedingungen wird sichergestellt, dass die für die Rechnung benötigten Lager keinen Einfluss auf die Spannungsverteilung haben. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 1 und Abbildung 4 dargestellt.

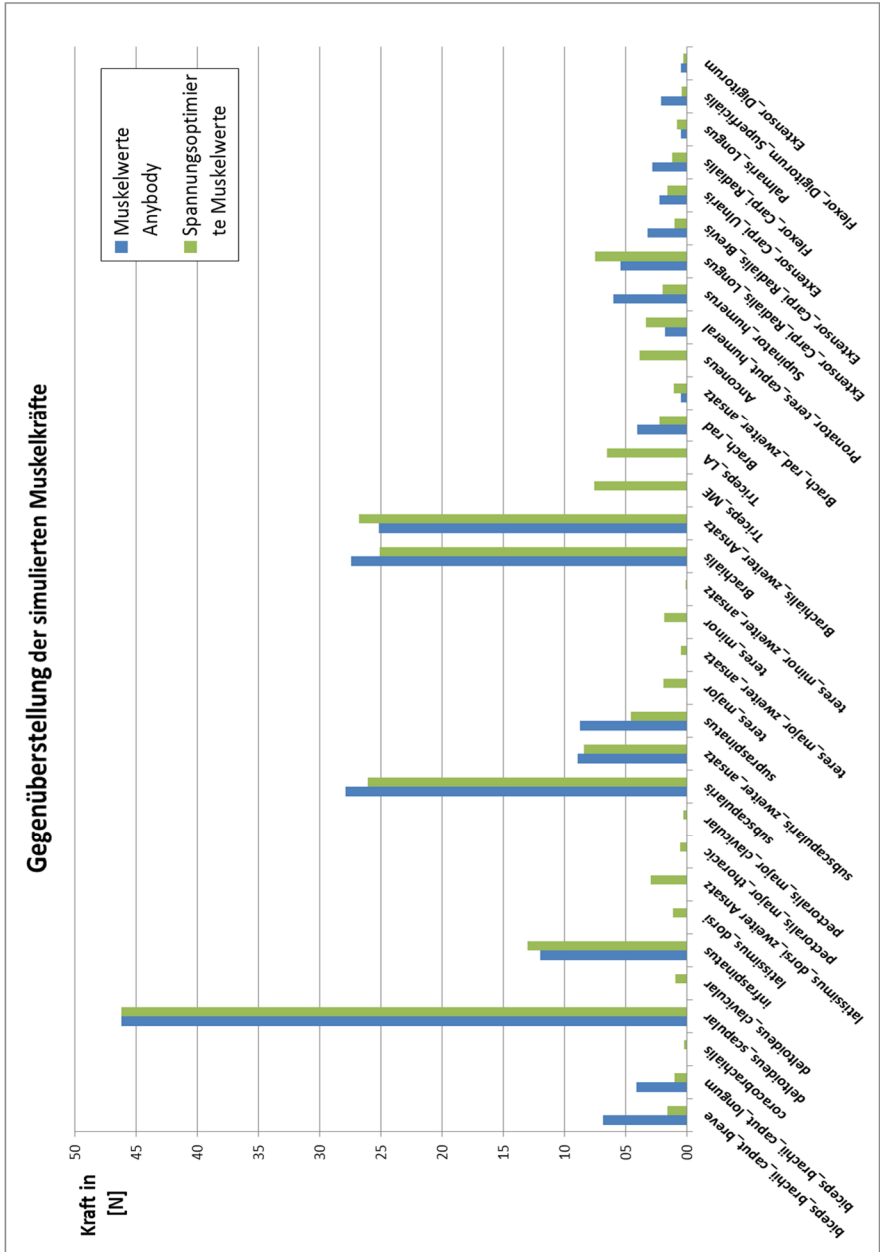
4 Ergebnisse und Diskussion

Durch die verwendeten Methoden wurden unterschiedliche Lastregime für eine Abduktion von 90° des Oberarms berechnet. Die Beträge der einzelnen Muskelkräfte sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Der Vergleich der einzelnen Muskelkräfte zeigt, dass die Beträge sich nur gering unterscheiden. An der Abduktion des Arm scheinen hauptsächlich der M. deltoideus scapularis, M. subscapularis, M. infraspinatus, M. brachialis, und der M. supraspinatus beteiligt zu sein. Abgesehen von M. supraspinatus, finden sich Unterschiede eher bei den Muskeln mit geringere Aktivität wie dem M. biceps brachii, dem M. latissimus dorsi und dem M. teres major. In der Literatur sind hauptsächlich die Muskeln M. deltoideus, M. supraspinatus, M. infraspinatus und M. subscapularis an der untersuchten Bewegung beteiligt [11]. Der Vergleich zu empirischen Untersuchungen ist jedoch nicht ganz einfach, da die Rotation des Arms um seine Längsachse einen Einfluss auf die Muskelaktivität hat.

Den durch Anybody berechneten Muskelkräften lag die Minimierung der Muskelermüdung zugrunde während bei den Berechnungen der Kräfte durch die FE-Analyse die Minimierung der Beanspruchung des Knochens im Vordergrund stand. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen wieder. Die Summe der aufaddierten Kraftvektoren ist im Vergleich bei den invers-dynamischen Berechnungen geringer als bei denen der FE-Analyse. Die Beanspruchungen des Oberarmknochens sind in Abbildung 4 dargestellt. Hier sind im linken Teil der Abbildung die Zug- (a) und Druckspannungen (b) die durch die invers dynamisch ermittelten Muskelkräfte im Oberarm verursacht werden in MPa dargestellt. Dem gegenüber stehen im rechten Teil der Abbildung die Zug- (c) und Druckspannungen (d) die durch die Methode der Biegeminimierung berechnet wurden. Es wird deutlich, dass die Minimierung der Biegebelastung zu einer Verringerung der Beanspruchungen um 10 – 15% führt. Dies gilt sowohl für die Zug- als auch die Druckspannungen.



Tabelle 1: Darstellung der Muskelkräfte



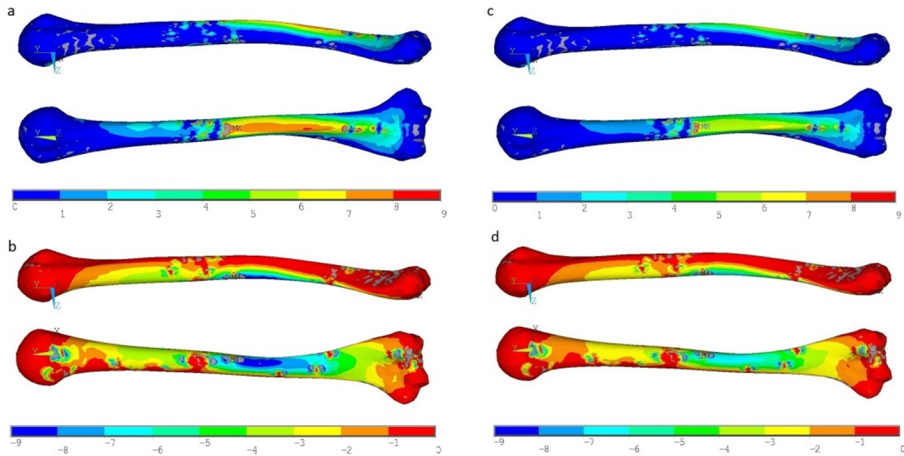


Abbildung 4: Spannungverteilung

5 Fazit

Das Ergebnis der vorliegenden Studie zeigt, dass Simulationen geeignete Werkzeuge für die Berechnung der Kräfte im Muskel-Skelett-System zu sein scheinen. Durch die eingesetzten Methoden sind leicht unterschiedliche Lastregime für die benötigten Muskelkräfte zum Halten des Arms bei einer Abduktion von 90° berechnet worden. Trotz der unterschiedlichen Kriterien, die den Berechnungen für die Aktivierung der Muskulatur zugrunde liegen, wurden durch beide Methoden die gleichen Muskelgruppen aktiviert, sodass sich die Ergebnisse nur geringfügig unterscheiden. Da jedoch lediglich ein statischer Lastfall berechnet wurde, müssen weitere Berechnungen durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu stärken und dynamische Aspekte hinzuzufügen. Hierbei sollte auch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zu empirischen Studien erfolgen.

Literatur

- [1] Sverdlova, N. (2010): Preoperative Simulation of the Hip-Stem Osseointegration based on the Physiological Loading Conditions. In: *Proceedings of World Congress on Biomechanics*.
- [2] Frost, H. M. (2003): Bone's mechanostat: A 2003 update. In: *Anatomical Record*.

-
- [3] Sverdlova, N.; Witzel, U. (2010): Principles of determination and verification of muscle forces in the human musculoskeletal system. muscle forces to minimise bending stress. In: *Journal of Biomechanics*.
- [4] Frost, H. M. (1990): Skeletal structural adaptations to mechanical usage (SATMU): 2. Redefining Wolff's Law: The remodeling problem. In: *The Anatomical Record* (226), S. 414–422.
- [5] Bergmann, G.; Graichen, F.; Bender, A.; Kaab, M.; Rohlmann, A.; Westerhoff, P. (2007): In vivo glenohumeral contact forces-measurements in the first patient 7 months postoperatively. In: *Journal of Biomechanics*.
- [6] Damsgaard, Michael; Rasmussen, John; Christensen, Søren Tørholm; Surma, Egidijus; Zee, Mark de (2006): Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* 14 (8), S. 1100–1111. DOI: 10.1016/j.simpat.2006.09.001.
- [7] Gößling, R.; Herzog, M.; Witzel, U.; Bender, B. (2014): Compensation of bending moments as anature-inspired design principle, zuletzt geprüft am 15.08.2014.
- [8] Munih, M.; Kralj, A.; Bajd, T. (1992): Bending moments in lower extremity bones for two standing postures. In: *Journal of biomedical engineering* (14(4)), S. 293–302.
- [9] Nikooyan, A. A.; Veeger, H.E.J.; Westerhoff, P.; Graichen, F.; Bergmann, G.; van der Helm, F.C.T. (2010): Validation of the Delft Shoulder and Elbow Model using in-vivo glenohumeral joint contact forces. In: *Journal of Biomechanics* 43 (15), S. 3007–3014. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2010.06.015.
- [10] Rasmussen, J.; Damsgaard, M.; Christensen, S.T. (2001): Optimization of Human Motion: To Invert Inverse Dynamics.
- [11] Tillmann, Bernhard N. (2005): Atlas der Anatomie des Menschen. [mit Muskeltrainer ; neue Approbationsordnung]. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).

Funktionsorientiertes Interaktionsmodell zur Simulation menschlicher Bewegungen während der Nutzer-Produkt Interaktion

Daniel Krüger; Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

The perceived value of many products is determined essentially by how well their properties harmonize with the individual abilities and needs of the people who use them. Digital human models offer the possibility to analyze human-product interactions on the basis of virtual prototypes which facilitates ergonomic testing already in early stages of the design process. This however requires an algorithmic prediction of human behavior which is still an open issue in the field of digital human modelling. In this contribution a functional interaction model is proposed that describes user product-interactions on the basis of required manipulations of the products physical state. On this basis optimal control procedures can be employed to predict human motion and posture.

Keywords: digital human models, ergonomics, optimal control, CAD

1 Motivation

Der amerikanische Industriedesigner Henry Dreyfuss [1] erkannte schon in den 1940er Jahren, dass der vom Nutzer wahrgenommene Wert von Konsumprodukten oft stärker durch ergonomische als durch funktionelle oder

wirtschaftliche Faktoren bestimmt wird. Vor dem Hintergrund einer alternden Gesellschaft gewinnt das Thema Ergonomie aber auch im Bereich der Arbeitsplatz- und Arbeitsmittelgestaltung an Bedeutung. Als wissenschaftliche Disziplin beschäftigt sich die Ergonomie mit dem Verständnis der Interaktionen zwischen Menschen und technischen Systemen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Form von Gestaltungsrichtlinien, Daten und Methoden in die Produktentwicklung ein, wobei stets die Zielsetzung besteht, das menschliche Wohlbefinden zu verbessern und die Leistungsfähigkeit des Mensch-Technik-Systems zu optimieren. [2] Aus dieser Motivation heraus können übergeordnete ergonomische Anforderungen wie Sicherheit, Schädigungslosigkeit, Komfort, Effizienz oder Gebrauchstauglichkeit formuliert werden. Im Gegensatz zu rein technischen Anforderungen weist die Produktergonomie einen starken Bezug zum Menschen und seiner Umwelt auf. Die Frage nach der Erfüllung von ergonomischen Anforderungen kann daher nicht allein anhand des Produktverhaltens beantwortet werden. Nach Seeger [3] bestehen bei Nutzer-Produkt-Interaktionen Rückkopplungen zwischen dem Verhalten des Nutzers und dem Produktverhalten. Die ergonomische Validierung von Produkten muss daher den Nutzer mit seinen spezifischen Eigenschaften sowie den Nutzungskontext zwingend berücksichtigen. Mit Methoden der Nutzerintegration [4] wie z.B. Usability Tests kann dies prinzipiell erreicht werden. Allerdings ist der zeitliche und monetäre Aufwand mitunter sehr groß, müssen doch bedienbare Prototypen des Produktes hergestellt werden. Es ist daher das Ziel, ergonomische Fragestellungen mittels prädiktiver, rechnerunterstützter Simulationsverfahren zu behandeln. Ein Ansatz hierzu sind Simulationen mit digitalen Menschmodellen. Ziel ist es, ein Abbild des menschlichen Körpers mit einem virtuellen Produktmodell, meist innerhalb einer CAD oder VR-Umgebung interagieren zu lassen. Die Bewertung der Interaktionsvorgänge hinsichtlich der ergonomischen Anforderungen erfolgt durch anwendungsspezifische Analysefunktionen wobei das Spektrum von der Untersuchung einfacher geometrischer Zusammenhänge, wie der Erreichbarkeit von Objekten, bis hin zur Bestimmung komplexer biomechanischer Beanspruchungszustände reicht. Eine zentrale Forschungsfrage hierbei ist, wie das für die Interaktion mit Produkten relevante menschliche Verhalten beschrieben und die daraus resultierenden Bewegungen und Körperhaltungen mit Hilfe von Computersimulationen vorhergesagt werden können. [5] Ausgehend von einem grundlegenden Modell menschlicher Informationsverarbeitung, wird in diesem Beitrag ein funktionsorientierter Ansatz zur Beschreibung von Nutzer-Produkt-Interaktionen vorgeschlagen, der sich gut in CAD-Arbeitsumgebungen integrieren lässt. Das Interaktionsmodell liefert die nötigen Voraussetzungen, um die Vorhersage menschlicher Bewegungen als Optimierungsproblem zu verstehen. Daher wird anschließend das Verfahren der Optimalsteuerung biomechanischer Systeme beschrieben. Eine mögliche Anwendung ist die Ermittlung biomechanischer

scher Beanspruchungen des Muskelskelettsystems, die Rückschlüsse auf die ergonomischen Anforderungen Komfort, Effizienz und Schädigungslosigkeit ermöglichen.

2 Simulation menschlicher Informationsverarbeitung

In Bild 1 ist ein Schema der menschlichen Informationsverarbeitung bei der Ausführung von Bewegungen nach [6] abgebildet, das um den zusätzlichen Aspekt des Produktverhaltens erweitert wurde. Zielgerichtete Bewegungen werden durch externe Reize initiiert und geleitet, die der Mensch mit seinen Sinnen erfasst. Die Sinneseindrücke werden anschließend mit bereits bekannten, im Gedächtnis abgelegten Mustern abgeglichen so dass ein Modell der Situation entsteht welches als Grundlage der Entscheidung über ein Antwortverhalten dient. Für den Fall, dass dieses Antwortverhalten auf eine physische Manipulation der Umgebung gerichtet ist, ergeben sich geometrisch interpretierbare **Bewegungsziele**. Ein Beispiel wäre die Vorstellung einer Sollposition für die Hand, damit ein zuvor wahrgenommenes Bedienelement am Produkt betätigt werden kann. Es folgt die Ausführung der Bewegung durch die koordinierte Aktivierung der Muskulatur. Zu beachten ist, dass der Mensch hierdurch den Zustand des Gesamtsystems verändert und dies auch sofort wieder erfassen kann. Es entsteht eine Rückkopplung.

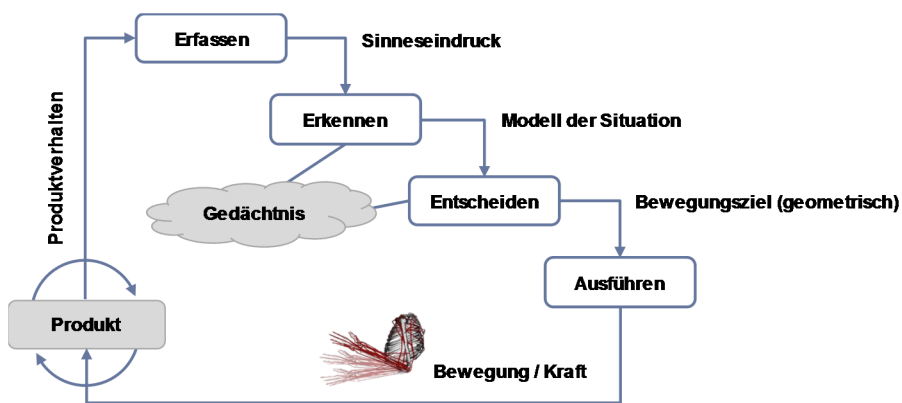


Bild 1: Schema menschlicher Informationsverarbeitung nach [6]

Obwohl diese Modellvorstellung sehr einfach ist, lassen sich hieran die Herausforderungen bei der Simulation von Nutzer-Produkt Interaktionen erkennen. Die Simulation des Produktverhaltens stellt im Allgemeinen keine besondere Herausforderung dar, da technische Systeme nach den Stand der Technik im Vergleich zu biologischen Systemen relativ gut verstanden sind.

Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung ist es aber grundsätzlich nötig, Produktverhalten und menschliches Verhalten gekoppelt zu simulieren. Die erste Phase der menschlichen Informationsverarbeitung, das Erfassen des Zustandes von Körper und Umgebung spielt ebenfalls eine untergeordnete Rolle, da die Zustandsvariablen einer vollständig virtuell simulierten Welt per se bekannt und damit einer algorithmischen Weiterverarbeitung zugänglich sind. Die Phasen Erkennen und Entscheiden sind durch diskrete Prozesse geprägt, deren Erforschung Gegenstand der Kognitionspsychologie ist. Mit kognitiven Architekturen wie ACT-R [7] existieren Versuche, Erkenntnisse der Kognitionspsychologie soweit zu formalisieren, dass eine Verarbeitung durch Computerprogramme möglich wird. So wurde von Carruth et al. [8] eine ACT-R Architektur zur Steuerung eines digitalen Menschmodells entwickelt, wobei einfache geometrische Objekte in einer virtuellen Szene durch maschinelles Sehen erkannt und darauf basierend Objektmanipulation (z.B. Drehen eines Blocks) angestoßen wurden. Die letzte Phase, nämlich die Ausführung der Bewegung ist ein zeitkontinuierlicher Prozess, dessen Simulation ein biomechanisches Modell des Bewegungsapparates bestehend aus Knochen, Gelenken und der Muskulatur erfordert. Die Herausforderung besteht hier in der Simulation der koordinierten Aktivierung von Muskeln, so dass die in den vorherigen Phasen der Informationsverarbeitung generierten Bewegungsziele erreicht werden.

3 Ein funktionsorientiertes Interaktionsmodell

Grundlage für die Anwendung digitaler Menschmodelle in der Produktentwicklung ist eine Beschreibung der Nutzer-Produkt Interaktion. Im Fall von kommerziell verfügbaren, in CAD Systeme integrierten Menschmodellen erfolgt dies fast ausschließlich über die direkte Manipulation der Körperhaltung durch den Anwender. Die für die ergonomische Bewertung entscheidenden Einflüsse Körperhaltung und Bewegung werden demzufolge nicht durch die Simulation vorhergesagt sondern als bekannt vorausgesetzt. Die Information, wie sich ein bestimmter Nutzer bei der Interaktion mit dem Produkt bewegt, dürfte dem Produktentwickler in den seltensten Fällen zur Verfügung stehen. Indes kann als bekannt angenommen werden, welche Funktionen eines Produktes ausgelöst werden müssen, um dessen Bestimmung zu erfüllen. Die Beschreibung von Nutzer-Produkt Interaktionen sollte daher **funktionsorientiert** erfolgen. Idealerweise sind dem Produktmodell bereits während der Modellierung in CAD Informationen über die Produktnutzung hinzuzufügen. Ein solches funktionsorientiertes Interaktionsmodell soll im Folgenden zur Diskussion gestellt werden. Der Illustration (vgl. Bild 2) dient die Bedienung eines mechanischen PKW Schaltgetriebes. Die vom Nutzer auszulösende Funktion ist das Schalten vom Leerlauf in den ersten Gang durch Betätigung

des Schalthebels. Damit dies überhaupt möglich ist, müssen einige **Interaktionsbedingungen** erfüllt sein. Der Nutzer muss sich auf dem Fahrersitz befinden, der linke Fuß muss mit dem Kupplungspedal in Kontakt stehen und die rechte Hand muss den Schalthebel berühren.

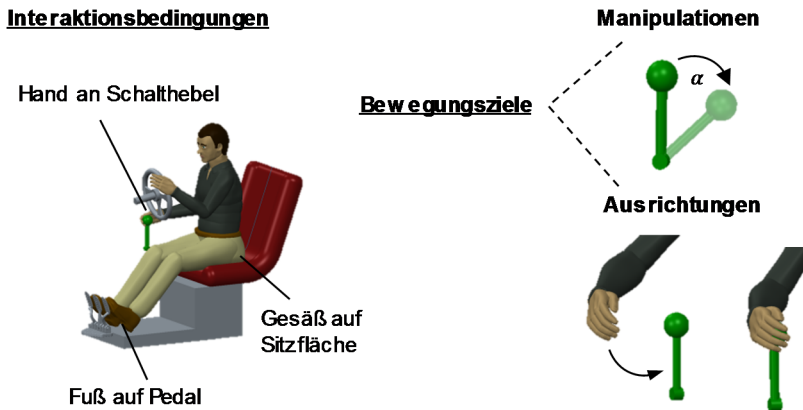


Bild 2: Funktionsorientiertes Interaktionsmodell

Sind die Interaktionsbedingungen nicht erfüllt, wird der Nutzer eine Bewegung ausführen, um seine Körperhaltung entsprechend zu korrigieren. Die Ziele dieser Bewegung werden als **Ausrichtungen** bezeichnet. Sind alle Interaktionsbedingungen erfüllt, beginnt der Nutzer, den Zustand des Produktes zu manipulieren. Das Kupplungspedal wird bis zum Anschlag gedrückt und gehalten, der Schalthebel nach vorne bewegt. Schließlich wird das Pedal wieder zurückgenommen. Die Ziele dieser Bewegungen werden als **Manipulationen** bezeichnet. Ausrichtungen und Manipulationen sind **Bewegungsziele**, also geometrische Vorgaben wie sie in Folge kognitiver Prozesse (vgl. Bild 1) entstehen. Zur CAD basierten Beschreibung der Nutzer-Produkt Interaktion könnten die Bedienelemente des Produktes durch entsprechende **Interaktionsfeatures** gekennzeichnet werden. Dabei handelt es sich um eine Semantik, die Geometrielemente aus dem CAD-Datensatz mit menschlichen Manipulatoren (Hände, Füße etc.) in Verbindung setzt. Die Auslösung einer bestimmten Produktfunktion wird dann durch einen Satz an Interaktionsbedingungen, die auf Grundlage der Interaktionsfeatures formuliert werden sowie durch die Vorgabe erforderlicher Manipulationen (z.B. Verdrehwinkel des Schalthebels) beschrieben. Ausrichtungen müssen im CAD Datensatz nicht explizit vorgegeben werden, da sich diese aus der aktuellen Körperhaltung des Menschmodells und den Interaktionsbedingungen ergeben. Das beschrie-

bene funktionsorientierte Interaktionsmodell lässt sich gut in die von [9] vorgeschlagene Szenariotechnik einbetten. Die Motivation zur Nutzung eines Produktes wird hierbei mit der Lösung eines Problems gleichgesetzt. Die Nutzer-Produkt Interaktion kann dann, wie in Bild 3 dargestellt, als eine Reihe von Zustandsübergängen modelliert werden.

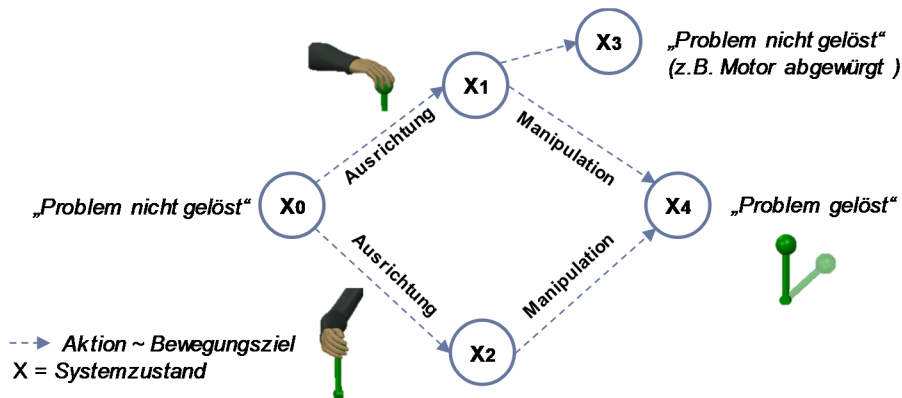


Bild 3: Szenarien der Produktnutzung

Ausgehend von einem Zustand „*Problem nicht gelöst*“ (das Getriebe befindet sich im Leerlauf, die Hände sind noch am Lenker) durchläuft der Nutzer ein Entscheidungsnetzwerk. An jedem Knotenpunkt kann zwischen alternativen Aktionen gewählt werden, um das System Mensch-Maschine in einen neuen physikalischen Zustand zu überführen. Die Zustandsübergänge entsprechen Ausrichtungen und Manipulationen. Alle Pfade durch das Netzwerk, die in einem Zustand „*Problem gelöst*“ (Gang eingelegt) münden, werden als positive Szenarien bezeichnet. Werden auch Pfade, die nicht zum Erfolg führen (negative Szenarien) zugelassen, können Fälle menschlichen Fehlverhaltens bzw. technischen Versagens berücksichtigt werden. Die kognitiven Prozesse auf der Nutzerseite, die zu einem bestimmten Szenario geführt haben, werden hierbei bewusst ausgeklammert, da sie simulationstechnisch bislang kaum abzubilden sind. Es können mit diesem Ansatz daher nur Szenarien der Produktnutzung analysiert werden, die beim Aufstellen des Netzwerkes berücksichtigt wurden. Die Szenariotechnik ist insofern eine wichtige Ergänzung zum funktionsorientierten Interaktionsmodell als dass vor allem die Interaktionsbedingungen nicht in jedem Fall eindeutig sind. Dies wird klar wenn man bedenkt, dass es beispielsweise verschiedene Möglichkeiten gibt, die Hand gegenüber dem Schalthebel zu positionieren. Infolgedessen ergeben sich auch verschiedenartige Ausrichtungs- und Manipulationsbewegungen, die jeweils in alternativen Szenarien analysiert werden müssen.

Ein einzelnes Szenario entspricht einer Folge von Nutzeraktionen, die sich letztendlich aus mit der Produktfunktion verbundenen Interaktionsbedingungen und Manipulationen ergeben. Diese Informationen dienen als Grundlage zur Vorhersage menschlicher Bewegungen durch Optimalsteuerung biomechanischer Systeme.

4 Optimalsteuerung biomechanischer Systeme

Der menschliche Bewegungsapparat ist ein hochredundantes mechanisches System. Die kinematischen Ketten des Skeletts haben für gewöhnlich mehr Freiheitsgrade als für das Erreichen eines bestimmten Bewegungsziels nötig wären. Selbst einfachste Aufgaben wie das Greifen nach einem Gegenstand können mit einer großen Anzahl an möglichen Gelenkwinkelkonstellationen erledigt werden. Die gleiche Redundanz findet sich auch auf der Ebene der Dynamik. Da Muskeln nur Zugkräfte erzeugen können, wird ein einzelnes Gelenk stets von mindestens zwei Muskeln (Agonist und Antagonist) aktuiert. Ferner überspannen manche Muskelstränge mehrere Gelenke. Dennoch sind Menschen in der Lage, sehr akkurate und in ihrem Verlauf sanfte Bewegungen auszuführen, den Einfluss externer Störungen zu kompensieren und ihr Bewegungsverhalten innerhalb kurzer Zeit an geänderte Umgebungsbedingungen wie z.B. den Aufenthalt in Schwerelosigkeit anzupassen. Zudem sind biologische Bewegungssysteme äußerst energieeffizient. Diese Eigenschaften der menschlichen Bewegungskontrolle werden nach dem Stand der Wissenschaft (z.B. [10]) häufig unter Bezugnahme auf das natürliche Optimalitätsprinzip erklärt. Optimalität ist die Eigenschaft eines Systems eine bestimmte Größe unter gegebenen Randbedingungen zu maximieren oder zu minimieren. Es scheint natürlich, dass Menschen sich so bewegen, dass sie dabei nicht unnötig viel Energie oder aber Zeit verbrauchen. Aber auch die Elimination der oben erwähnten kinematischen und dynamischen Redundanz kann erreicht werden wenn diejenigen Gelenkwinkelkonstellationen bzw. muskulären Aktivierungsmuster bevorzugt werden, die verglichen mit alternativen Lösungen, einen geringeren energetischen Aufwand zur Folge haben. Vielversprechende Ansätze zur Vorhersage menschlicher Bewegungen und Körperhaltungen sind daher Computersimulationen die auf der Optimierung mathematischer Funktionen basieren.

Digitale biomechanische Menschmodelle wie *OpenSim* [11] bilden den menschlichen Bewegungsapparat als Mehrkörpersystem ab. Das Skelett ist aus gelenkig miteinander verbundenen Starrkörpern aufgebaut während die Muskulatur durch spezielle Pfadaktuatoren simuliert wird. Das dynamische Verhalten eines biomechanischen Mehrkörpersystems wird durch die Differentialgleichung (1) wiedergegeben.

$$\dot{\vec{x}}(t) = f(\vec{x}(t), \vec{u}(t)) \quad (1)$$

Hierin ist $\vec{x}(t)$ der physikalische Zustandsvektor des Systems, der als Zustandsvariablen die Winkel der einzelnen Körpergelenke sowie deren Winkelgeschwindigkeiten enthält. Je nach Typ des eingesetzten Muskelmodells können noch weitere Variablen wie das Aktivierungsniveau jedes Muskels sowie dessen aktuelle Faserlänge hinzukommen. (vgl. Bild 4)

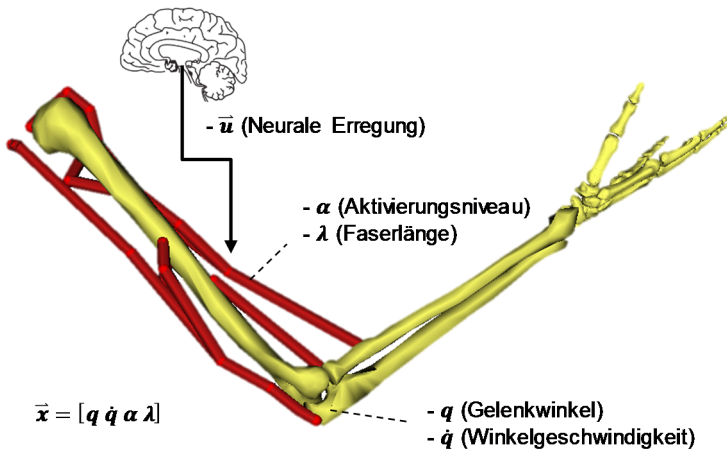


Bild 4: Biomechanische Zustandsvariablen und Steuerungen

Der Vektor $\vec{u}(t)$ wird als Steuerung bezeichnet. In der biomechanischen Modellbildung entspricht dies den vom zentralen Nervensystem ausgehenden neuronalen Erregungssignalen die das Aktivierungsniveau der Muskeln und damit deren Kraftentfaltung beeinflussen. Die Bewegung des Systems (Zustandstrajektorie) wird durch Zeitintegration von (1) berechnet. Die im vorherigen Abschnitt erarbeitete Zielsetzung, den Bewegungsapparat von einem definierten Ausgangszustand in einen von Bewegungszielen (Ausrichtungen und Manipulationen) abhängigen Endzustand zu bringen bedeutet also, einen passenden Satz von Steuerungen \vec{u} zu bestimmen. Aufgrund der kinematischen und dynamischen Redundanz des Bewegungsapparates existiert hierzu im Allgemeinen keine eindeutige Lösung, so dass im Sinne des Optimalitätsprinzips nach einer möglichst guten Lösung \vec{u}_{opt} gesucht wird, welche Gleichung (2) minimiert.

$$J(\vec{u}(t), \vec{x}(t)) = \int_0^T l(\vec{u}(t), \vec{x}(t)) dt \text{ mit } \dot{\vec{x}}(t) = f(\vec{u}(t), \vec{x}(t)) \quad (2)$$

Die Zielfunktion J bewertet die Bewegung anhand von Kriterien, die durch den zeitschrittbezogenen Kostenwert $l(\vec{u}(t), \vec{x}(t))$ beschrieben werden. Die im Bezug hierauf optimale Steuerung erhält man durch Lösen des dynamischen Optimierungsproblems (3).

$$\vec{u}_{opt}(t) = \operatorname{argmin} J(\vec{u}(t), \vec{x}(t)) \quad (3)$$

Es existieren verschiedene numerische Lösungsverfahren für derartige Optimalsteuerungsprobleme. Im Rahmen ihrer Forschungsarbeit haben die Autoren das biomechanische Simulationssystem *OpenSim* um ein iteratives Lösungsverfahren [12] erweitert, das auf einer linearen Approximation der Systemdynamik (1) basiert.

Um die Bewegungsziele des produktorientierten Interaktionsmodells in das Konzept der Optimalsteuerung integrieren zu können, ist es sinnvoll, die Zielfunktion J , wie in Gleichung (4) dargestellt in zwei Terme aufzuspalten.

$$J(\vec{u}(t), \vec{y}(t), t) = \int_0^T w(\vec{u}(t), \vec{x}(t)) dt + z(\vec{x}(T)) \quad (4)$$

Der Term $z(\vec{x}(T))$ hängt nur vom Systemzustand am Ende der Bewegung ab und wird als Zielkostenfunktion bezeichnet. Er dient der Beschreibung von geometrischen Bewegungszielen. Der Term $w(\vec{u}(t), \vec{x}(t))$ heißt Wegkostenfunktion und bewertet die Art und Weise wie der endgültige Systemzustand erreicht wurde. Beide Terme können als gewichtete Summen von elementaren Kostenfunktionen aufgefasst werden. Eine Auswahl ist in Tabelle 1 aufgeführt. Die Minimierung von Weg, Erregung und Ruck sind typische Wegkostenfunktionen. Sie sollen allgemeingültige in empirischen Studien [13] gefundene Charakteristika menschlicher Bewegungsausführung berücksichtigen und dürften wenig mit dem Anwendungsfall variieren. In der untenstehenden Auflistung fehlen allerdings noch Funktionen zur Kontrolle der aufrechten Körperhaltung und der Umgehung von Hindernissen.

Tabelle 1: Elementare Kostenfunktionen

Bezeichnung	Effekt
Orientierungsziel	Eine bestimmte Orientierung eines Körperteils gegenüber einem anderen Objekt wird angestrebt.
Positionsziel	Eine bestimmte Position eines Körperteils gegenüber einem anderen Objekt wird angestrebt.
Koordinatenziel	Ein Freiheitsgrad des Mehrkörpersystems wird auf einen bestimmten Koordinatenwert gebracht.
Minimale Erregung	Die Bewegung wird mit möglichst wenig Muskeleinsatz ausgeführt.
Minimaler Ruck	Die Bewegung wird möglichst sanft ausgeführt.
Kürzester Weg	Das Bewegungsziel wird auf kürzestem Weg erreicht.

Die Zielkostenfunktionen für Orientierung, Position und Koordinatenwerte bilden hingegen die Grundlage zur Beschreibung von geometrischen Bewegungszielen im Zusammenhang mit Nutzer-Produkt Interaktionen. Bereits mit diesen wenigen elementaren Funktionen lassen sich viele einfache menschliche Aktionen beschreiben. Die Manipulation von Kupplungspedal und Schalthebel aus dem weiter oben verwendeten Beispiel kann durch Angabe von jeweils einem Koordinatenziel beschrieben werden, das den erforderlichen Drehwinkel der Lager von Pedal und Schalthebel vorgibt. Zusätzlich ist es erforderlich, dass diese Koordinatenziele auf kürzestem Weg angefahren werden. Die zugehörigen Ausrichtungsziele geben die Orientierung und Position der rechten Hand gegenüber dem Schalthebel sowie des linken Fußes gegenüber dem Kupplungspedal vor.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bewertung der Produktergonomie anhand von Simulationen mit digitalen Menschmodellen erfordert die Vorhersage menschlicher Bewegungen und Körperhaltungen in Abhängigkeit des Produktverhaltens. In diesem Beitrag wurde als Grundlage hierzu ein funktionsorientiertes Interaktionsmodell vorgestellt, das es ermöglicht, die zielgerichteten Interaktionen zwischen Nutzern und Produkten lösungsneutral anhand von Interaktionsbedingungen und Bewegungszielen zu beschreiben. Zur Überführung der Bewegungsziele in konkrete menschliche Bewegungen wurde das Verfahren der Optimalsteuer-

rung biomechanischer Systeme vorgeschlagen. Zukünftige Forschungsaktivitäten werden sich vor allem mit der Formulierung von Interaktionsbedingungen für gebräuchliche Bedienelemente und der Implementierung von entsprechenden CAD-Interaktionsfeatures beschäftigen. Ein bisher ungelöstes Problem besteht darin, dass viele technische Bedienelemente auf unterschiedliche Arten durch den Menschen kontaktiert werden können. Ein Lenkrad kann beispielsweise am gesamten Umfang gehalten werden. Das Konzept der Interaktionsbedingungen muss daher um solche unscharfen geometrischen Beziehungen zwischen Mensch und Maschine erweitert werden. Ferner steht die Validierung der durch Optimalsteuerung vorhergesagten menschlichen Bewegungen aus. Da der Stil der errechneten Bewegungen stark von den zu Grunde gelegten Wegkostenfunktionen abhängt, ist ein Vergleich mit experimentell im Bewegungsanalyselabor aufgezeichneten Bewegungen anzustreben.

Literatur

- [1] Dreyfuss H.: Designing for people: [the classic of industrial design], Allworth, New York, 2003.
- [2] Bullinger, H.; Ilg, R.: Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung, Teubner, 1994.
- [3] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme: Industrial Design Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [4] Reinicke, T.: Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung: eine Systematik zur Anpassung von Methoden zur Nutzerintegration, Verl. Dr. Hut, München, 2004.
- [5] Badler, N.: Simulating humans: computer graphics animation and control, Oxford University Press, New York, 1993.
- [6] Stelmach, G.: Information-Processing Framework for Understanding Human Motor Control. In: Kelso J.: Human motor behavior: an introduction, L. Erlbaum, Hillsdale, 1982.
- [7] <http://act-r.psy.cmu.edu/>

-
- [8] Carruth, D.; Thomas, M.; Robbins, B.; Morais, A.: Integrating Perception, Cognition and Action for Digital Human Modeling. In: Duffy, V.: Digital Human Modeling, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [9] Van der Vegte, W.: Testing virtual use with scenarios, Delft University of Technology, 2009.
- [10] Scott, S.: Optimal feedback control and the neural basis of volitional motor control. *Nature Reviews Neuroscience* 5 (2004), Nr. 7, S. 532–46.
- [11] Delp, S.; Anderson, F.; Arnold, A.; Loan, P.; Habib, A.; John, C. et al.: OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEE Transactions on Biomedical Engineering* 54 (2007), Nr. 11, S. 1940-1950.
- [12] Todorov, E.; Weiwei, L.: A generalized iterative LQG method for locally-optimal feedback control of constrained nonlinear systems, *Proceedings of the American Control Conference*, 2005.
- [13] Hogan, N.: An organizing principle for a class of voluntary movements, *Journal of Neuroscience* 4 (1984), Nr. 11, S. 2745–54.

Integration von Menschen in Smart Factories: Ein individualisierbares Profildatenmodell für Industrie 4.0

Nadia Galaske, Alexander Christ, Reiner Anderl
*Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion;
Technische Universität Darmstadt*

Abstract

The technology progress in the context of Industrie 4.0 enables the integration of product information along the entire product life cycle using individual objects as information carrier. In this paper, a concept for the integration of employee profiles and digital factory data in the context of cyber-physical production systems is presented and validated by two use cases. Methods and tools of the digital factory are addressed, expanded in the context of the Industrie 4.0, and enhanced into a customizable profile data model. In the first use case information of the profile data model is used for an efficient personnel planning in an assembly process. The second use case describes the application of individualized profile models for the development of an adaptive assembly workstation.

Keywords: Industrie 4.0, Smart Factories, Profile Data Model, Integration

1 Einleitung

Die vierte industrielle Revolution, die durch das zunehmende Ausmaß an modernen Informations- und Kommunikationstechnologien geprägt ist, führt zu grundlegenden Änderungen in der Entwicklung und Produktion. Im Rah-

men der Industrie 4.0 wird der Weg hin zu einer hoch flexiblen und adaptiven Produktion beschrieben, die es ermöglicht kundenindividuelle Produkte in kleinen Losgrößen zu Kosten einer Massenproduktion herzustellen.

Durch den Technologiefortschritt im Kontext von Industrie 4.0 ist es zukünftig möglich, jedes einzelne Objekt in der Produktion individuell zu adressieren und in der digitalen Fabrik abzubilden. Durch neue Architekturen und die Kombination von cyber-physischen Systemen mit Internettechnologien entstehen im Anwendungsfeld Produktion so vernetzte cyber-physische Produktionssysteme und letztendlich Smart Factories. Die Verschmelzung von realer und digitaler Welt setzt Synergieeffekte frei und bietet ein enormes Innovationspotenzial. Vor allem die Integration von individualisierbaren Datenmodellen für die rechnergestützte Repräsentation von Mitarbeiterprofilen ist vielversprechend.

2 Einfluss von Industrie 4.0 auf die menschliche Produktionsarbeit

Der Ansatz von Industrie 4.0 basiert auf drei Schwerpunkten: der Einsatz von cyber-physischen Systemen, die Anwendung von modernen Internettechnologien zur einheitlichen Identifikation und Adressierung von Produkten, Betriebsmitteln, Maschinen und Anlagen, sowie die Nutzung von Bauteilen als Informationsträger [1]. Hierdurch können Produkte und Produktionseinrichtungen kommunikationsfähig miteinander vernetzt werden, was eine dezentrale und selbstständige Steuerung der Fertigungs- und Montageprozesse ermöglicht.

Cyber-physische Systeme als Rückgrat für Smart Factories in Industrie 4.0 sind die nächste Generation multidisziplinärer mechatronischer Systeme und bilden die Basis für Smart Products. Der Grundgedanke „cyberizing the physical“ und „physicalizing the cyber“ nach Lee [5] bedeutet hierbei einerseits physische Komponenten realitätsgetreu in digitale Modelle abzubilden und andererseits die Potenziale der digitalen Welt auf physische Komponenten zu übertragen. In einer Smart Factory verfügen moderne Produkte und Ressourcen über cyber-physischen Systemen mit integrierten Kommunikationsschnittstellen sowie entsprechenden Sensoren und Aktoren. Sie können dadurch autark in die Produktionssteuerung eingreifen, um somit Entscheidungen auf Basis der sich verändernden Marktgegebenheiten zu treffen.

Zur Repräsentation von cyber-physischen Produktionssystemen wurde bereits AssemblyML [9] als Beschreibungsmethodik entwickelt. Diese ermöglicht die Abbildung aller Prozessteilnehmer, die Modellierung der Informations- und Kommunikationsflüsse sowie die Einbindung des Bauteildatenmodells. Wäh-

rend bisher Informationen primär von der Entwicklung in die Produktion fließen, ermöglicht das integrierte Bauteildatenmodell auch den Rückfluss von Informationen in die frühen Phasen des Produktlebenszyklus [1]. Die Repräsentation von Informationen an der Bauteil- bzw. Produktgeometrie in 3D-CAD-Modellen und die Ergänzung um Product Manufacturing Information (PMI) ermöglicht die angestrebte Rückkopplung von Informationen.

Da eine vollständige Automatisierung der Produktionsprozesse im Kontext von Industrie 4.0 eine kostenintensive und unflexible Auswirkung herbeiführt, werden zukünftige Fabriken immer mehr auf flexible bzw. hybride Produktionssysteme [6] basieren. Im Umfeld der Smart Factories wird deshalb der Faktor Mensch mit der damit verbundenen Flexibilität nach wie vor eine wichtige Rolle spielen.

Aufgrund der Adaptivität von cyber-physischen Produktionssystemen werden Mitarbeitern in Smart Factories zunehmend mit kurzfristigen und sich wechselnden Tätigkeiten konfrontiert [8]. Zur Unterstützung werden Assistenzsysteme entwickelt, die basierend auf eingebetteten cyber-physischen Systemen mit Kommunikationsschnittstellen eine Integration von Echtzeitdaten ermöglichen. Hierzu bedarf es einer Integration der Mitarbeiterprofile als Bestandteil der Planung und Steuerung eines ganzheitlichen, vernetzten und multiadaptiven cyber-physischen Produktionssystems.

3 Digitale Fabrik als Basis für die Entwicklung von Smart Factories

Unterstützung im Bereich der Produktion bietet hierbei die digitale Fabrik durch die Bereitstellung von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, sowie ein durchgängiges Datenmanagement [10]. Die digitale Fabrik dient zur frühzeitigen Planung von Produktionsprozessen und -systemen und ermöglicht somit eine durchgängige Unterstützung entlang der Lebenszyklusphasen.

Die digitale Fabrik verfügt über Technologien um Produkte, Prozesse und Ressourcen in digitale Modelle abzubilden, mithilfe derer Produktionsprozesse virtuell simuliert und optimiert werden können [4]. Dies führt zu einer verstärkten Vernetzung von Entwicklung und Produktion durch frühzeitige Machbarkeitssimulationen und erlaubt somit eine fertigungs- und montagegerechte Entwicklung von Produkten und Produktionseinrichtungen [2].

Das Konzept der digitalen Fabrik verlangt eine Integration von Methoden und Werkzeugen entlang der Lebenszyklusphasen. Das Datenmodell einer digitalen Fabrik basiert hierbei auf dezentrale Anwendungen zur Planung und Steuerung von Produktionsprozesse, die auf eine zentrale, gemeinsame Da-

tenbasis für Produkte, Prozesse und Ressourcen zugreifen können, siehe Bild 1.

Als Werkzeug der digitalen Fabrik bieten digitale Menschmodelle eine Möglichkeit zur Einbindung des menschlichen Faktors bei der virtuellen Planung von Produktionsabläufen. Digitale Menschmodelle stellen eine rechnergestützte Repräsentation von Menschen dar, die mit variierbaren anthropometrischen Merkmalen, wie Geschlecht, Population oder Perzentilgrößen, in virtuelle Simulationen eingesetzt werden kann [7]. Mithilfe von digitalen Menschmodellen können Ergonomieanalysen der Arbeitsplätze und -abläufe durchgeführt und insbesondere die Belastungen der Menschen und die damit verbundenen Risiken frühzeitig eingeschätzt werden [3].

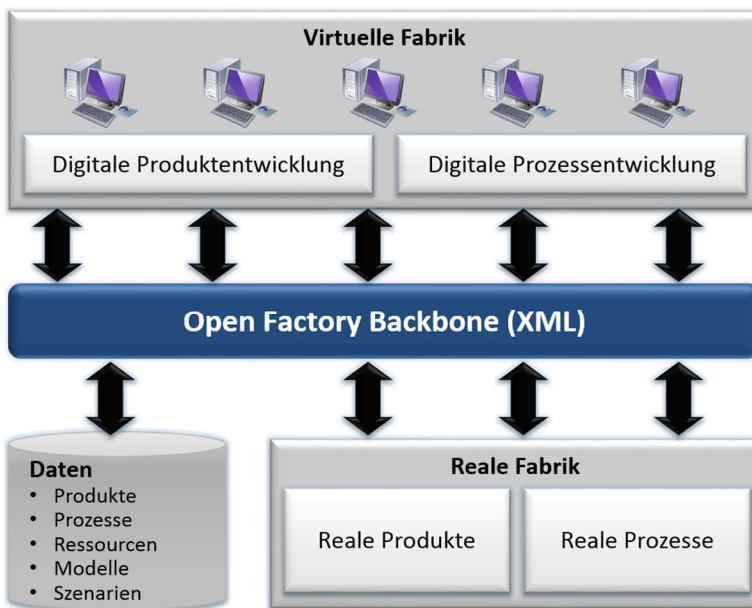


Bild 1: Datenmodell der digitalen Fabrik [4]

4 Ein individualisierbares Profildatenmodell für Smart Factories

Im Zuge einer effizienten Produktion ist die Kopplung von physischer und virtueller Welt erforderlich sowie eine möglichst hohe IT-Durchdringung anzustreben, siehe Bild 2. Dazu müssen reale Produkte, Maschinen und Betriebsmittel digital repräsentiert und Daten zwischen Mitarbeitern, Bauteilen und

Maschinen medienbruchfrei ausgetauscht werden. Die Kopplung ermöglicht eine frühzeitige, virtuelle Absicherung von Produkten und Prozessen, was zu einer Verbesserung der Interoperabilität und einer gesteigerten Wertschöpfung für produzierende Unternehmen führt.

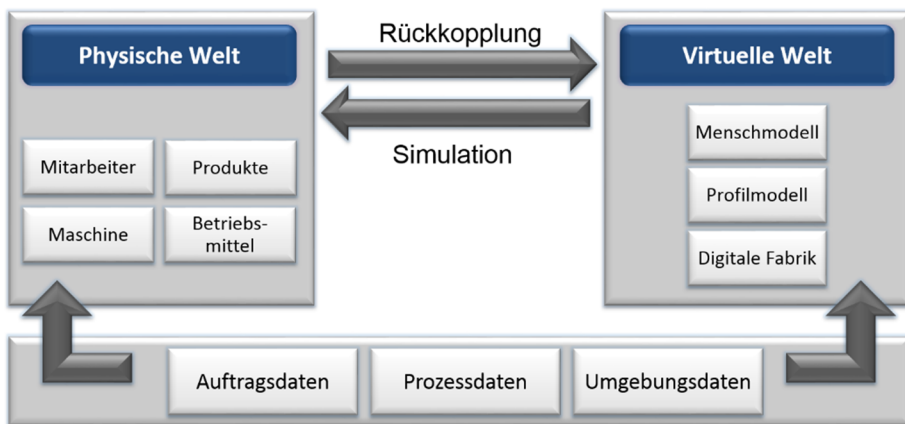


Bild 2: Erforderliche Kopplung zwischen physischer und virtueller Welt

Die digitale Fabrik fördert die Integration von Daten zu Produkten, Prozessen und Ressourcen aus der physischen und der virtuellen Welt. Bestehende Menschmodelle und Profildaten, wie Mitarbeiterqualifikationen, Kompetenzen und ergonomische Daten, finden heutzutage jedoch zu wenig Eingang in die Methoden der digitalen Fabrik. Im Zuge einer steigenden Vernetzung von und des Informationsaustauschs zwischen Objekten innerhalb der Produktion, ist dies jedoch dringend erforderlich.

Auf der anderen Seite führt eine zunehmende Flexibilisierung der Produktionsprozesse dazu, dass Produktionsmitarbeiter dynamisch neue Aufgaben zugeteilt bekommen können und kurzfristig auf Abweichungen im Produktionsablauf reagieren müssen [3]. Für eine adaptive Produktionsplanung und -steuerung bedarf es der Integration von Mitarbeiterprofildaten und der Vernetzung dieser mit den Daten der Objekte der digitalen Fabrik. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag der erste Ansatz für ein Profildatenmodell für die Integration von Mitarbeiterprofilen in Smart Factories im Kontext der Industrie 4.0 entwickelt.

4.1 Architektur des Informationsmodells

Das Informationsmodell dient als Grundlage des Konzepts. Es setzt sich aus einem Kernmodell und mehreren Partialmodellen zusammen. Das Kernmodell basiert auf einem XML-Schema und fungiert als zentrale Integrationsplattform, in der die grundlegende Datenstruktur, Logik und Schnittstellen definiert sind. Die Partialmodelle ergänzen das Kernmodell und sind dabei nahezu beliebig erweiterbar. Die Partialmodelle enthalten und stellen in diesem Zusammenhang Informationen über Produkte, Prozesse, Ressourcen und Mitarbeiter zur Verfügung. Die Architektur des Informationsmodells zeigt Bild 3.

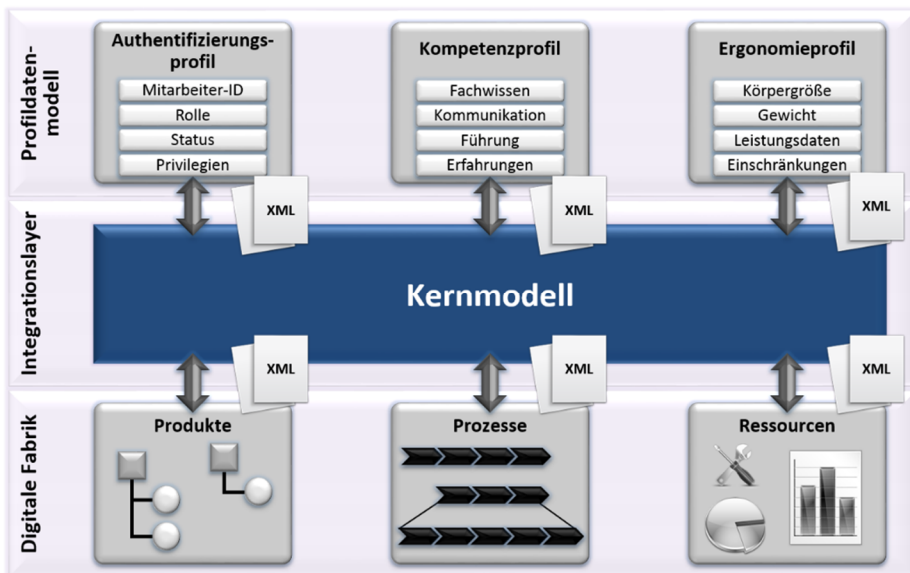


Bild 3: Architektur des Informationsmodells

Die Architektur des Konzepts besteht aus drei Schichten: Digitale Fabrik, Integrationsschicht und Profildatenmodell. Das Kernmodell und die Partialmodelle des Informationsmodells sind diesen Schichten zugeordnet. Die digitale Fabrik enthält alle Informationen zu Produkten, Prozessen und Ressourcen, jeweils in separaten Partialmodellen. Das Kernmodell ist der Integrationsschicht zugeordnet und fungiert als zentrale, standardisierte Schnittstelle zwischen allen Partialmodellen. Es beinhaltet nur die Informationen, die notwendig sind um eine Kopplung der Partialmodelle zu ermöglichen. Der Informati-

onsaustausch basiert dabei auf einem XML-Schema. Das Profildatenmodell besteht aus den Partialmodellen Authentifizierungsprofil, Kompetenzprofil und Ergonomieprofil. Sie ermöglichen die digitale Repräsentation der Produktionsmitarbeiter. Zu dem Authentifizierungsprofil zählen unter anderem der Name, die Mitarbeiter-ID, die Rolle im Unternehmen, der aktuelle Status in Bezug auf kapazitive Verfügbarkeit sowie die mit der Stellenbeschreibung einhergehenden Rechte und Privilegien. Das Kompetenzprofil beinhaltet sowohl die Hard-Skills als auch die Soft-Skills der Mitarbeiter, wie Fachwissen, Erfahrungen und Führungskompetenzen. Informationen über Körpergröße, Gewicht, Leistungsdaten, etc. sind in dem Partialmodell Ergonomieprofil abgelegt.

Während die IT-Durchdringung im Bereich der digitalen Fabrik hoch ist und alle relevanten Daten bereits digital vorliegen, müssen im Bereich des Profildatenmodells diese in der Regel zunächst formalisiert und digital repräsentiert werden. Dies ist für jeden einzelnen Mitarbeiter in der Produktion durchzuführen. Der innovative Kern des Konzepts besteht in der Nutzbarmachung dieser individuellen Mitarbeiterinformationen im Profildatenmodell für die Methoden der digitalen Fabrik. Aus dem allgemeinen Schema des Profildatenmodells können mitarbeiterspezifische Profilmodelle instanziiert werden. Dies ermöglicht die Nutzung von individualisierbaren Profilmodellen in der digitalen Fabrik. Bei einer vollständigen Kopplung von physischer und virtueller Welt kann so der Faktor Mensch in cyber-physische Produktionssysteme ganzheitlich integriert werden.

4.2 Integration des Profildatenmodells

Durch die zentrale Integration der Partialmodelle über das Kernmodell können mitarbeiterspezifische Profilmodelle und digitale Menschmodelle mit anderen Partialmodellen und deren Objekten in Bezug gesetzt und miteinander vernetzt werden, sodass ein durchgängiger, bidirektionaler Informationsfluss entsteht. Über das Informationsmodell können Klassen und Methoden aus der digitalen Fabrik übertragen werden, was eine kontextspezifische Verwendung und Evaluierung der Modelle ermöglicht. So können Informationen über physische Merkmale der Produktionsmitarbeiter, wie z. B. Geschlecht, Körpergröße oder Gewicht, in dem Profildatenmodell hinterlegt und als Datenbasis für die digitalen Menschmodellen verwendet werden. Dies führt zu einem individualisierten Menschmodell, das in einer digitalen Fabriksimulation des Produktionsablaufs eingesetzt werden kann. Durch die Integration mit anderen Partialmodellen können beispielsweise individuell für jeden Produktionsmitarbeiter automatisierte Belastungsanalysen durchgeführt werden. Auf Basis des entwickelten Informationsmodells können ebenfalls Produktionsmit-

arbeiter gezielt nach ihren individuellen Kompetenzen und Fähigkeiten eingesetzt werden und alle produktionsrelevanten Daten zurück in die Entwicklung fließen.

Das Profildatenmodell ist Teil des Informationsmodells zur Integration von mitarbeiterbezogenen Profildaten in cyber-physische Produktionssysteme. Es gliedert sich in drei Partialmodelle: Authentifizierungsprofil, Kompetenzprofil und Ergonomieprofil. Die Struktur des Profildatenmodells ermöglicht bei Bedarf die Erweiterung um zusätzliche Partialmodelle. Innerhalb der Partialmodelle werden die zugehörigen Daten verwaltet. Identifizierende und klassifizierende Daten wie Name, Mitarbeiter-ID und Rolle zur Authentifizierung liegen in der Regel digital vor und sind bereits in einer Datenbank gespeichert. Der Austausch von Informationen kann hier direkt auf Basis von XML erfolgen. Bei den anderen beiden Partialmodellen, Kompetenzprofil und Ergonomieprofil, müssen die relevanten Informationen zunächst erfasst, formalisiert und in einer Datenbank gespeichert werden. Die Datenerfassung muss durchgängig methodisch unterstützt werden, z. B. in Form von Fragebögen, Datenblättern, UML-Diagrammen, etc. Sobald alle Informationen digital vorliegen, können sie über das Kernmodell auf Basis von XML integriert werden. Aspekte des Datenschutzes sind hierbei zu berücksichtigen. Sie werden allerdings auf Grund des konzeptionellen Charakters des vorgestellten Informationsmodells zunächst vernachlässigt und sind Gegenstand aktueller Forschungen.

Im Idealfall verfügen alle am Produktionsprozess beteiligten Objekte sowohl über eine physische sowie über eine virtuelle Repräsentation. Über das Kernmodell können Informationen zwischen der digitalen Fabrik und dem Profildatenmodell auf Basis von XML ausgetauscht werden. Durch die Instanziierung definierter Datensätze im Profildatenmodell können individualisierte Profilmodelle den konkreten Produktionsmitarbeitern zugeordnet und in die Prozess- und Ressourcenplanung von cyber-physischen Produktionssystemen eingesetzt werden. Dies ermöglicht eine frühzeitige Absicherung von Arbeitsabläufen und den Abgleich von Bedarfen aus der Ressourcenplanung mit der Leistungsfähigkeit auf der Maschinen- und Mitarbeiterseite.

5 Anwendungsfälle

Für die Validierung des Konzepts werden zwei Anwendungsfälle betrachtet. Der erste Anwendungsfall beschreibt die Nutzung der Informationen des Profildatenmodells zur Effizienzsteigerung in der Montage bei der Personaleinsatzplanung. Der zweite Anwendungsfall beinhaltet die Nutzung von individualisierten Profilmodellen bei der Entwicklung eines adaptiven Montagearbeitsplatzes.

5.1 Personaleinsatzplanung für die Montage eines Pneumatikzylinders

In der Produktion besteht der Auftrag für die Montage von 100 Pneumatikzylindern. Aus den Systemen der digitalen Fabrik können die relevanten Informationen wie Stückliste, Montageplan, Arbeitsplan, Maschinenkapazität etc. abgerufen werden. Für die Personaleinsatzplanung wird das Profildatenmodell verwendet. Über das Authentifizierungsprofil können alle verfügbaren Mitarbeiter, die organisatorisch der Montage zugewiesen sind, identifiziert werden. Über das Kompetenzprofil können diejenigen Montagemitarbeiter ausgewählt werden, die aufgrund ihres Fachwissens und ihrer Erfahrungen am besten für die Montage von Pneumatikzylindern geeignet sind. Durch den Abgleich des Anforderungsprofils für den Montageprozess aus der digitalen Fabrik mit dem Kompetenzprofil der verfügbaren Mitarbeiter kann so eine bedarfsoptimale Personaleinsatzplanung erfolgen.

Auch Störgrößen können bei diesem Informationsabgleich berücksichtigt werden. Dies soll an der gedanklichen Weiterführung des obigen Beispiels verdeutlicht werden. Aufgrund von Umbauarbeiten in der Montageabteilung sind nur Stehtische an den Arbeitsplätzen verfügbar. Aus dem Ergonomieprofil der ausgewählten Mitarbeiter wird ersichtlich, dass 10 % der geeigneten Mitarbeiter für die Montage der Pneumatikzylinder aufgrund von körperlichen Einschränkungen nicht lange im Stehen arbeiten können. Dies kann durch die im Profildatenmodell vorliegenden Informationen bei der Personaleinsatz- und Ressourcenkapazitätsplanung frühzeitig berücksichtigt werden.

5.2 Entwicklung eines adaptiven Montagearbeitsplatzes

Im Rahmen einer nachhaltigen Effizienzsteigerung in der Produktion sollen neue Montagearbeitsplätze entwickelt werden, die sich adaptiv an den jeweiligen Produktionsmitarbeiter anpassen sollen. Die benötigten Informationen zu den Mitarbeitern werden über das Profildatenmodell bereitgestellt. Aus dem Profildatenmodell werden die individualisierten Profilmodelle instanziiert. Für jeden Produktionsmitarbeiter entsteht eine virtuelle Repräsentation. Diese individualisierten Profilmodelle dienen als Grundlage für die virtuelle Entwicklung der Montagearbeitsplätze in der digitalen Fabrik, siehe Bild 4. Dies ist zwingend erforderlich, da sich die neuen Arbeitsplätze automatisch auf den jeweiligen Mitarbeiter einstellen lassen müssen.

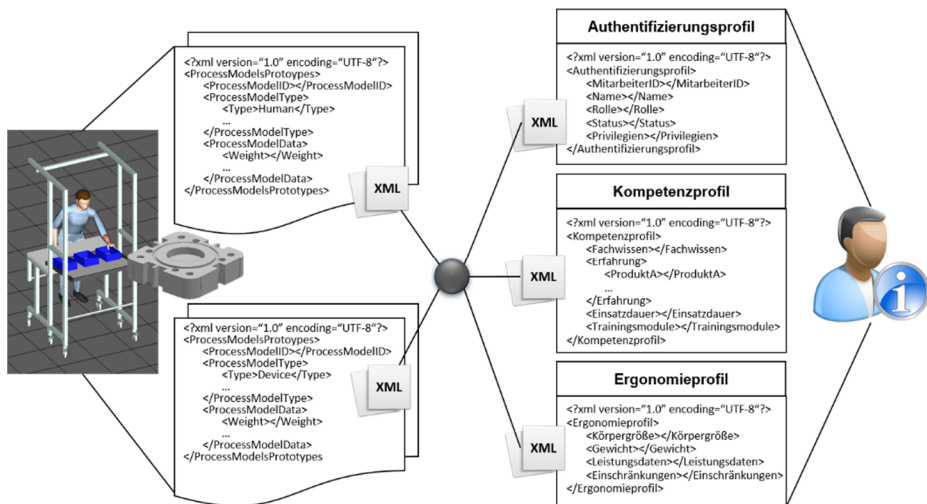


Bild 4: Integration des Profilmodells in die digitale Fabrik

Mit den virtuellen, individualisierten Profilmodellen können Einstellungen wie Stuhl- und Tischhöhe, Blickwinkel zum Monitor, etc. für jeden Mitarbeiter einzeln erfasst und gespeichert werden. Dies dient zur virtuellen Absicherung des entwickelten Montagearbeitsplatzes, wodurch Kosten für reale Prototypen reduziert werden können. Die für jeden Mitarbeiter gespeicherten Daten dienen zudem als Eingangsgröße für die automatisierte Einstellung der realen Montagearbeitsplätze auf die jeweiligen Produktionsmitarbeiter. Sobald der Produktionsmitarbeiter den Montagearbeitsplatz betritt, werden über ein entsprechendes Signal alle Objekte, wie beispielsweise Tische oder Stühle, auf ihn personalisiert eingestellt und die benötigten Informationen, wie Montageanleitungen, auf einem Display angezeigt. Durch den Abgleich mit den Auftragsdaten aus der digitalen Fabrik können Container mit den benötigten Bauteilen und Werkzeugen automatisch bestückt und am entsprechenden Montagearbeitsplatz bereitgestellt werden. Dies führt zu einem Zeitvorteil in der Produktion.

6 Fazit und Ausblick

Industrie 4.0 ermöglicht einen Technologiefortschritt, der langfristig zu einer Effizienzsteigerung in Entwicklung und Produktion führen wird. Einzelne Bauteile fungieren als Informationsträger innerhalb von vernetzten cyberphysischen Produktionssystemen und dienen als Grundlage für die Integration

von Produktinformationen über den gesamten Produktlebenszyklus. In diesem Beitrag wird der erste Ansatz für ein Profildatenmodell zur Integration von mitarbeiterspezifischen Informationen in Smart Factories vorgestellt. Methoden und Werkzeuge der digitalen Fabrik werden dabei aufgegriffen und im Kontext der Industrie 4.0 weiterentwickelt. Das zugehörige Informationsmodell, bestehend aus einem Kernmodell und Partialmodellen, ermöglicht einen durchgängigen, bidirektionalen Informationsfluss zwischen digitaler Fabrik und dem Profildatenmodell. Dies ermöglicht die virtuelle Repräsentation des Faktors Mensch in cyber-physischen Produktionssystemen und die kontextspezifische Verwendung von digitalen, individualisierbaren Profilmodellen.

Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit der Integration des Profildatenmodells in das Bauteildatenmodell und somit in das Wertschöpfungsphasenmodell. Hier bedarf es einer Anpassung der Prozessbeschreibung sowohl aus der Bauteil- als auch aus der Mitarbeiterperspektive. Momentan basiert der Informationsaustausch auf einem XML-Schema. Es ist zu untersuchen, inwiefern eine UML-Notation zur Beschreibung von Klassen und Methoden integriert werden kann. Weiterhin muss ein Ansatz zur Integration und Steuerung der virtuellen Menschmodelle in das digitale Fabrikmodell entwickelt werden. Anders als der heutige Stand der Technik wird es zukünftig erforderlich sein, die virtuelle Menschmodelle durch Angabe des zu absolvierten Prozesses steuern zu können. Aus diesem Grund wird die Entwicklung einer formalisierten Prozessbeschreibung aus Sicht der Menschen als nächste Entwicklungsstufe des in diesem Beitrag vorgestellten Konzepts angesehen. Auch der Einsatz von Internettechnologien in diesem Kontext ist Gegenstand zukünftiger Forschungen.

Förderhinweis

Die Arbeit wird zum Teil durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts „SmartF-IT – Cyber-physische IT-Systeme zur Komplexitätsbeherrschung einer neuen Generation multiadaptiver Fabriken“ gefördert (FKZ: 01|S13015).

Literatur

- [1] Anderl, R.; Strang, D.; Picard, A.; Christ, A.: "Integriertes Bauteildatenmodell für Industrie 4.0", Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrg. 109 (1-2), 2014.
- [2] Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: "Digitale Fabrik", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.

-
- [3] Galaske, N.; Wagner, T.; Strang, D.; Anderl, R.; Bruder, R.: "Konzept zum Einsatz digitaler Menschmodelle in Cyber-physischen Produktionssystemen", In: 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft, München, 12.-14. März 2014.
- [4] Kühn, W.: "Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner", Carl Hanser-Verlag, München, Wien, 2006.
- [5] Lee, E. A.: "CPS Foundations", In: Proceedings of the 47th Design Automation Conference (DAC), ACM/IEEE, 2010.
- [6] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: "Montage in der industriellen Produktion", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [7] Mühlstedt, J.; Spanner-Ulmer, B.: "Programme in Menschengestalt: Digitale Menschmodelle für CAX- und PLM-Systeme", Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 2008.
- [8] Spath, D. (Hrsg.): "Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0", Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013.
- [9] Strang, D.; Galaske, N.; Anderl, R.: "Beschreibungsmethode für die Repräsentation cyber-physischer Produktionssysteme", In: Entwickeln, Entwerfen, Erleben 2014, Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Dresden, 26.-27. Juni 2014.
- [10] VDI 4499-1: "Digitale Fabrik – Grundlagen", Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2008.

Design to Process Capabilities: Challenges for the Use of Process Capability Databases (PCDBs) in Development

Tobias Eifler, Simon Moritz Göhler and Thomas J. Howard
*Section of Engineering Design and Product Development;
Technical University of Denmark*

1 Introduction

In approaches such as Robust Design, Tolerance Management, Design for Six Sigma (DfSS), etc. there is little disagreement that a better understanding of inevitable production variation is conducive to the success of development projects [Eifler et al. (2013), Arvidsson and Gremyr (2008), Karmakar and Maiti (2012), Breyfogle (2003)]. At the same time, information on the achievable manufacturing accuracy or the supplier's performance is usually inaccurate and largely qualitative in early development stages. Design decisions as well as the choice of manufacturing processes, therefore, often rely on experiential approaches or expert judgment. There are numerous examples that this subjective assessment of potential variation and a mostly informal communication between design and production engineers can result in non-satisfying product or manufacturing solutions. Whereas overestimated production capabilities may lead to low yields and a cost/time overrun, conservatively underestimated capabilities affect quality through the reduced design space, or through increased play, rattle/noise, size or weight.

A possibility to overcome the subjective assessment of variation in development projects is a Process Capability Data Base (PCDB) offering valuable insight into the actual or expected performance of production processes (Tata

and Thornton, 1999). But although the potential benefits as well as initial challenges for the use of PCDBs have been addressed in earlier research, e. g. by Delaney and Phelan (2008), Kern (2003) or Tata and Thornton (1999), a widespread adoption in industry cannot be observed. As already stated by Okholm et al. (2014), there are many open questions and a methodical support how to generate, provide and use generalized production variation data still seems to be missing.

To foster the use of corresponding databases and to stimulate further research, this paper gives an overview about the scope of potential applications for a PCDB in product development. Furthermore, the expected manufacturing accuracy of specific product characteristics/features is discussed. For the generalization of measurement data, a DOE (Design of Experiments)-based approach is proposed to identify influencing factors related to the production accuracy of each geometric feature, using the example of metal shear forming processes.

2 Background

A decisive drawback for a coherent management of variation in practice is that most of the existing modeling and analysis approaches assume complete and accurate knowledge whereas objective information about process capabilities is usually not available in early development stages (Tata and Thornton, 1999). The basic idea of a PCDB, explained in section 2.1, consequently seems to be straight forward. However, the applicability as well as challenges of a design oriented database need to be discussed in section 2.2.

2.1 Process Capability Data Base

In addition to other sources of variation in the product life cycle, e. g. ambient conditions or unexpected loads (Ebro et al., 2012), manufacturing inaccuracies need to be taken into account as early as possible in the development process. Parts are therefore designed with allowable geometric variations, i. e. suitable tolerance windows, to ensure that the product will assemble and function as intended (Schleich and Wartzack, 2013). At the same time, there is a clear lack of suitable tools offering objective information on production variation data in early design stages. Available software solutions focus primarily on monitoring or optimization task in production. The stored process capability data is often largely unused in product development (Tata and Thornton, 1999).

Inspired by earlier work, Okholm et al. (2014) therefore conceptualize and generate an example PCDB for injection molded components. Based on exist-

ing Quality Control (QC) procedures, multiple components are measured and valuable information from measurement reports, e. g. mean shifts and standard deviations, are then made available in a database. Flexible tagging schemes, statistical analysis tools as well as suitable graphical displays and design guidelines enable the designer to sort and to compare process capabilities for specific geometry features, materials, suppliers, etc., see Figure 1.

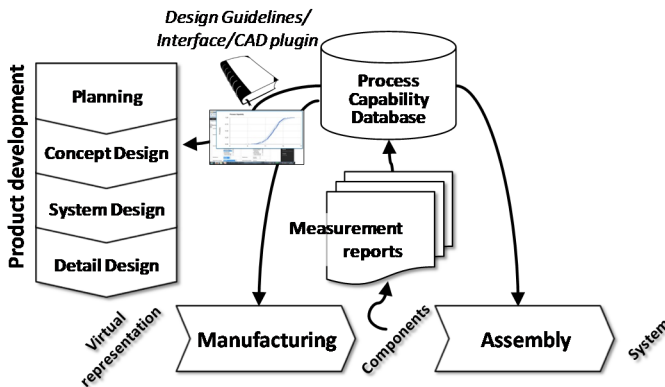


Figure 1: Process Capability Data Base

2.2 Challenges of PCDB usage in engineering design

At the same time, an overview about different application areas for such PCDBs in development, and thus the potential benefit, is still missing to the authors' knowledge. Moreover, one of the most crucial factors for a successful generation and storage of process capability data is completely neglected so far. Whereas graphical displays proposed by Thornton and Tata (2000) or Okholm et al. (2013) provide the designer with objective information about the variation of single product features, other influences as well as existing interactions between product characteristics or process parameters are not considered.

In a first step, Okholm et. al (2014) point out the importance of part size for the prognosis of an expected tolerance window. Based on different standards for injection moulding processes, measurement data is normalized with respect to dimensions, see Figure 2. An additional important aspect considered but not solved, is the estimation of long-term process performance. A variety of influences leading to wear of tools, changing ambient conditions, etc. are usually taken into account by a simple adjustment of process capability indices from the recommended value $C_{pK} = 2$ to $C_{pK} = 1,5$ due to the resulting mean shift (Breyfolge, 2003).

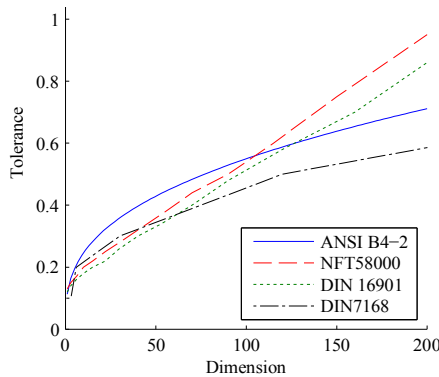


Figure 2: Influence of part dimensions on achievable tolerance windows for injection moulded components (Okholm et al., 2014)

However, the methodical use of PCDBs for design purposes requires not only the consideration of single influences on the resulting production variation, but needs to be extended to the impact of existing interactions between them. If the resulting tolerance windows are significantly impacted by additional product characteristics, process parameters or their combination, the information given in Figure 2 can for example be completely misleading.

For the development and usage of PCDBs as well as for further research, there are consequently two decisive questions:

- **Scope of application:** What is the potential benefit of a PCDB for different development tasks and what is the methodical support needed to enable the designer to use the given information?
- **Interaction effects:** How can interactions between different design and/or process parameters that may have an effect on the resulting variation of manufacturing operations be incorporated in a PCDB?

3 Using PCDBs for design purposes

The availability of objective process capability data in a database could support a variety of design tasks. However, methodical support of a PCDB is necessary for a real shift from a late and costly evaluation of production feasibility to a proactive Design to Process Capabilities (DtPC). To identify benefits of this new approach as well as further research questions, the different applications areas of a PCDB are summarized (*section 3.1*). Afterwards, challenges for the generalization of measurement data in statistically designed experiments are presented (*section 3.2*).

3.1 Design to Process Capabilities (DtPC)

The product development process is an iterative process rather than a linear one. The results of design decisions are continuously reviewed, potentially leading to design changes, i. e. iterations to earlier development phases (Pahl et al., 2007). Following the description of tolerance activities, e. g. in Schleich and Wartzack (2013), Figure 3 illustrates potential benefits of PCDBs in product development. Usually, the choice of a concept and the definition of geometries (*Design*) are followed by the definition of tolerable geometric variations in three subsequent tolerancing steps. The identification of required part or datum features (*Tolerance Specification*) is followed by the setting/optimization of tolerance windows (*Tolerance Allocation*) that are then basis for a verification of functional implications and necessary changes (*Tolerance Analysis*). However, as already pointed out, the feedback from production frequently relies on expertise and experience, mainly from previous products. Furthermore, the functional relevance of tolerances is not necessarily known by the production expert. The main implication is that the manufacturability of the design and the specified tolerances is usually not evaluated until a detailed design is passed over to *Production*.

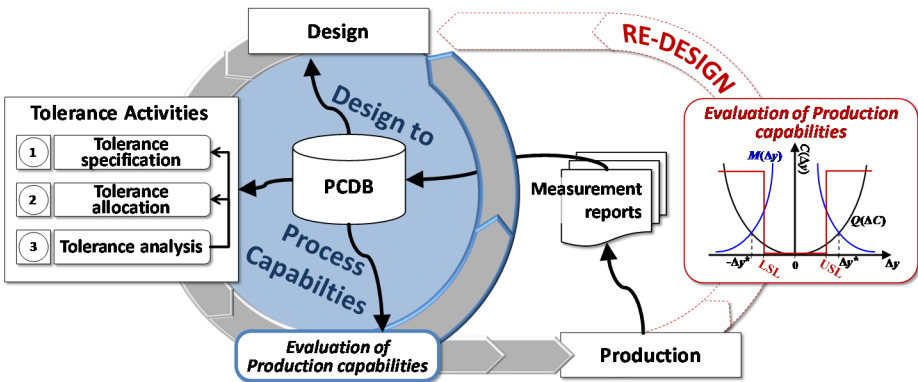


Figure 3: Design to Process Capabilities

To overcome late and consequently costly *Re-Designs*, a PCDB offers objective information about production variation in early development stages, enabling design engineers to significantly reduce the size of the iteration cycles. The PCDB provides objective, quantitative feedback regarding the estimated manufacturability of a product and its functional performance. This will allow critical surfaces and features to be identified earlier and suitable production technologies to be chosen.

Taken as a whole, four main application areas of a PCDB can be distinguished and need to be analysed further:

Table 1: Application areas for PDCBs in development

Design for a tolerance optimum
<p>The fundamental aim of PCDB usage in product development is the choice of optimal tolerances. The integration of objective production variation data into tolerance activities supports the definition of tolerable variation Δy^*, minimizing the overall costs $C(\Delta y)$ resulting from quality loss $Q(\Delta y)$ and manufacturing effort $M(\Delta y)$, see also Figure 3. Decisive questions for a methodical Design to Process Capabilities approach thereby result from the consideration of geometric tolerances, i. e. the notation (GD&T) as well as a suitable measurement procedure for manufactured parts.</p>
Evaluation and optimization of concept robustness
<p>In addition, available and easily accessible production variation data also facilitates the evaluation of ambiguity in a design or the choice of suitable surfaces. Through the development of suitable modeling approaches, e.g. based on models of organs or interfaces/working surfaces, the identification of function relevant part or datum features and the optimization of chosen solutions can be supported before the actual numerical tolerance values are specified. However, to attend this aim, an extension of existing Robust Design methods as well as an integration of corresponding tasks into a coherent Design to Process Capabilities procedure seems to be necessary.</p>
Concurrent choice of manufacturing technologies
<p>In parallel to the optimization of concept robustness, a PCDB will also allow for an objective choice of suitable manufacturing processes in early design stages. Although the trade-off between technological capabilities and economic opportunities is of outstanding importance and highly influenced by development decision, corresponding decisions are frequently left to production engineers (Swift and Booker, 2013). Any implications and predeterminations of the chosen product solution are consequently neglected to a great extent.</p>
Benchmarking of process performance
<p>A long-term aim for the use of production variation data is the generation of a global PCDB which comprises different production technologies, different OEMs as well as their suppliers. The benefit in a mass manufacturing scenario is obvious. A support for outsourcing and supplier management decisions can offer significant economic benefits to an organization and shifts the focus of interchangeable parts to a detailed analysis of the interchangeability of processes (Karmakar and Maiti, 2012). Such a database would allow companies to compete and benchmark themselves against other companies using the same production processes.</p>



3.2 Generalization of measurement data

One critical success factor for the use of PCDBs in development projects is the generation and storage of generalized process capability data. The information provided must be valid for different designs, i. e. applicable independently of specific conditions of the development task. For the generation of generalized measurement data, there is consequently a clear need for a preliminary analysis of relevant influencing factors, both in terms of product characteristics and process parameters, as well as of their interactions which also may affect the resulting variation of manufacturing operations. Corresponding challenges (*section 3.2.1*) and the possibility of a DoE-based analysis of influencing factors (*section 3.2.2*) are illustrated using the example of metal shear forming processes.

3.2.1 Example process: metal shear forming

In this paper, a DOE-based approach is used to, on the one hand, investigate the impact of different influencing factors in metal shear forming processes, and on the other hand to elaborate deeper insight and a methodical support how to generate and to use process capability data for design purposes. In metal shear forming processes, axially symmetric components are produced using a roller tool forcing flat sheet metal blanks onto a mandrel as shown in Figure 4 a). Even though not as widespread as other forming techniques, e. g. deep drawing, the process offers some inherent advantages. Simple and low cost tooling, surface quality, mechanical properties, etc. led to an increasing use of metal shear forming for the production of lightweight components (Wong et al., 2003).

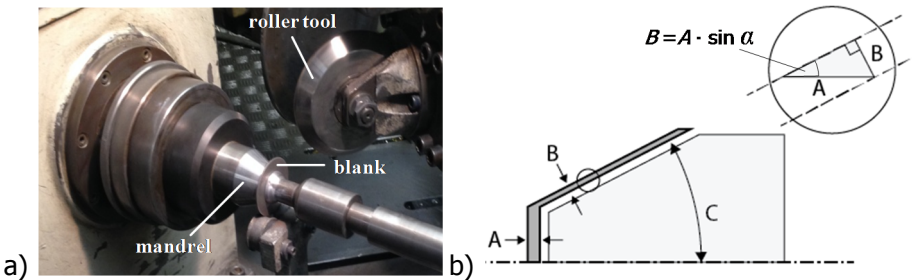


Figure 4: Description of a) Metal Shear Forming process by b) the law of sine

However, in comparison to other usually CNC controlled manufacturing processes metal shear forming is often still relying on a so-called playback control (Wong et al., 2003). As it is thus highly dependent on the recorded

tool path and the experience of operators, the underlying dependencies and interactions of different influencing factors are frequently not fully understood and even explanations in literature seem to be contradictory, e. g. in Wong et al. (2003) and Kleiner et al. (2005). Moreover, trade-offs between the accuracy of different quality characteristics exist and play a decisive role for the design of components. An example is the definition of the final wall thickness B , which is usually calculated based on the starting wall thickness A as well as the required angle α , as shown in Figure 4 b). Both parameters are specified by the designer, who thereby influences process forces leading to different effects on product characteristics, such as circularity, surface quality, etc. To provide generalized measurement data of shear spun components, they consequently need to be taken into account.

3.2.2 Experimental investigation of metal shear forming

As a baseline for the generation of a PCDB for shear spun components, existing relevant influences as well as existing interactions are analysed in a preliminary investigation. Three groups of experimental runs using cone molds/mandrels of $\alpha = 22 - 27^\circ$ compared to the rotational axis were conducted. Other aspects of the experimental setup are summarized in Table 2.

Table 2: Application areas for PDCBs in development

Production:	<ul style="list-style-type: none"> Leifeld PNC 106 spinning machine with CNC support radius of roller edge $r = 4,5 \text{ mm}$
Measurements:	<ul style="list-style-type: none"> Mitutoyo Euro-M 544 measuring machine Hand held thickness caliper (precision $\pm 0,02 \text{ mm}$)
Workpieces:	<ul style="list-style-type: none"> Material EN.4404 SS steel Plate thickness $h = 2 \text{ mm}$

According to basic procedures of statistically designed experiments, for example described in Jiju (2003), screening experiments were performed for different angle sizes to identify key design as well as process parameters. Suitable intervals for the experimental analysis were chosen based on available literature, e. g. Wong et al. (2003) or Kleiner et al. (2005), and lessons learned from previous pilot experiments. Figure 5 summarizes the impact of the different control factors, i. e. the *Feed Ratio*, the *Surface Velocity* and the specified clearance between roller tool and mandrel (*Reduction*) which is specifically calculated to realize different cone angles. In addition, potential interaction effects are taken into account.



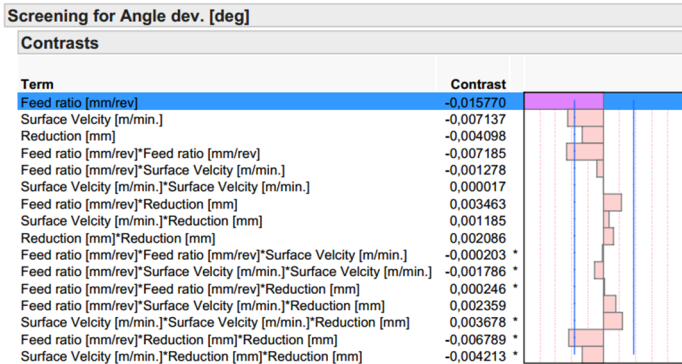


Figure 5: Results for screening experiments

As shown in the Pareto plot in Figure 5, the process parameters *Feed Ratio* and *Surface Velocity* as well as possible interactions are the main contributors to a deviation of the cone angle $\Delta\alpha$. They were consequently analysed in a Full Factorial Design with 3 levels for each control factor afterwards.¹ However, whereas the investigation and optimization of the process parameters is usually the task of production engineers, the clearance between roller tool and mandrel (*Reduction*) is directly defined by the required cone angle specified in design. Consequently, existing dependencies need to be fully understood before measurement data/a PCDB for metal spun components can be generated.

The contour plots in Figure 6 therefore concentrate on the clearance specified for the conducted experimental runs. One result of the analysis is that there are clear differences between optimal process settings in terms of variation or precision of the metal shear forming processes. Using a mean value of the resulting cone angle in 3 experimental runs for the same parameter set, the deviation of the cone angle appears to be solely a function of the surface velocity and completely insensitive to changes of the specified clearance, see Figure 6 a). However, an additional analysis of the possible variation indicates that the clearance plays a crucial role for the generation of generalized measurement data. The calculated standard deviation of the response per parameter set shows that potential variation of the cone angle is clearly affected by the specified clearance, see Figure 6 b), which consequently need to be taken into account.

¹ see for example Jiju (2003) for further explanations of DoE

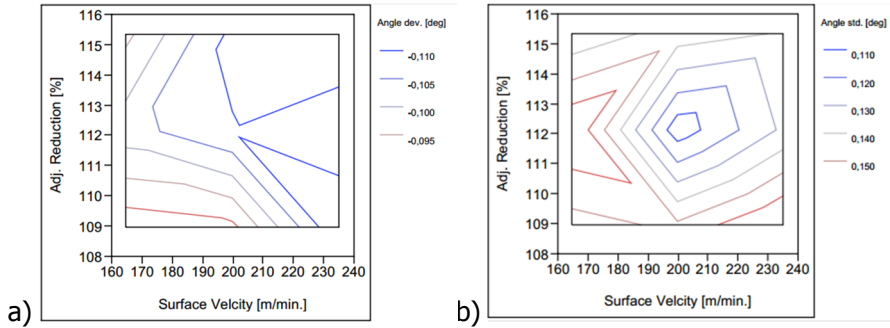


Figure 6: Analysis of a) precision and b) variation of Metal Shear Forming

In total, the conducted experiments allow also for a first overview about the process capability achievable in metal shear forming processes. Based on the assumption of normal distribution, which according to the normal probability plot in Figure 7 seems to be a good fit, the expected C_{pK} values can be calculated. Disregarding the parameter changes in the first place, the conducted experiments consequently can be already used to get a first idea of the process capability of metal shear forming processes.

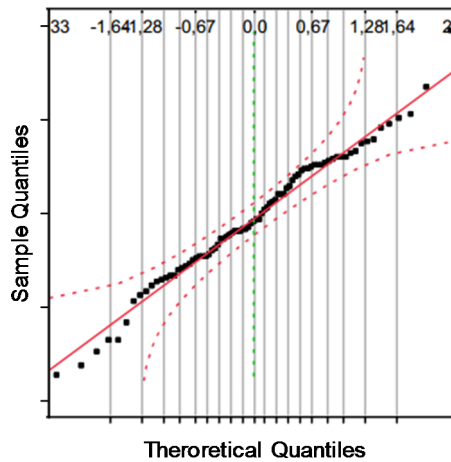


Figure 7: Normal probability plot for resulting cone angle

4 Discussion and Conclusion

The idea of a PCDB is straight-forward and offers an enormous potential for an improved communication between design and production departments as well as for a better understanding of the inevitable variation in manufacturing processes. However, a variety of challenges has to be solved before a widespread adoption in industry is possible.

To foster the use of objective production variation data for design purposes and to stimulate further research, this paper gives an overview about the scope of application of PCDBs and summarizes potential benefits of a new Design to Process Capabilities approach. It is concluded that a deeper insight into production processes and a better understanding of existing dependencies between product characteristics, process parameters as well as their interactions is necessary for the generation of measurement data in PCDBs. The proposed DoE-based analysis of metal shear forming processes thereby illustrates first results as well as further research questions for the generalization of measurement data.

References

- [1] Arvidsson, M and Gremy, I. (2008): "Principles of Robust Design Methodology". *Quality and Reliability International*, Vol. 24(1), pp. 23 – 35.
- [2] Breyfogle, F. (2003): "Implementing Six Sigma – Smarter Solutions Using Statistical Methods". John Wiley & Sons, 2nd edition, New Jersey/USA.
- [3] Delaney, K. V. and Phelan, P. (2008): "Design improvement using process capability data". *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 209, pp. 619 - 624.
- [4] Ebro, M.; Howard, T.J. and Rasmussen, J.J.: "The Foundation of Robust Design – Enabling Robustness through Kinematic Design and Design Clarity". *DESIGN'12*, Dubrovnik/Croatia.
- [5] Eifler, T.; Ebro, M.; Howard and T.J. (2013): "A Classification of the Industrial Relevance of Robust Design Methods". *ICED'13*, Seoul/Republic of South Korea, pp. 522 – 531.
- [6] Jiju, A. (2003): "Design of Experiments – for Engineers and Scientists". Butterworth-Heinemann, Oxford/UK.
- [7] Karmakar, S. and Maiti, J. (2012): "A Review on Dimensional Tolerance Synthesis – Paradigm Shift from Product to Process". *Assembly Automation*, Vol. 32(4), pp. 373 – 388.

-
- [8] Kern, D.C. (2003): "Forecasting manufacturing variation using historical process capability data: applications for random assembly, selective assembly, and serial processing". PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT)/USA.
- [9] Kleiner, M.; Ewers, R.; Kunert, J.; Henkenjohann, N.; Auer, C. (2005): "Optimisation of the shear forming process by means of multivariate statistical methods". Technical Report, Collaborative Research Center 475 Komplexitätsreduktion in Multivariaten Datenstrukturen, No. 23, Universität Dortmund/Germany.
- [10] Okholm, A.B.; Rask, M.; Ebro, M.; Eifler, T.; Holmberg, M. and Howard, T.J. (2014): "Improving Process Capabilities Usage for Robust Design Engineering by Generalising Measurement Data". DESIGN'14, Dubrovnik/Croatia, pp. 1133 – 1144.
- [11] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. and Grote K.H.: "Engineering Design – A Systematic Approach". Springer Verlag, 3rd edition, London/UK.
- [12] Schleich, B. and Wartzack, S. (2013): "Process-oriented Tolerancing – a Discrete Geometry Framework". ICED'13, Seoul/Republic of South Korea, pp. 168 – 177.
- [13] Tata, M. and Thornton, A. (1999): "Process capability database usage in industry: myth vs. reality". ASME Design Engineering Technical Conferences.
- [14] Wong, C.C.; Dean, T.A. and Lin, J. (2003): "A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes". International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 4119 – 4135.
- [15] Srinivasan, V.: "Computational Metrology for the Design and Manufacture of Product Geometry: A Classification and Synthesis". Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 7, pp. 3 – 9.
- [16] Swift, K.G. and Booker, J.D. (2013): "Manufacturing Process Selection Handbook". Butterworth-Heinemann, Oxford/UK.

Contact:

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tobias Eifler
Technical University of Denmark
Department of Mechanical Engineering
Robust Design Group
Email: tobeif@mek.dtu.dk
URL: www.robustdesign.mek.dtu.dk

Analyse offener und geschlossener Toleranzketten im parametrischen 3D-CAD-System

Stephan Husung, Christian Weber, Annika Geis, Axel Oberänder
Fachgebiet Konstruktionstechnik
Technische Universität Ilmenau

Abstract

The paper deals with the representation of vectorial tolerances in the parametric CAD-model using surface-type specific attribute containers, which are attached to the desired nominal surfaces. A major motivation for their integration into the CAD-model is the similarity of the vectorial tolerance representation to the Boundary representation description in current CAD-systems. A main focus of the paper is the handling of partially closed tolerance loops. Most of the CAT-systems only handle open tolerance chains. In contrast, a real system, even if the overall tolerance chain can be considered as an open chain, consists of partially closed tolerance loops just in the joints or base frames. The developed approach is based on the statically determined placement of a rigid body on three points, where the resulting line of action of the force - even for several parts - goes through the support triangle.

Keywords: vectorial tolerances; CAD; closed loops; boundary representation

1 Einleitung

Bei der Entwicklung vieler Produkte müssen neben der Nominalgestalt die Abweichungen von dieser während der Produktentwicklung untersucht und entsprechend der Soll-Eigenschaften begrenzt werden. Klassisch wurden diese Untersuchungen auf dem Papier durchgeführt. Aufgrund der Produktkomplexität und der verfügbaren Entwicklungszeit wird heute vermehrt auf die Unterstützung durch rechentechnische Werkzeuge bei diesen Untersuchungen gesetzt [1].

Bereits seit über zwei Jahrzehnten gibt es Bestrebungen, Toleranzuntersuchungen in das gewohnte Arbeitsmittel von Konstrukteuren – das parametrische 3D-CAD-System – zu integrieren. Dennoch besteht in der Regel nur die Möglichkeit, Toleranzsymbole als rein semantische, nicht direkt mathematisch auswertbare, Informationen an entsprechende Zeichnungs- oder Geometrielemente [2] anzuhängen. Viele CAD-Systeme ermöglichen weiterhin die Behandlung linearer Maßketten. Dies reicht jedoch nur für einfache Betrachtungen aus, da Form- und Lagetoleranzen keine Berücksichtigung finden und keine räumlichen Betrachtungen möglich sind. Daher ist oft die Übertragung in zusätzliche Toleranzmanagement-Systeme (sogenannte CAT (Computer Aided Tolerancing)-Systeme) nötig. Es muss also neben dem Produktmodell im 3D-CAD ein weiteres Modell für die Toleranzuntersuchungen aufgebaut und gepflegt werden. Eine Ausnahme bilden CAT-Systeme, die sich direkt in ein CAD-System als Add-In einbinden lassen und die vergebenen semantischen Informationen interpretieren. Für den Aufbau eines Toleranzmodells ist oftmals ein entsprechender Experte notwendig. Ein praktisches Problem was sich dabei ergibt ist, dass die Produktentwickler in vielen Fällen die Toleranzen nicht mehr selbst vergeben, obwohl sie die notwendigen Hintergrundinformationen über zulässige Gestaltabweichungen besitzen und auch die Auswirkungen derer auf die Produkteigenschaften nicht selbst untersuchen.

Damit die Toleranzen bzw. Toleranzketten auf Basis des Produktmodells im CAD-System selbst analysiert werden können, muss die Repräsentation der Toleranzen direkt und eindeutig mathematisch auswertbar sein. Dies bedeutet eine Abkehr von der klassischen Tolerierung nach Norm. Mathematische Modelle zur Toleranzrepräsentation und -analyse wurden bereits in den 80er und 90er Jahren entwickelt und untersucht. Bekannteste Beispiele hierfür sind das Modell der Geometrischen Flächentolerierung [3], [4], das Relativ-Vektor-Toleranzmodell [5] oder die M-Space Theory [6]. Die damaligen Versuche der Integration in CAD-Systeme waren jedoch sehr schwierig, da die CAD-Modellbeschreibung und -systeme den Zugriff auf die Geometrielemente und die Anpassung der Geometrielemente nur schwer ermöglichten. Inzwischen

sind die CAD-Systeme deutlich weiter. Vor allem durch die Boundary Representation (B-Rep) – Beschreibung, die zunehmende vollparametrische Modellbeschreibung und die Programmierschnittstellen sind Einbindungen von mathematischen Toleranzmodellen, vor allem für eine vektorielle Flächentolerierung, relativ einfach möglich [7]. Wesentliche Vorteile begründen sich darin, dass der Konstrukteur die auswertbaren Toleranzen selbst direkt festlegen und die Auswirkungen der Abweichungen entlang der Toleranzkette im Kontext des Nominalmodells visualisieren und damit auch bewerten kann. Hierfür wird die CAD-interne mathematische Auswertung der Flächenrepräsentation verwendet werden, sodass keine zusätzliche Übertragung in ein weiteres System nötig ist.

2 Vektorielle Toleranzrepräsentation

Die hier vorgestellten Untersuchungen basieren auf den Ergebnissen der Arbeiten von Stark [3] und Britten [8] aus den 90ern. Die in den Arbeiten diskutierten Modelle adressieren die fünf Grundflächentypen (Ebene, Kugel, Zylinder, Kegel und Torus), wobei der Torus aufgrund der Verwendung in den Produktmodellen eine untergeordnete Rolle spielt. Die Lage-Abweichungen der realen Flächen werden durch ideale Ersatzflächenelemente beschränkt. Dabei existiert entsprechend des Flächentyps je Fläche ein Toleranzvektor für die Position und Orientierung. Einige Flächentypen benötigen zusätzlich einen Maßparameter (kein Vektor) mit entsprechender Toleranz (siehe Tabelle 1). Die tolerierte Gestalt eines Bauteils ergibt sich, ähnlich der Beschreibung des B-Rep-Modells, durch das Verschneiden der einzelnen Flächen unter Beachtung der Topologie.

Tabelle 1: Parameter der vektoriellen Flächentolerierung (Auszug)

Fläche	Abweichungen	Nominal + Abweichung
Ebene	Positionsvektor $\Delta \vec{P}_E$	$\vec{P}_E + \Delta \vec{P}_E$
	Richtungsvektor $\Delta \vec{E}_E$	$\vec{E}_{E,n} + \Delta \vec{E}_E$
Zylinder	Positionsvektor $\Delta \vec{P}_Z$	$\vec{P}_Z + \Delta \vec{P}_Z$
	Richtungsvektor $\Delta \vec{E}_Z$	$\vec{E}_{Z,n} + \Delta \vec{E}_Z$
	Radius ΔR_Z	$R_Z + \Delta R_Z$

Bei der Kombination der Toleranzvektoren mit den Vektoren für die nominale Geometrie ist darauf zu achten, dass sich die Vektoren im B-Rep-Modell immer auf den Bauteil-Ursprung beziehen. Die Toleranzvektoren hingegen bilden stets die zulässige Toleranz einer Fläche zu einem Bezug ab, gelten also relativ zu einer Bezugsfläche. Dies muss bei der Überlagerung beachtet

werden. Außerdem muss dem Toleranzvektor eine Referenz auf den Bezug hinzugefügt werden.

Die Modelle von Stark und Britten wurden entsprechend der Möglichkeiten in den heutigen CAD-Systemen erweitert. So lassen sich die vektoriellen Toleranzen einfach als Attribute an die Flächen im CAD-Modell heften (siehe Bild 1).

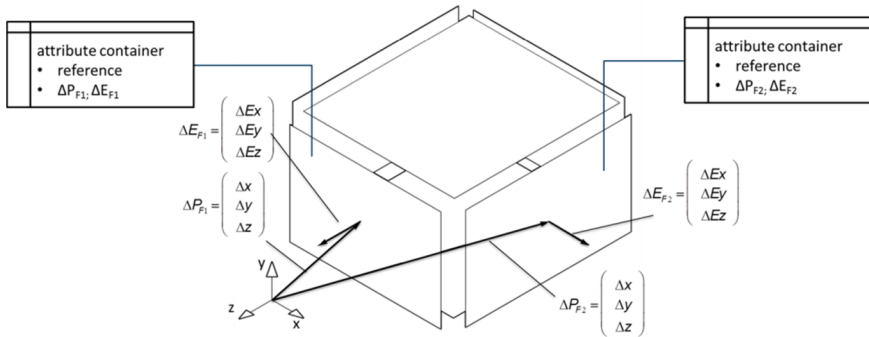


Bild 1: Repräsentation der Toleranzen über flächenspezifische Attribute

Ein entscheidender Vorteil heutiger CAD-Systeme ist, dass das CAD-System einen großen Teil der notwendigen Funktionen für die Toleranzanalyse übernimmt. Für die eigentliche Toleranzanalyse müssen die einzelnen Flächen verschoben, rotiert oder skaliert werden (siehe Bild 2). Dies kann über die Programmierschnittstelle in den CAD-Systemen durchgeführt werden. So existiert beispielsweise im CAD-System SolidWorks direkt eine Funktion zum Verschieben und Rotieren von Flächen, die sogenannte Insert-MoveFace-Methode. Die Skalierung kann über eine Anpassung der Maßzahlen erfolgen.

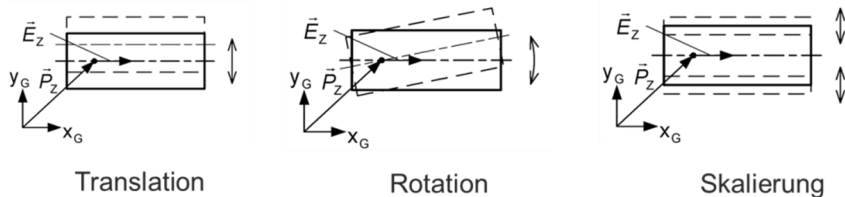


Bild 2: Transformieren der Flächen für die Toleranzuntersuchung (Bilder angelehnt an [3])

Ein weiterer Vorteil heutiger CAD-Systeme ist, dass die CAD-Systeme das B-Rep- sowie das Visualisierung-Modell selbstständig aktualisieren, solange die Topologie gleich bleibt (siehe Bild 3). Dies ist für reale Produkte und Anwendungen fast immer der Fall, da die Abweichungswerte sehr klein sind. Zu beachten ist dabei, dass sich bei einer überhöhten Darstellung der Abweichungen die Topologie scheinbar ändert.

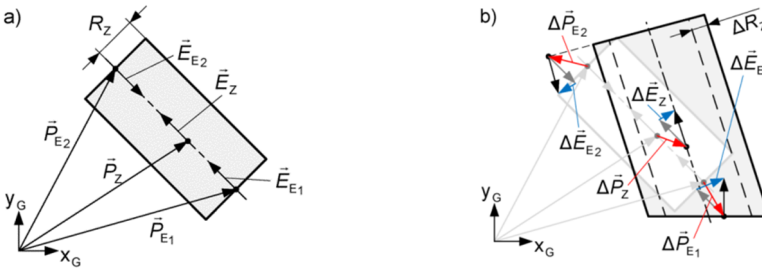


Bild 3: Tolerierter und abweichungsbehafteter Zylinder [9]

Sind die abweichungsbehafteten Bauteile auf der Baugruppenebene miteinander verknüpft und ist die Toleranzkette offen, so kann das CAD-System die Bauteilanzordnung auch automatisch aktualisieren (siehe Bild 4). Hierfür ist jedoch wichtig, dass vorher die Originalflächen transformiert werden, damit die Flächen-ID erhalten bleibt. Außerdem ist darauf zu achten, dass die Bauteilverknüpfungen nicht überbestimmt sind. Dies bedeutet, dass mit den Verknüpfungen keine Freiheiten mehrfach gesperrt werden (z.B. mehrere Verknüpfungen über deckungsgleich oder parallel) dürfen. Eine Überbestimmtheit könnte beim Transformieren einzelner Flächen dafür sorgen, dass das CAD-System die Verknüpfungen nicht mehr geschlossen auflösen kann.

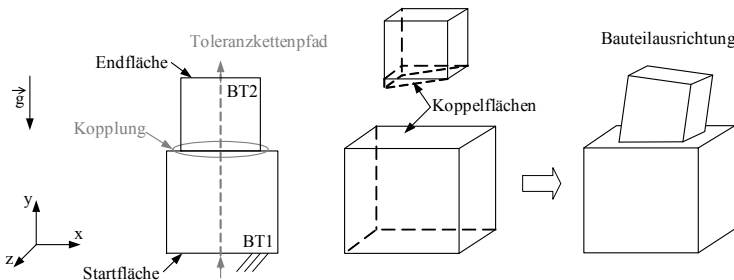


Bild 4: Neuausrichtung von Bauteilen in der Baugruppe nach dem Transformieren von abweichungsbehafteten Flächen

3 Geschlossene Toleranzketten

In vielen technischen Produkten liegen neben offenen Toleranzketten (zwischen der Referenzfläche und der relevanten abweichungsbehafteten Funktionsfläche existiert nur ein eindeutiger Toleranzkettenpfad ohne Rückkopplungen) geschlossene Toleranzketten vor. Diese finden sich beispielsweise bei kinematisch geschlossenen Ketten (z.B. bei Koppelgetrieben) und statisch überbestimmten Strukturelementen (wie z.B. Gestellen). Da bei überbestimmten Systemen die geschlossene Toleranzkette meist auf einen lokalen Bereich beschränkt ist, soll hier von partiell-geschlossenen Toleranzketten gesprochen werden. Für die Analyse der partiell-geschlossenen Toleranzketten wurde eine Methode basierend auf der statisch bestimmten Aufstellung starrer Körper auf drei Punkten entwickelt (siehe Bild 5). Die Umsetzung dieser Methode im CAD-System hat zur Folge, dass die derzeit verwendeten Bauteilverknüpfungen (Ebene-Ebene, Zylinder-Zylinder, etc.) in vielen Fällen nicht mehr gültig sind. Die derzeitigen Bauteilverknüpfungen gehen von geometrisch idealen Geometrien aus, die bei der Toleranzanalyse nicht mehr vorliegen. Die Kernfrage bei der Analyse geschlossener Toleranzketten ist, welche relative Ausrichtung zwei an der geschlossenen Toleranzkette beteiligte Bauteile zueinander haben.

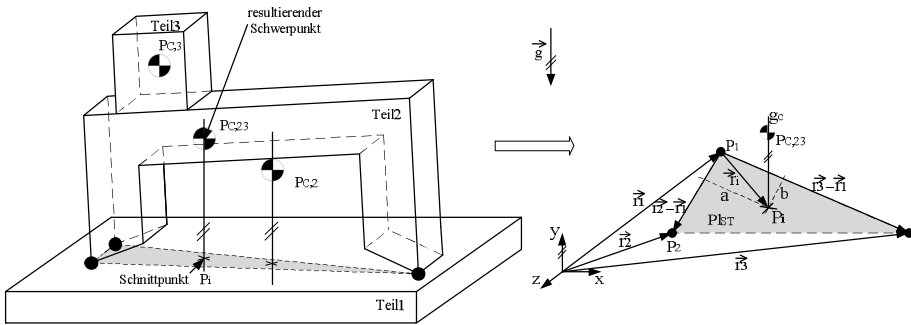


Bild 5: Stützdreieck bei einer einfachen partiell-geschlossenen Toleranzkette [10]

Ein hierfür entwickelter Ansatz beruht auf der statisch bestimmten Aufstellung ideal starrer Körper auf drei Punkten. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich zum besseren Verständnis auf Bauteilpaarungen ohne Einfluss externer Kräfte (z.B. durch Verschraubungen), bei denen zunächst nur die Gewichtskräfte berücksichtigt werden sollen. Bei bekannten Abweichungen der Bauteile muss ein Stützdreieck gefunden werden, durch welches die resultierende Kraftwirkungslinie verläuft (hier aufgrund der Gewichtskräfte).

te). Außerdem darf es nicht zu einer Durchdringung der Bauteile kommen. Die Punkte des Stützdreiecks können, wie in Bild 5 dargestellt, Eckpunkte der Aufstellflächen der nominalen Bauteile, virtuelle Punkte bei einer kreisförmigen Koppelfläche (siehe Bild 6) oder, bei Beachtung von Formabweichungen, auch Extrempunkte der Oberflächenform sein.

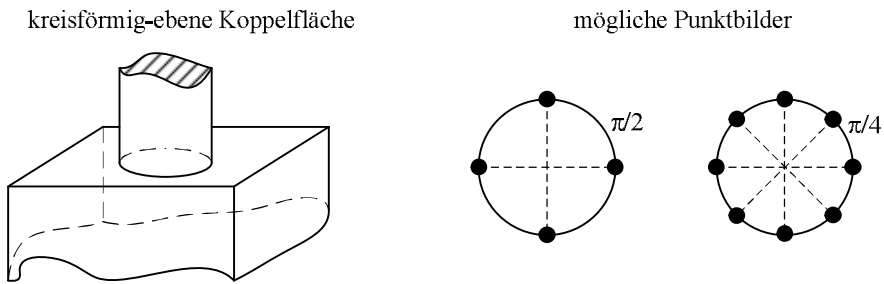


Bild 6: Punktbilder bei kreisförmiger ebener Koppelfläche

Sind die drei Punkte des Stützdreiecks bekannt, müssen die Bauteile im CAD-System neu ausgerichtet werden. Wie bereits oben geschildet, sind die Standardverknüpfungen der Bauteile im CAD (z.B. Ebene-Ebene) bei den abweichungsbehafteten Bauteilen nicht mehr gültig. Die Standardverknüpfungen müssen demnach aufgelöst und die Bauteile müssen über die ermittelten drei Punkte zueinander ausgerichtet werden. Bei der Neuausrichtung ist darauf zu achten, dass sich der Schwerpunkt der Bauteile und/oder auch die resultierende Kraftwirkungslinie verschieben und/oder drehen können. Die oben genannte Bedingung für die Stützdreiecke muss demnach erneut geprüft werden.

4 Umsetzung

Die entwickelten mathematischen Modelle wurden im CAD-System SolidWorks über die Programmierschnittstelle (API) als Prototyp umgesetzt. Der Demonstrator scannt beim Einlesen der Modelle, ob diese bereits attribuiert sind. Ist dies nicht der Fall, so wird für jede Fläche der entsprechende Satz an Attributen angelegt.

Die Toleranzinformationen werden über Attribute direkt mit den Flächen der Bauteile verknüpft (siehe Bild 7), sodass alle Informationen in einem Produktmodell gespeichert werden. Neben dem Anfügen der Toleranzinformationen an die vorhandene Geometrie und der Berechnung einfacher Toleranzketten verfügt der entwickelte Demonstrator auch über die Möglichkeit, die ab-

weichungsbehaftete Geometrie im Kontext des CAD-Modells darzustellen, derzeitigt aus Gründen der Leistungsfähigkeit für Extremwertbetrachtungen.

Ein entscheidender Bestandteil des Demonstrators ist die Nutzereingabe. Die vektoriellen Toleranzen lassen sich mathematisch sehr gut auswerten, jedoch entsprechen diese nicht der bekannten Vorstellung von Produktentwicklern. Daher besteht im Demonstrator die Möglichkeit, ISO-Toleranzen für die Lage zu vergeben. Diese werden gesteuert in vektorielle Toleranzen umgerechnet. Bei der Umrechnung der Toleranzen werden die vom Produktentwickler direkt am CAD-Modell vergebenen Maßtoleranzen mit einbezogen. Die Nutzereingabe ist geführt, damit die Umrechnung eindeutig wird. Ein entscheidender Grund hierfür ist, dass das ISO-Toleranzsystem bei Lagetoleranzen von einem Toleranzkegel (siehe Bild 8) ausgeht, der in eine Toleranzpyramide für das Vektorsystem umgerechnet werden muss [11]. Hierbei kann es zu einer Toleranzverschärfung kommen. In den Attributcontainern werden neben den vektoriellen Toleranzen auch die, durch den Nutzer vergebenen, ISO-Toleranzen sowie die Referenzelemente gespeichert, damit für eine spätere Modelländerung auf diese Werte wieder zurückgegriffen werden kann.

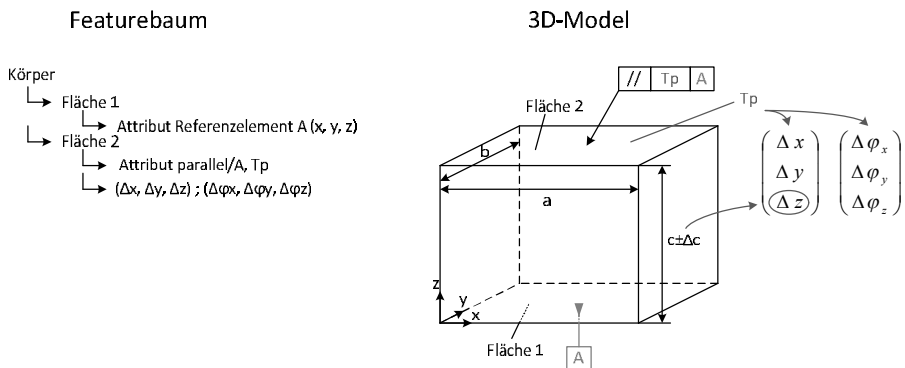


Bild 7: Repräsentation der vektoriellen Toleranzen im CAD-Modell

Bei der Toleranzanalyse ermittelt der Demonstrator den Toleranzpfad. Hierfür werden zunächst alle Flächenpaarungen über eine Kontaktanalyse bestimmt. Im aktuellen Demonstrator müssen die Flächentypen noch gleich sein (z.B. Ebene-Ebene-Paarung). Ausgehend von den ermittelten Flächenpaarungen und einer vorzugebenden Start- und Endfläche wird der Toleranzpfad berechnet. Dabei wird überprüft, ob der Toleranzpfad offen oder teilweise geschlossen ist. Ausgehend von dem Resultat werden die entsprechenden Methoden der Toleranzanalyse aufgerufen (siehe Bild 9).

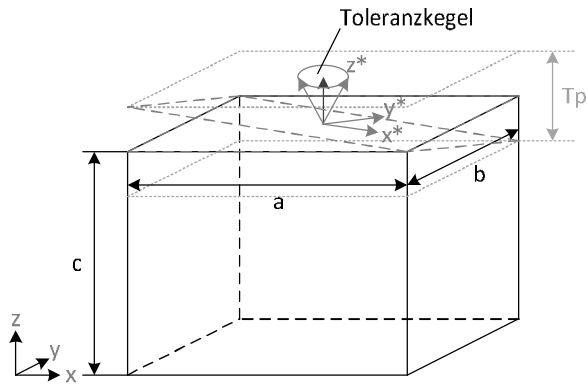


Bild 8: Toleranzkegel für eine abweichungsbehaftete Fläche eines Quaders

5 Anwendung

Anwendung finden die Untersuchungen zu geschlossenen Toleranzketten mittels des Demonstrators derzeit im Bereich der Präzisionsmesstechnik und bei der Optimierung von Abgasturbinen. Gerade im Bereich der Präzisionsmesstechnik liegen beim metrologischen Rahmen (siehe Bild 10) geschlossene Toleranzketten vor. Diese werden zum Erreichen der notwendigen Steifigkeit gebraucht. Soll die Toleranzkette zwischen der Spiegelecke und dem Messkopf untersucht werden, müssen die geschlossenen Toleranzketten berücksichtigt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Paper behandelt die Nutzung von vektoriellen Toleranzen, um direkt im CAD-System Untersuchungen auf Basis der vergebenen Toleranzen durchzuführen. Da in vielen technischen Produkten geschlossene oder partiell-geschlossene Toleranzketten vorliegen, wurde ein erster Ansatz für die Analyse dieser Ketten entwickelt. Das Konzept wurde im CAD-System SolidWorks als Prototyp umgesetzt. Der Demonstrator wird stetig weiterentwickelt, um die Einschränkungen in der Umsetzung zu reduzieren.

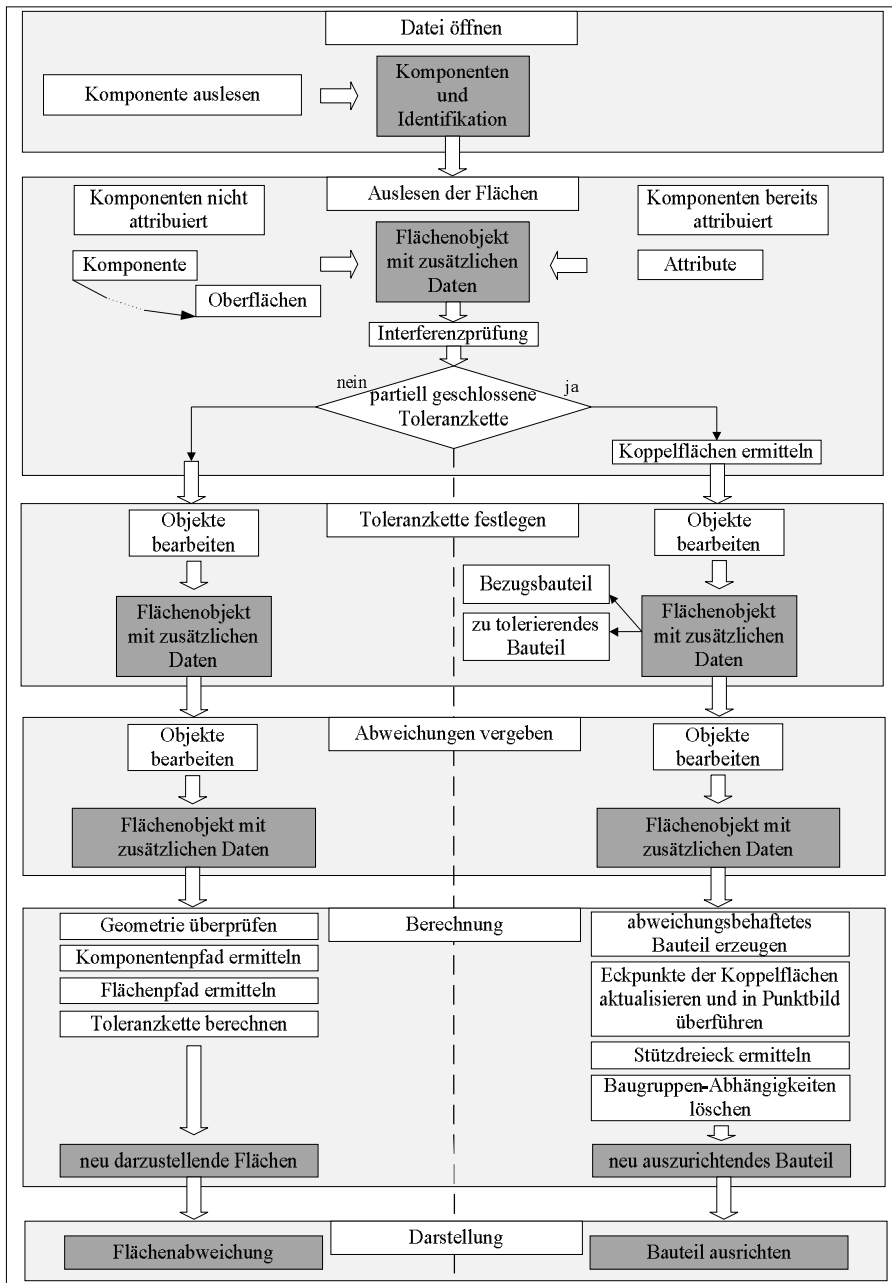


Bild 9: Ablaufplan des Demonstrator mit Unterscheidung hinsichtlich offene und geschlossene Toleranzketten

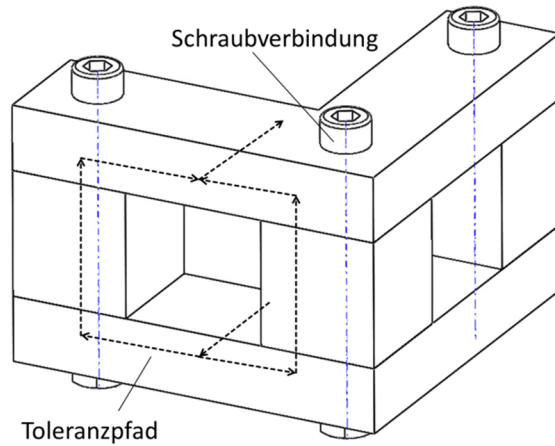


Bild 10: Vereinfachte Darstellung des metrologischen Rahmens der Nanomess- und Nanopositioniermaschine mit Kennzeichnung einer geschlossenen Toleranzkette

Weitere Entwicklungen beschäftigen sich mit den Auswirkungen externer Krafteinwirkungen und Formabweichungen auf die geschlossenen Toleranzketten. Außerdem sollen neben technologischen Toleranzen auch Abweichungen der Nominalgeometrie aufgrund thermischer und mechanischer Lasten berücksichtigt werden, damit der Produktentwickler die Gesamtauswirkungen untersuchen kann.

Danksagung

Die Autoren danken der Thüringer Aufbaubank, dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie und dem Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur für die Unterstützung.

Literatur

- [1] WARTZACK, S. ; MEERKAMM, H. ; STOCKINGER, A. ; STOLL, T. ; STUPPY, J. ; VOB, R. ; WALTER, M. ; WITTMANN, S.: *Lebenszyklusorientierte Toleranzsimulation zur funktionalen und ästhetischen Produktabsicherung*. In: *Konstruktion* (2011), Nr. 6, S. 63–74
- [2] ISO 16792: *Technical product documentation -- Digital product definition data practices*. 24.06.2010

-
- [3] STARK, R.: *Entwicklung eines mathematischen Toleranzmodells zur Integration in (3D-)CAD-Systeme*. Universität des Saarlandes. Dissertation. 1994
- [4] KRIMMEL, O. ; MARTINSEN, K.: Industrial application of Vectorial Tolerancing to improve clamping of forged workpieces in machining. In: *Global consistency of tolerances : Proceedings of the 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*. Dordrecht, London : Springer, 1999, S. 101-110
- [5] GAUNET, D.: 3D Functional Tolerancing & Annotation: CATIA tools for Geometrical Product Specification. In: *Geometric product specification and verification : Integration of functionality : selected conference papers of the 7th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, held at the École Normale Supérieure de Cachan, France, 24-25 April 2001*. Dordrecht, Boston : Kluwer Academic, 2003, S. 25–33
- [6] TURNER, J. Urbain: *Tolerances in computer-aided geometric design*. Ann Arbor, Mi : University Microfilms International, 1987
- [7] GEIS, A. ; HUSUNG, S. ; OBERÄNDER, A. ; WEBER, C. ; ADAM, J.: Use of vectorial tolerances for direct representation and analysis in CAD-systems. In: *13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 2014
- [8] BRITTEN, W. ; WEBER, C.: Transforming ISO 1101 Tolerances into Vectorial Tolerance Representations - A CAD-Based Approach. In: *Global consistency of tolerances : Proceedings of the 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*. Dordrecht, London : Springer, 1999, S. 93-100
- [9] ADAM, J.: *Aufbau eines Modells zur Analyse und Simulation geometrischer Toleranzen unter Berücksichtigung thermischer Lasten*. Technische Universität Ilmenau, Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion. Master-Thesis. 2012
- [10] OBERÄNDER, A.: *Aufbau eines vektoriiellen Modells zur Analyse und Simulation geometrischer Toleranzen für geschlossene Toleranzketten*. Technische Universität Ilmenau, Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion. Masterarbeit. 2013
- [11] BRITTEN, W.: *CAD-basierte Übersetzung geometrischer Toleranzen in vektorielle Darstellungen*. Universität des Saarlandes. Dissertation. 1999

Gestalten robuster und zuverlässiger Produkte mit der SMART-Methode

Dipl.-Ing. Stefan Kemmler
*Institut für Maschinenelemente IMA;
Universität Stuttgart*

Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
*Institut für Maschinenelemente IMA;
Universität Stuttgart*

Abstract

Product requirements grow with customer requirements. Thus, systems become more complex, but the demands for quality, reliability, safety and energy efficiency increase. In order to meet these requirements, the priority must be on the designing of robust and reliable products and their Design Parameters (DP) in the Product Development Process (PDP). SMART (Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing) is a method for the development of these robust and reliable products. In this paper, the holistic approach is shown by an elementary machine component. Therefore, the focus lies on the reliability prognosis and definition in the early state of the PDP.

Keywords: Robust Design, Taguchi Method, Axiomatic Design, Product Development Process (PDP)

1 Einleitung

Eine Methode zum Gestalten von robusten und zuverlässigen Produkten ist die SMART-Methode. Sie vereint Elemente aus der Robust Design Metho-

dik, wie Axiomatic Design (AD) [1] und die Taguchi Methode (TM) [2], zu einer ganzheitlichen Systemmethode, indem diese klassischen und etablierten Methoden insbesondere um die Zuverlässigkeitsaspekte ergänzt und erweitert werden.

Ein robustes Design liegt vor, wenn die Streuung des Design Parameters (DP) möglichst keinen Einfluss auf seine Funktionsanforderung (FR) hat. Der DP unterliegt einer konstanten Abweichung ΔDP , vergleiche Bild 1. Im Kontrast dazu erfährt die Streuung der FR eine signifikante Änderung zwischen den Einstellstufen DP_{1-} und DP_{1+} . Die Systemantwort $FR(DP_{1+})$ weist eine relativ geringe Streuung auf, während $FR(DP_{1-})$ eine erheblichere Abweichung aufweist. Auslöser dieses Verhaltens bilden nicht beeinflussbare Störgrößen aus der Umwelt oder der Produktion, denen das Produkt ausgesetzt ist.

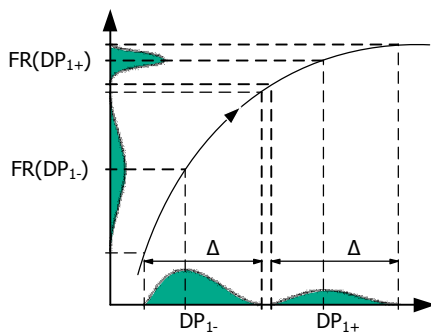


Bild 1: Robust Design einer Funktionsanforderungs-Verteilung für zwei Design-Varianten nach [2]

In diesem Paper soll die Vorgehensweise von SMART an einem elementaren Maschinenelement, der Druckfeder, im Konzept des Einlassventils eines Verbrennungsmotors vorgestellt werden. Dabei liegt der Fokus auf der Zuverlässigkeitsprognose und -bestimmung in der frühen Phase des PEP sowie die Empfehlung zur Anwendung der geeigneten Methode für komplexere Systeme, wie beispielsweise die Taguchi-Optimierung oder die Robust Design Optimization (RDO).

2 SMART - Robust Design und Zuverlässigkeit

SMART orientiert sich nach den vier Phasen des PEP (Planung, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung) nach der VDI Richtlinie 2221 [5]. Auf dieser Grundlage sind die drei Phasen (System Design (SD), Parameter Design (PD)

und Toleranz Design (TD)) nach Taguchi [3] aufgebaut und entsprechend integriert, vergleiche Bild 2. Besteht zu Beginn des PEP kein Entwurf, kann zur Lösungsfindung in die SD Phase eingestiegen werden. Hierbei wird die AD Methode angewendet, um die Komplexität des Entwurfs zu beschreiben. Ziel ist es in dieser Phase ein Konzept zu entwickeln, welches eine geringe Komplexität seiner Funktion und deren DP aufweist. Als DPs mit einer hohen Komplexität werden DPs bezeichnet, die mehrere FRs erfüllen [3].

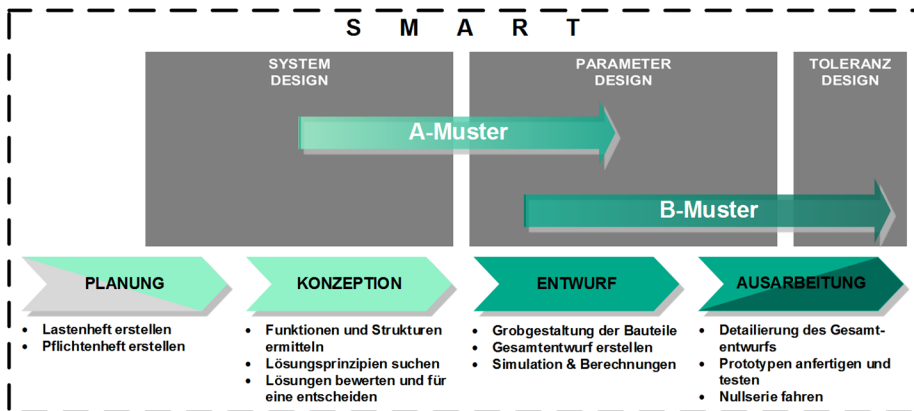


Bild 2: SMART - Einordnung in den Produktentwicklungsprozess (PEP) [4]

Im späteren PEP (Entwurf und Ausarbeitungsphase) existiert bereits ein Entwurf. Dieser kann in seiner Grundstruktur zwar nicht mehr geändert werden, aber hinsichtlich seiner Komplexität mit Hilfe von AD untersucht und gegebenenfalls Änderungen für ein robustes Design ermittelt werden. AD dient hier nicht nur zur Beschreibung der Komplexität eines Entwurfes, sondern auch als Systemanalyse. Zudem kann mit AD in diesem Entwicklungsschritt das P-Diagramm nach Taguchi [2] erstellt werden. SMART ermöglicht damit sowohl den Einstieg in den ersten Phasen (Planungs- und Konzeptphase – SD) als auch in den späteren Phasen (Entwurf und Ausarbeitungsphase – PD und TD). Falls die robusten DPs bestimmt sind, kann auch direkt in die TD Phase eingestiegen werden, vergleiche Bild 3.

Ein weiterer Aspekt bei der Vorgehensweise von SMART ist die prognostizierte Zuverlässigkeit am Ende der Phasen PD und TD. An diesen Stellen können erste Prognosen zum Ausfallverhalten des Designs getroffen werden. Nach der PD Phase sind die Parameter hinsichtlich der Robustheit des Designs optimiert und festgelegt. Hier können durch Kombination der verschiedenen Parameter Zufallsausfälle im Sinne von Funktionsausfällen, Fehlbedienungen,

Missbräuchen oder Wechselwirkungen einzelner Komponenten [6], bestimmt und simuliert werden. Zudem können in dieser frühen Phase Ermüdungsausfälle anhand eines simulativen oder realen Bestätigungsexperiments ermittelt werden. Je nach Validierungsgrad des Simulationsmodells kann die Zuverlässigkeitsprognose um deren Vertrauensbereiche erweitert und frühzeitig eine Empfehlung zur Versuchsstrategie gegeben werden. Dies wird durch das notwendige Bestätigungsexperiment der robusten DPs unterstützt. Bei diesem Experiment kann anhand etablierter Betriebsfestigkeitsanalysen, wie sie die FKM-Richtlinie oder Simulationssoftware beinhalten, beispielsweise ANSYS nCode Design Life, die Lebensdauer bestimmt werden. Dabei sollte diese erste Prognose als nominelle Lebensdauer gesehen werden und der geforderten Zuverlässigkeit entsprechen. Nachdem der robuste Designraum bestimmt ist, können Szenarien durchgeführt werden, die die Parameter-Streuung von äußeren Störgrößen auf innere Kontrollgrößen überführen. Dies ermöglicht dem Entwickler in der frühen Musterphase noch einschlägige Eingriffe im Design vorzunehmen. Die detailliertere Zuverlässigkeitsbestimmung in der frühen Phase des PEP kann zum Ende des TD vorgenommen werden. Zu diesem Musterstand sind die nötigen Toleranzen unter Berücksichtigung der Herstellungstoleranzen in Abhängigkeit des Kostenaufwands bekannt.

3 Anwendungsbeispiel „Druckfeder“

Der Gesamtablauf der SMART-Methode wird im Folgenden anhand einer Druckfeder, wie sie beispielsweise in einem Einlassventil eines Verbrennungsmotors, vergleiche Bild 4, zum Einsatz kommt, schrittweise erläutert. Alle Daten basieren auf rein fiktiven Größen und haben keine praxisbezogene Relevanz. Sie dienen rein der Veranschaulichung der Vorgehensweise. Als Ausgangspunkt wird angenommen, dass noch kein Entwurf vorhanden ist und somit die komplette SD Phase nach SMART durchlaufen wird. Bei einem Viertaktmotor findet der Ladungswechsel durch Öffnen und Schließen der Lufteinlass- beziehungsweise Abgasauslasskanäle statt. Das Ventil wird über einen Stößel durch die Nockenwelle geöffnet und durch eine Schraubenfeder wieder geschlossen [1]. Grundlegende Formeln für die nachfolgende Untersuchung der Schraubendruckfeder sind dabei die Federkraft F und die Schubspannung τ

$$F = R \cdot s = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D_m^3 \cdot n_f} \cdot s \quad \tau = \frac{G \cdot d}{\pi \cdot D_m^3 \cdot n_f} \cdot s$$

mit Schubmodul G [N/mm²], Drahtdurchmesser d [mm], mittlerer Windungsdurchmesser D_m [mm], federnde Windungen n_f [-] und Federweg s [mm].



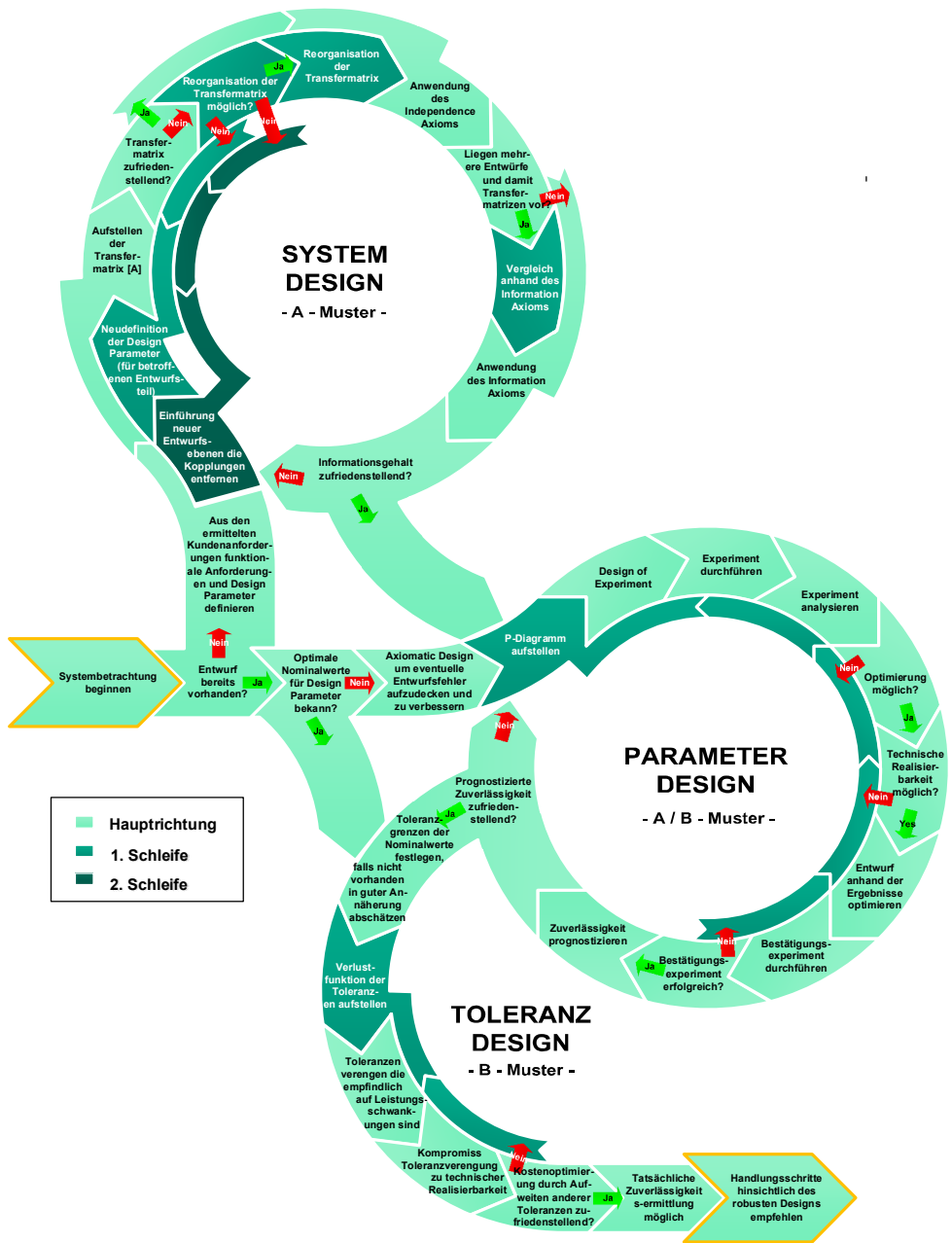


Bild 3: SMART - Gesamtübersicht [4]

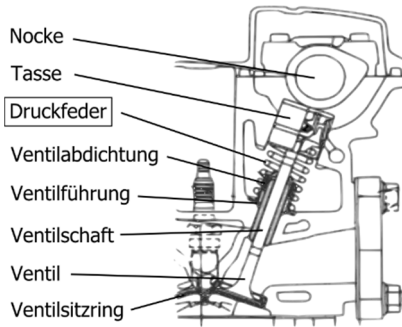


Bild 4: Tassenstößelventiltrieb nach [1]

3.1 SMART – System Design

Zu Beginn der SD Phase werden die Kundenanforderungen (CRs) im Stile eines Lastenheftes definiert. Im Fall der Ventildfeder wird eine konstante Rückstellkraft gewünscht, die bei einem definierten Federweg erbracht wird. Die Federkraft sollte möglichst wenig streuen, um eine robuste Arbeitsweise des Ventils und damit des Motors zu gewährleisten. Eine zu große Federkraft könnte den Ventilteller beschädigen, wohingegen eine zu geringe Federkraft den Arbeitsraum nicht korrekt abdichten würde. Außerdem sollte ein Einsatz sowohl beim Starten des Motors bei tieferen Temperaturen (-40 °C) als auch im Höchstleistungsbetrieb des Motors bezüglich der örtlichen Begebenheit des Ventilsitzes (250 °C) gewährleistet sein. Die Feder sollte zudem unabhängig von den Materialeigenschaften wiederholbar gefertigt werden können. Die zulässigen Spannungen dürfen nicht überschritten werden, um einen Federbruch zu vermeiden. Zuletzt sollte durch den Platzmangel im Verbrennungsmotor ein definiertes Bauvolumen nicht überschritten werden.

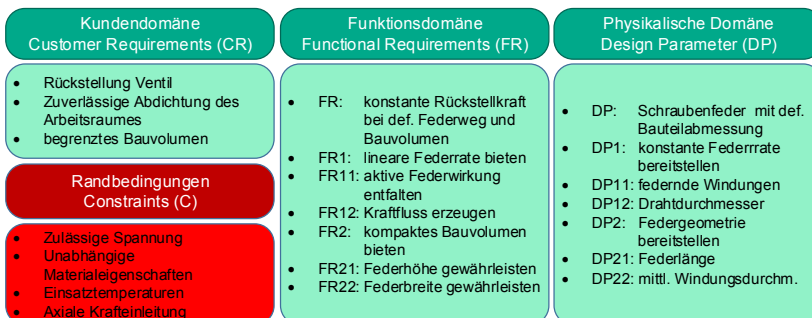


Bild 5: Die drei Domänen der Druckfeder nach AD

Aus diesen CRs können FRs, DPs und Randbedingungen (C) des Entwurfs abgeleitet werden, vergleiche Bild 5. Jede Vorgängerdomäne beschreibt dabei Anforderungen, die von der Nachfolgedomäne erfüllt werden. Mit Hilfe der „ZigZag-Methode“ nach Suh [2] kann der Bezug zwischen den Domänen hergestellt werden. Dabei definieren die FRs die DPs in der gleichen Hierarchieebene. Die Eigenschaften dieser DPs definieren wiederum die FRs der untergeordneten Ebene. Diese Zuordnung kann mit Hilfe einer Design-Matrix A veranschaulicht werden, vergleiche Bild 6.

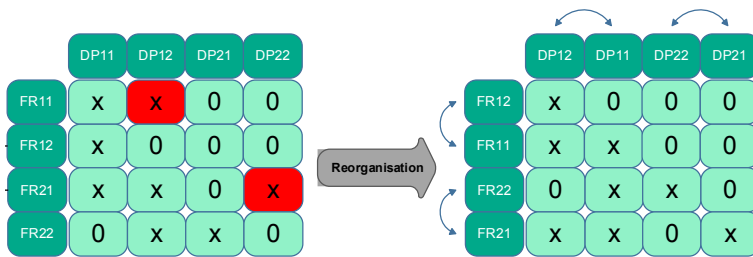


Bild 6: Design-Matrix A und deren Reorganisation

AD unterscheidet sich zwischen ungekoppeltem, entkoppeltem und gekoppeltem Entwurf. Im Fall der Schraubenfeder ergibt sich zunächst eine gekoppelte Designmatrix. Das Independence Axiom gibt vor, dass nur ein ungekoppeltes oder ein entkoppeltes Design eine optimale beziehungsweise akzeptable Lösung bildet. Eine Reorganisation der Matrix, durch Vertauschen der FR/DP- Paarungen, führt zu einem entkoppelten und damit akzeptablen Design. Für die Entkopplung der Designmatrix stehen neben der hier durchgeführten Reorganisation mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, auf die hier nicht näher eingegangen wird [11]. Die Berechnung des Informationsaxioms ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, da ein Entwurf vorliegt, dem keine Varianten gegenüber gestellt werden können. Die SD Phase ist an dieser Stelle abgeschlossen und es kann in die PD Phase vorangeschritten werden.

3.2 SMART – Parameter Design

Mit einem zufriedenstellenden Design und den gewonnenen Erkenntnissen aus dem AD wird im ersten Schritt der PD Phase ein P-Diagramm nach Taguchi erstellt, vergleiche Bild 7. Das P-Diagramm veranschaulicht dabei die Druckfeder als Modell, welches die Federkraft F in Abhängigkeit der unterschiedlichen Eingangsparameter darstellt. Eingangsgröße bildet in diesem Fall der konstante Federweg s . Die Steuergrößen beziehungsweise DPs wurden bereits im SD ermittelt und werden durch den Drahtdurchmesser d , den mitt-

leren Windungsdurchmesser D_m und die federnde Windungsanzahl n_f definiert. Durch ihre Variation kann eine optimale Produktwirkung erzielt werden. Die Materialeigenschaften repräsentiert durch das Schubmodul G sowie die Umgebungstemperatur T bilden Störgrößen des Systems.

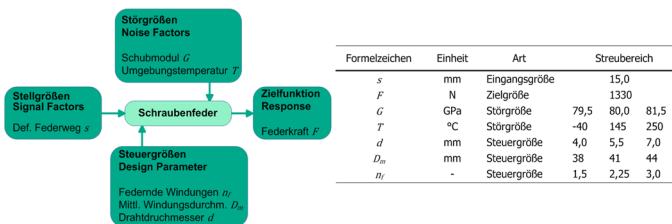


Bild 7: P-Diagramm und Einstellstufen der Druckfeder

Um optimale Werte für die DPs eines robusten Designs zu erhalten, wird ein DoE in Form eines Taguchi-Versuchsplanes durchgeführt. Der Versuchsplan besteht aus einem inneren Feld, welches die Variation der DPs beinhaltet und einem äußeren Feld, indem die Störgrößen variiert werden [3]. Aufgrund der geringen Anzahl an DPs und Störgrößen, wird sowohl das innere als auch das äußere Feld vollfaktoriell ausgeführt. Ein großer Vorteil von Taguchi-Versuchsplänen ist, dass äußeres und inneres Feld unabhängig voneinander gestaltet werden können. Somit kann gegebenenfalls der Simulationsaufwand auf ein nötiges Maß reduziert werden. Die Auswertung des Versuchsplanes beruht auf der Tatsache, dass die Einstellung auf den Sollwert einfacher zu erreichen ist, als die Minimierung der Streuung. Yang [7] beschreibt dazu geeignete Methoden. Für das Zielwertproblem werden als erstes die Einstellungen der signifikanten Faktoren ausgewählt, die das S/N -Verhältnis maximieren und folglich die Streuung minimieren. Damit die Zielfunktion den gewünschten Sollwert im Mittel erreicht, werden die signifikanten Faktoren ausgewählt und entsprechend eingestellt. Die Einstellungen der restlichen Faktoren erfolgt nach wirtschaftlichen Aspekten. Als Hilfsmittel stehen Methoden der statistischen Versuchsplanung wie beispielsweise die Mittelwertanalyse (ANOM) und die Varianzanalyse (ANOVA) zur Verfügung [12]. Abschließend wird ein Bestätigungsexperiment mit den optimalen Faktorstufen durchgeführt. Zum Abschluss der PD Phase kann eine erste Zuverlässigkeitsprognose ermittelt werden. An dieser Stelle wird die Berechnung der Betriebsfestigkeit nach der FKM-Richtlinie durchgeführt. Ziel ist dabei eine dauerfeste Auslegung ($LW > 2 \cdot 10^6$) der Feder. Das definierte Design erträgt allerdings nur eine Lastwechselspielzahl von 151.000 LW ($B_{2,5}$) bis zum Anriss und ist somit nicht zuverlässig. Es muss ein neues Design ausgewählt werden, welches einen Kompromiss aus Robustheit und Zielwert berücksichtigt. Nach erneuter Über-

prüfung der Lebensdauer mit den neu gefundenen Faktorstufen wird die Feder als dauerhaft eingestuft. Mit den optimierten DP's des Produkts kann nun in die TD Phase übergegangen werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der PD Phase

Nr.	F [N]	S/N [dB]	D_m [mm]	d [mm]	n_f [-]	LW [-]
1	1280	37,41	38,0	5,5	1,5	151.000
2	1358	37,27	44,0	7,0	3,0	dauerfest

Alternativ stehen in dieser Phase des PEP nur qualitative Zuverlässigkeitsmethoden, wie FMEA, FTA, ETA oder HAZOP zur Verfügung [9], da in dieser Phase keine Ausfalldaten aus Testläufen vorhanden sind.

3.3 SMART – Toleranz Design

Quality Loss Function (QLF)

Designpunkt	Toleranzen			Mittelwert μ [N]	Standardabweichung σ [-]	Verlust $L(\mu)$ [€/Stück]
	D_m [mm]	n_f [-]	d [mm]			
Design 2	$38 \pm 0,3$	$3 \pm 0,2$	$7 \pm 0,05$	1356	25,38	0,14
Design 3	$38 \pm 0,3$	$3 \pm 0,1$	$7 \pm 0,05$	1356	16,88	0,12
Nominal	-	-	-	1330	30,00	0,06

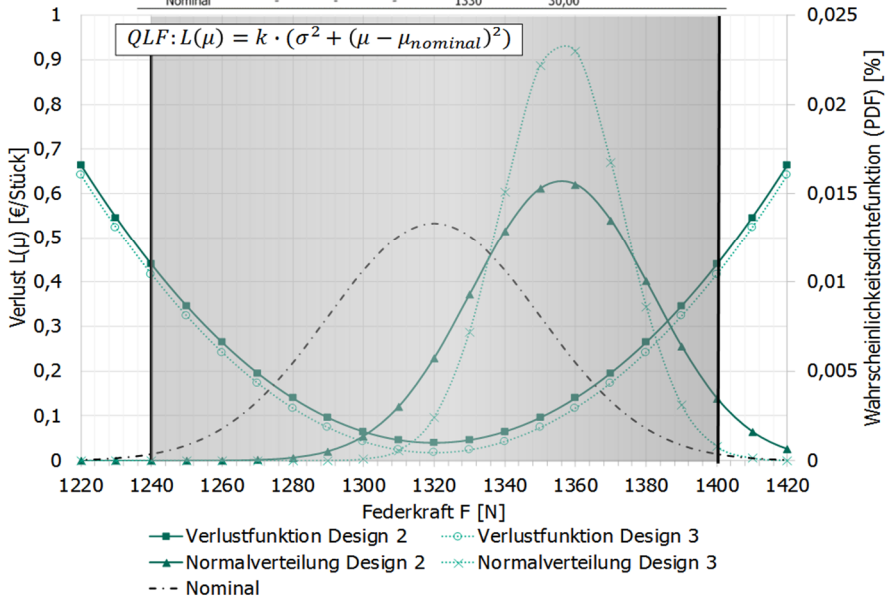


Bild 8: Ergebnisse zum Toleranz Design der Druckfeder

Im ersten Schritt wird die Quality Loss Function (QLF) definiert und welchen Kostenpunkt diese mit sich bringt. Im Beispiel der Druckfeder gilt eine Überschreitung der Toleranzgrenzen als Totalausfall und kostet den Hersteller 0,40 €/Stück. Demnach kann anhand der QLF $L(\mu)$ der Proportionalitätsfaktor k berechnet werden. Für einen beherrschten Prozess soll ein Prozessfähigkeitsindex $c_{pk} = 1,33$ (4 σ) angenommen werden. Damit lassen sich die Toleranzgrenzen der robusten Einstellstufen des Designs 2 bestimmen, vergleiche Bild 8. Die dargestellte Dichtefunktion (PDF) des Designs 2 zeigt eine deutliche Verbesserung der Streuung im Gegensatz zur PDF_{nominal}, allerdings auch eine deutliche Verschiebung des Mittelwerts und somit eine um 5 % außerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs liegende Zielfunktion. Im zweiten Schritt erfolgt eine Nachbesserung der Robustheitskriterien des signifikantesten Faktor für das S/N-Verhältnis n_f um $\pm 0,1$. Anhand eines Bestätigungsexperiments erreicht das neue Design 3 die festgelegte Spezifikation und zudem einen geringeren Verlust als Design 2, vergleiche QLF_{Design3}. Die Rückführung auf den Zielwert ist mit einem erhöhten Fertigungsaufwand verbunden und folglich in diesem Fall nicht zu empfehlen. Abschließend mit der TD Phase und somit mit SMART wird je nach Kapazität und gegeben Vorwissen die Prüfstrategie zur Ermittlung der Lebensdauer sowie der Zuverlässigkeit bestimmt.

4 Diskussion

Um robuste Produkte zu gestalten, wird nach der TM die Streuung um den Sollwert minimiert und erst anschließend, je nach Fertigungsaufwand, die Einstellung auf den Zielwert durchgeführt [7]. Nachteile sieht unter anderem Montgomery [10] in der umstrittenen Auswertung anhand des S/N Indikators, der mangelnden statistischen Effizienz sowie die Vermengung von Haupt- und Wechselwirkungen bei dem Einsatz von Teilfaktorplänen. Allerdings zeigt sich der Vorteil von Taguchi-Versuchsplänen im reduzierten Versuchs- und Simulationsaufwand. Zudem kann durch die individuelle Auswahl von innerem und äußerem Feld einerseits die Vermengung reduziert und andererseits ein Mehraufwand erspart werden, was für den Einsatz in der Praxis einen entscheidenden Vorteil darstellt. Wie im Beispiel gezeigt, beschränkt sich SMART nicht darauf, eine konkrete Anwendung der Optimierung (TM oder RDO) vorzugeben, sondern empfiehlt die geeignete Methode je nach Aufwand der Simulation und den gegebenen Prüfeinrichtungen. Auch eine alleinige Umsetzung von RD mit Hilfe von AD ist bei heutigen komplexen Produkten sehr aufwendig. SMART wendet die Vorteile der funktionalen Systembeschreibung mit AD als Systemanalyse an. Dadurch kann neben einem frühen Design-Entwurf auch ein verbessertes Funktionsverständnis geschaffen werden und ergänzt somit die TM, deren Schwerpunkt eher im PD liegt. SMART gibt eine Empfehlung, welche chronologische Kombination der RD Methoden zielführend ist.

AD sollte als Systemanalyse sowie zur Entkopplung komplexer Designs und zum Erstellen des P-Diagramms in der SD Phase oder bei einem späteren Einstieg mit der Methode im PEP, in PD angewendet werden. TM und RDO werden in der PD und TD Phase von SMART angesetzt. In der PD Phase soll die mittels RDO durchgeführte Sensitivitätsanalyse für der Evaluierung der Wechselwirkungen und der Reduzierung von umfangreichen Simulationsmodellen dienen. Die Versuchsplanung nach Taguchi wird im PD mit unterschiedlichen inneren und äußeren Feldern sowie RDO mittels dynamischem Sampling für die Designtoleranzbestimmung im TD angewendet. Ein zu optimierender Punkt ist der bislang nicht berücksichtigte Aspekt der Herstellkosten, der im TD mehr in den Fokus gerückt werden sollte.

5 Zusammenfassung

SMART ist eine adaptive Methode zur Gestaltung von robusten und zuverlässigen Produkten und kann zu jedem Zeitpunkt des PEP angewendet werden. Die praktische Anwendbarkeit der SMART-Methode zeigt sich bislang erfolgreich an einem komplexeren Produkt in einem Industrieprojekt. Hier wird die Anwendung der SMART-Methode am Beispiel einer Druckfeder durchgeführt und dient ausschließlich zur Erklärung und Veranschaulichung der Methode. Die Vorgehensweise in diesem Anwendungsbeispiel stützt sich größtenteils auf die Vorgehensweise nach Taguchi. Diese wird durch die RD Methode AD erweitert sowie dem PEP angeglichen und um die Musterphasen ergänzt. Zudem wird der Zuverlässigkeitsaspekt früh integriert. Mit AD wird eine Zuverlässigkeitsanalyse in die TM integriert, die sowohl komplexe Funktionsstrukturen als auch funktionale Systemstrukturen analysiert. Es gibt bislang Forschungsarbeiten, vergleiche Hasenkamp [8], die sich mit der Implementierung von RD Methoden in der Praxis beschäftigen. Allerdings sind einige Unterschiede zur SMART-Methode erkennbar. SMART wird zeitlich genauer in den PEP eingeordnet und um die Musterphasen erweitert. Außerdem werden die eingesetzten Methoden AD sowie die drei Phasen nach Taguchi (SD, PD und TD Phase) gekoppelt und detailliert beschrieben. Schwerpunkt zukünftiger Forschungsarbeiten zur SMART-Methode bildet die Vertiefung des Zuverlässigkeitsaspekts. Dazu wird das Thema virtuelle Lebensdauerermittlung (VLE) [in Druck] näher ausgearbeitet und direkt in die Methode implementiert. Grundlage der bisherigen Lebensdauerermittlung von Bauteilen bilden Bauteil-Wöhlerlinien, bei denen die unterschiedlichen Eingangsstreuungen und deren Vertrauensbereiche nicht ganzheitlich berücksichtigt oder sogar vernachlässigt werden. Mit Hilfe der neuen Methode können zu einem frühen Design-Stand diese Aspekte berücksichtigt und das Ausfallverhalten beschrieben werden, beispielsweise eine nominelle Lebensdauer am Ende der PD Phase.

Danksagung

Die Autoren möchten Martin Dazer und Dominik Herre für die intensive Zusammenarbeit und ihre konstruktiven Anregungen und Vorschläge danken.

Literatur

- [1] Basshuysen, R.; Schäfer, F.: "Handbuch Verbrennungsmotor", Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 2010.
- [2] Suh, N.: "Axiomatic Design – Advances and Applications", Oxford University Press, New York, 2001.
- [3] Taguchi, G. et al.: "Taguchi's Quality Engineering Handbook", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.
- [4] Kemmler, S., Bertsche, B.: "Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing (SMART)", ISO RD 2014, Kopenhagen, 2014.
- [5] VDI – Verein Deutscher Ingenieure: "VDI Richtlinie 2221", Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- [6] Bertsche, B.; Lechner, G.: "Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau", Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [7] Yang, G.: „Life Cycle Reliability Engineering“, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- [8] Hasenkamp, T.: „Engineering Design for Six Sigma – A Systematic Approach“, John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
- [9] Eifler, T., Ebro, M., Howard, T.J.: „A Classification of the industrial relevance of Robust Design Methods“, ICED 13, Seoul, 2013.
- [10] Montgomery, D.C.: „Design and Analysis of Experiments“, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [11] Benavides, E.M., Rodríguez L.G.: "Extended Algorithm for Design-Matrix Reorganisation", ICAD2011, Daejeon, 2011.
- [12] Ross, P.J.: "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw-Hill, New York, 1988.

Toleranz-Kosten-Optimierung bewegter Systeme mittels Partikelschwarm-Optimierung

Michael Walter, Tobias Constantin Spruegel, Tim Weikert, Vincent Mann, Marcus Romeis und Sandro Wartzack

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Both random and systematic deviations of manufactured parts as well as variation in manufacturing processes may have significant effects on the kinematic behavior of a mechanism. Hence, the product developer has to define both appropriate tolerances of the single parts and appropriate precision requirements of the manufacturing processes to ensure the mechanism's functionality while causing low manufacturing costs. This paper presents an approach on the statistical tolerance-cost-optimization of a time-dependent system taking into account random and systematic deviations as well as the imprecision of corresponding manufacturing processes. The practical use of the approach is shown in a case study of a non-ideal cross-arm window regulator.

Keywords: tolerance optimization, mechanism, tolerance-cost-relations, particle swarm optimization

1 Einleitung

Maßliche und geometrische Abweichungen sowie deren Auswirkungen auf das Produkt sind in allen Phasen der Produktentstehung allgegenwärtig [1]. Bereits während der Fertigung sind Abweichungen aufgrund der Unerreichbarkeit einer ideal maßhaltigen Fertigung unvermeidbar. Die anschließende

Montage dieser abweichungsbehafteten Einzelteile führt somit zu einem Produkt, dessen Verhalten im Betrieb vom angestrebten Ideal abweicht [2]. Die Konsequenzen sind mitunter erheblich: So geht die wohlwollende Vergabe großer Toleranzwerte mit einem Anstieg der Ausschussrate bzw. der erforderlichen Nacharbeit einher. Hingegen führt die konservative Festlegung sogenannter „Angsttoleranzen“ zwar zu geringeren Abweichungen der Einzelteile und damit des Produktes im Betrieb, bedingt jedoch erhebliche finanzielle Aufwände, um den gestiegenen Qualitätsanforderungen gerecht zu werden.

Der Produktentwickler steht somit vor der Aufgabe, bereits frühzeitig die unvermeidlichen Abweichungen der Einzelteile durch die optimale Vergabe von Toleranzen so zu begrenzen, dass sowohl die Funktionserfüllung der hergestellten Produkte sichergestellt, als auch deren wirtschaftliche Herstellung gegeben ist [3]. Hierfür finden die statistische Toleranzanalyse und -synthese in der Produktentwicklung Anwendung. Bestehende Methoden und Werkzeuge erlauben jedoch nur bedingt die Betrachtung bewegter und damit zeitabhängiger Systeme. Zudem stellt sich dem Produktentwickler in dessen täglicher Arbeit wesentlich häufiger die Aufgabe einer Toleranzsynthese, also die gezielte Vergabe von Toleranzen an den Einzelteilen, als die einer Toleranzanalyse. Die Notwendigkeit einer gezielten Erweiterung bestehender Methoden der statistischen Toleranzsynthese für die Betrachtung abweichungsbehafteter bewegter Systeme ist somit klar ersichtlich.

Der vorliegende Beitrag dieser Veröffentlichung zum gegenwärtigen Stand der Forschung besteht in der Entwicklung und Diskussion eines Ansatzes zur statistischen Toleranz-Kosten-Optimierung eines abweichungsbehafteten bewegten Systems. Im Fokus stehen hierbei eine abgesicherte Funktionserfüllung des resultierenden Produktes sowie die kostengünstige Herstellung der Einzelteile. Die erforderlichen Maßnahmen zum Einsatz der globalen Optimierung bei besagtem Toleranzoptimierungs-Problem werden im vorliegenden Beitrag dargestellt und die praktische Anwendung der entwickelten statistischen Toleranz-Kosten-Optimierung am Beispiel eines abweichungsbehafteten Kreuzarmfensterhebers eines PKWs gezeigt.

2 Toleranzsynthese und -optimierung

Jüngst bezeichnete CAMPATELLI die Toleranzsynthese als „eines der geeignetsten Wege, um die Kosten maschinell gefertigter Bauteile zu reduzieren“ [4]. Die Toleranzsynthese dient dazu, die tolerierte Streuung eines funktional relevanten Schließmaßes eines Produktes geeignet auf dessen Komponenten zu allokalieren. Dies erfolgt zumeist gemäß definierter Allokationsschemata unter Berücksichtigung der jeweiligen Fertigungskosten. Hingegen nutzt die

Toleranzoptimierung Ansätze der Optimierung, um die optimale Allokation der Toleranzen der divergierenden Anforderungen zu bestimmen.

Bereits seit Beginn der Arbeiten auf dem Gebiet der Toleranzoptimierung findet insbesondere das heuristische „Simulated Annealing“-Verfahren Anwendung, um sowohl Toleranzen gezielt aufzuweiten bzw. einzuschränken [5] als auch um unter mehreren geeigneten Fertigungsverfahren das jeweils optimale Verfahren für die Toleranzen zu ermitteln [6]. Darüber hinaus werden neben den Toleranzbreiten auch mögliche Mittelwertverschiebungen der Toleranzmittenmaße in die Toleranzoptimierung mit einbezogen [7].

Die Toleranzsynthese zeitabhängiger Mechanismen ist hingegen selten Gegenstand von Forschungsarbeiten. Darüber hinaus finden die Auswirkungen verschiedener Arten von Abweichungen in diesen Arbeiten kaum Beachtung. In [8] ist der iterative Toleranzsyntheseprozess am Beispiel eines abweichungsbehafteten Kurbeltriebs gezeigt. Jedoch werden weder eine zeitabhängige Schließmaßgleichung entwickelt noch betriebsabhängige Abweichungen berücksichtigt. Im Gegensatz zu [8] nutzt die Toleranzoptimierung in [9] zeitabhängige Schließmaßgleichungen und integriert neben fertigungsbedingten Abweichungen auch betriebsabhängige Abweichungen.

3 Toleranz-Kosten-Optimierung bewegter Systeme

Die entwickelte Toleranz-Kosten-Optimierung dient dazu, die optimale Tolerierung der Einzelteile eines bewegten Systems zu bestimmen, die mit möglichst geringen Fertigungskosten K_{total} einhergehen.

3.1 Vorgehensweise

Zunächst sind die vollständige Beschreibung des technischen Systems, aller relevanten Einzelteile und die Festlegung der betrachteten Toleranzen erforderlich. Anschließend sind die funktionalen Anforderungen an das System zu definieren. Diese umfassen u. a. die untere und obere Spezifikationsgrenzen (USG und OSG) des funktionsrelevanten Schließmaßes $SM(t)$ sowie den Anteil c aller hergestellten Mechanismen, welche die gegebenen Spezifikationsgrenzen verletzen dürfen. Der Wert c entspricht somit der maximal zulässigen Ausschussrate des Systems während der gesamten Betriebsdauer T_{total} . Das Optimierungsproblem kann somit wie folgt formuliert werden [10]:

$$\min(K_{total}) \tag{1}$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\int_{USG}^{OSG} \rho[SM(t, x)] dx \geq 1 - c \quad \text{fuer } t \in [0; T_{total}] \quad (2)$$

$$T_i > 0 \quad (3)$$

Hierbei entsprechen die resultierenden Fertigungskosten des Mechanismus K_{total} der Summe der Fertigungskosten, welche zur Einhaltung jeder einzelnen der vergebenen n Toleranzen T_i erforderlich sind sowie der finanziellen Aufwände, die mit einer möglichen Mittelwertverschiebung der Toleranzmittenwerte $MS(T_i)$, gewichtet durch m_i , einhergehen:

$$K_{total} = \sum_{i=1}^n K(T_i) + m_i \cdot MS(T_i) \quad (4)$$

Das vorliegende Toleranz-Kosten-Optimierungsproblem ist nun im nächsten Schritt mittels geeigneter Optimierungsalgorithmen zu lösen. Dieser Algorithmus muss aufgrund der Schließmaßgleichung auch für nicht-lineare Nebenbedingungen anwendbar sein. Zudem ist generell ein globales Optimierungsverfahren einem lokalen Ansatz vorzuziehen, da mit lokalen Verfahren nicht zwingend die wirklich beste Lösung und damit die kostengünstigste Tolerierung des Mechanismus ermittelt werden kann. Im Rahmen dieses Beitrags soll hierzu die Partikelschwarm-Optimierung Anwendung finden.

3.2 Partikelschwarm-Optimierung

Die Partikelschwarm-Optimierung (PSO) ist ein numerisches Verfahren, welches durch Imitation des Sozialverhaltens natürlicher Kollektive, wie Vögel- und Fischeschwärme, die globale optimale Lösung für ein vorliegendes Optimierungsproblem identifiziert [11]. Der Algorithmus verteilt eine zuvor definierte Anzahl an Partikeln (die sog. Population) innerhalb des Suchraums. Der Suchraum wird hierbei durch die zu optimierenden Größen (Toleranzen T_i und Mittelwertverschiebungen $MS(T_i)$) aufgespannt. Innerhalb des Suchraums bewegen sich die Partikel in Richtung des sogenannten Führungspartikels. Die Rolle des Führungspartikels wird hierbei bei jeder Iteration neu vergeben und führt somit oftmals zu harschen Änderungen in der Bewegung des gesamten Partikelschwarms. Die sukzessive Iteration der Position x_j^{k+1} und Geschwindigkeit v_j^{k+1} eines Partikels beruht hierbei sowohl auf Informationen des jeweiligen Partikels als auch der verbleibenden Schwarmmitglieder der k -ten Iteration. Es gilt somit für die Position des j -ten Partikel innerhalb des Suchraums in der $(k+1)$ -ten Iteration: [10]

$$x_j^{k+1} = x_j^k + v_j^k \quad (5)$$

Bild 1 verdeutlicht die Bewegung eines Partikelschwarms (Population: 4) innerhalb eines zwei dimensional Suchraums während zwei Iterationen.

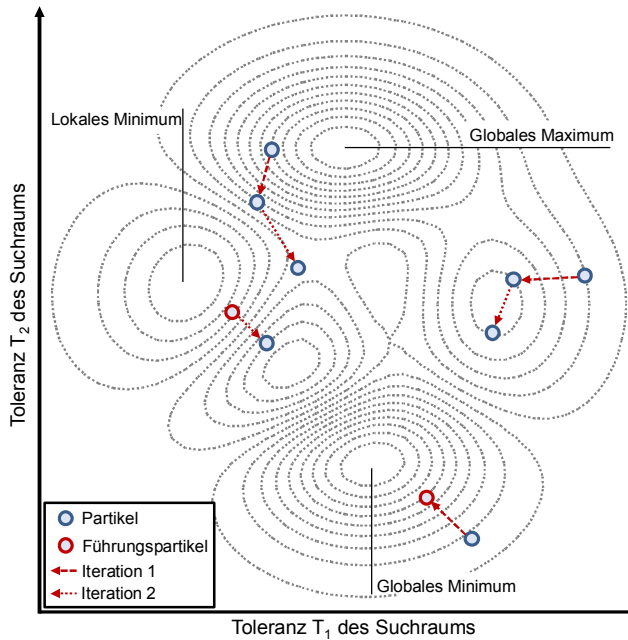


Bild 1: Bewegung der Partikel eines Schwarms in einem zwei dimensional Suchraum während zwei Iterationen einer PSO nach [10]

4 Toleranz-Kosten-Optimierung eines Kreuzarmfensterhebers

Im Folgenden wird die praktische Anwendung der Toleranz-Kosten-Optimierung am Beispiel eines abweichungsbehafteten Kreuzarm-Fensterhebers aus [12] verdeutlicht und zugleich deren Nutzen im Rahmen der rechnerunterstützten Produktentwicklung belegt.

4.1 Demonstrator: Kreuzarm-Fensterheber

Der Kreuzarm-Fensterheber [12] dient dazu, die Seitenscheibe der Tür eines PKWs innerhalb von $T_{\text{total}} = 3 \text{ s}$ zu öffnen bzw. zu schließen. Jedoch unterliegt der Kreuzarm-Fensterheber Abweichungen, die dessen Betriebsverhalten und damit auch dessen Funktionserfüllung beeinflussen [12]:

- Zufällige Fertigungsabweichungen der Einzelteile (Positionsabweichungen der Gelenkpunkte P_1 und Z und die Maßabweichung der Gelenklänge des inneren Arms l_3) [3, 13]
- Systematische Abweichungen der Einzelteile (fertigungsbedingte Schwindung des inneren Arms aus GFK aufgrund des Spritzgießprozesses und elastische Deformation des inneren Arms während des Betriebs) [3, 12]
- Wechselwirkungen zwischen den Abweichungen (Variation der Schwindung und damit auch der elast. Deformation des Arms aufgrund von Schwankungen der Prozesskenngrößen des Spritzgießprozesses [14]) [3]

Diese Abweichungen (Tabelle 1) sowie deren Wechselwirkungen führen dazu, dass während der Bewegung des Fensterhebers die Seitenscheibe in deren seitlichen Gleitführungen um einen Winkel α verkippt [12]. Jedoch muss auch trotz des Verkippens der Seitenscheibe ein ausreichender Überlapp der Seitenscheibe mit der oberen Scheibendichtung sichergestellt sein, um einerseits die Dichtheit sicherzustellen und andererseits störende Windgeräusche während der Fahrt zu reduzieren. Um diesen Forderungen zu entsprechen, muss der Verkippwinkel α zu jedem Zeitpunkt der Bewegung stets zwischen der unteren Spezifikationsgrenze $USG = -0,1^\circ$ und der oberen Spezifikationsgrenze $OSG = 0^\circ$ liegen. Der Fensterheber-Mechanismus sowie die auftretenden Abweichungen der Einzelteile sind in Bild 2 gezeigt.

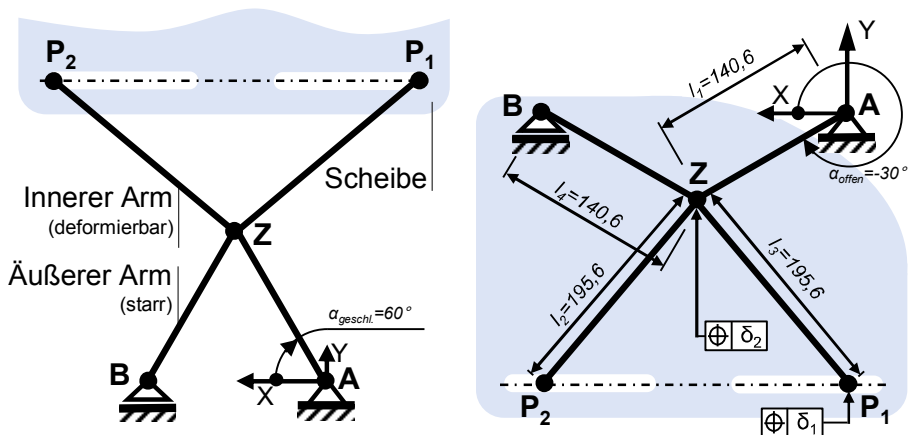


Bild 2: Kreuzarm-Fensterheber in den beiden Extremstellungen „geschlossene Seitenscheibe“ (links) und „geöffnete Seitenscheibe“ (rechts) nach [12]

Tabelle 1: Ursprüngliche Tolerierung

Bezeichnung		Nennwert	Toleranz	Verteilung
Gelenklänge l_3		195,6 mm	$\pm 0,05$ mm	gleichverteilt
Positionstoleranz δ_1		-	0,1 mm	gleichverteilt
Positionstoleranz δ_1		-	0,2 mm	gleichverteilt
Spritzgießprozess	Füllrate in cm^3/s	20	$T_{\text{Proz}} = \pm 2,5 \%$	normalverteilt
	Werkzeugtemp. in $^{\circ}\text{C}$	85		normalverteilt
	Schmelzetemp. in $^{\circ}\text{C}$	300		normalverteilt
	Nachdruck in %	40		normalverteilt
	Nachdruckzeit in s	19		normalverteilt
	Kühlzeit in s	25		normalverteilt

Um die Auswirkungen der Toleranzen auf den Verkippwinkel der Scheibe α zu evaluieren, ist zunächst eine Toleranzanalyse des Fensterhebers erforderlich. Hierzu ist insbesondere die sog. Schließmaßgleichung zur Beschreibung des mathematischen Zusammenhangs zwischen dem zeitabhängigen Verkippwinkel α und den auftretenden Abweichungen [12] erforderlich:

$$\alpha(t) = f(t, l_3, \delta_1, \delta_2, \text{Deformation}, \text{Fuellrate}, \text{Werkzeugtemp}, \dots) \quad (6)$$

Anschließend kann für eine definierte Anzahl an virtuell generierten abweichungsbehafteten Mechanismen (üblicherweise > 10.000) der jeweils zugehörige Verlauf des Verkippwinkels während des Schließvorgangs ermittelt werden. Auf Basis dieser Verläufe kann abschließend der in Bild 3 dargestellte, zeitliche Verlauf der resultierenden Häufigkeitsverteilung des Schließmaßes (Verkippwinkel) während des Schließens der Seitenscheibe abgeleitet werden. Die Vorgehensweise bei der statistischen Toleranzanalyse des abweichungsbehafteten Fensterhebers ist in [12] detailliert erläutert.

Der zeitliche Schließmaßverlauf macht deutlich, dass aufgrund des nichtgleichmäßig übersetzenden Bewegungsverhaltens des Fensterhebers die Auswirkungen der Abweichungen auf den Verkippwinkel über die Zeit erheblich variieren. So ist z. B. bei halb geschlossenem Fenster bei $t = 1,5$ s die Streuung signifikant geringer als zu Beginn ($t = 0$ s) und am Ende der Bewegung ($t = 3$ s). Darüber hinaus variiert der Mittelwert der Häufigkeitsverteilung

lung während der Bewegung. Dies folgt aus den systematischen Abweichungen und wird als zeitabhängige Mittelwertverschiebung bezeichnet.

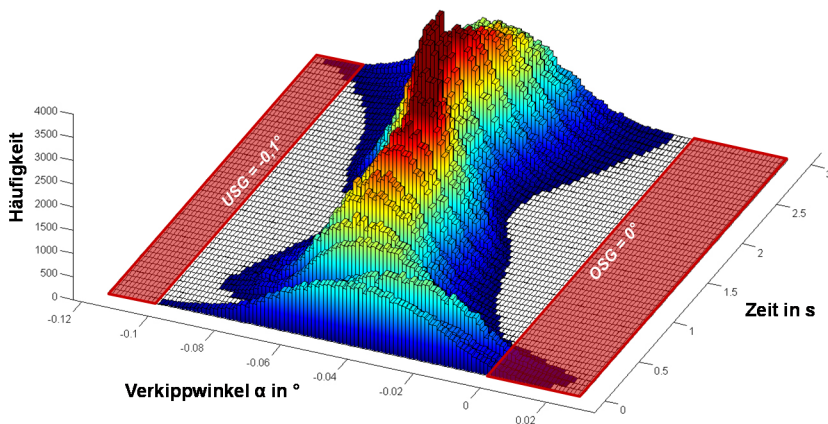


Bild 3: Verlauf der Häufigkeitsverteilung des Verkippwinkels $\alpha(t)$ während des Schließens der Seitenscheibe innerhalb von 3 Sekunden; Verletzung der oberen Spezifikationsgrenze OSG führt zu unzulässig hoher Ausschussrate

Der Produktentwickler steht nun vor der Aufgabe, die Tolerierung der Einzelteilabweichungen so einzuschränken bzw. aufzuweiten, dass die Häufigkeitsverteilung des Verkippwinkels die gegebenen Spezifikationsgrenzen nicht verletzt und zugleich mit möglichst geringen Fertigungskosten einhergeht. In Anbetracht der Komplexität des Problems würde der Produktentwickler hier mit immensum Aufwand iterativ die Tolerierung des Fensterhebers verbessern. In diesem Beitrag findet hierfür jedoch die Toleranz-Kosten-Optimierung Anwendung. Diese erlaubt die einfache und schnelle Lösung des Optimierungsproblems mittels der Partikelschwarm-Optimierung gemäß Kapitel 3.

4.2 Toleranz-Kosten-Optimierung des Fensterhebers

Die Toleranz-Kosten-Optimierung erfordert neben der Schließmaßgleichung insbesondere die Toleranz-Kosten-Relationen der betrachteten Toleranzen. Diese werden im Folgenden nach SUTHERLAND's Model gemäß

$$K(T_i) = K_{fix,i} + \frac{K_{ind,i}}{T_i^k} \quad (7)$$

formuliert [15]. Hierbei entsprechen $K_{fix,i}$ den Fixkosten und $K_{ind,i}$ den individuellen Kosten der i -ten Toleranz. Bild 4 zeigt die Toleranz-Kosten-Kurven.

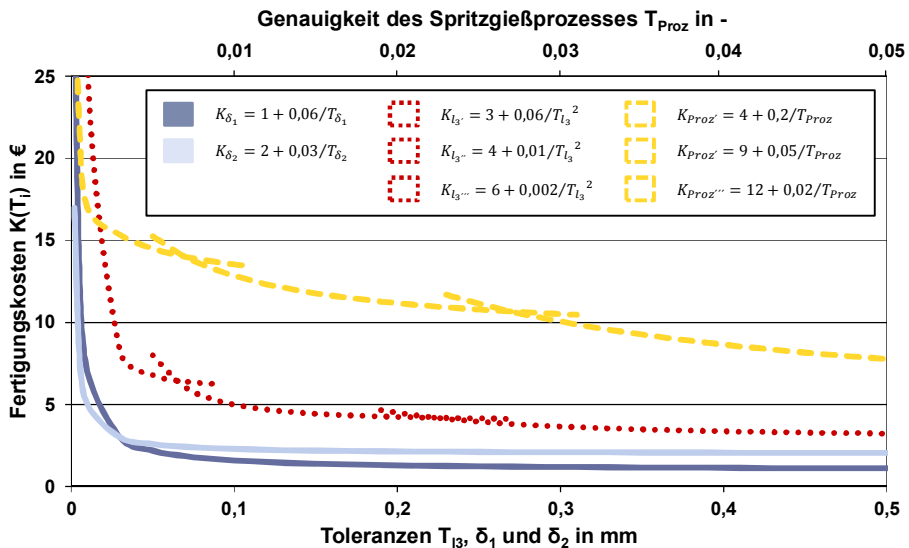


Bild 4: Toleranz-Kosten-Kurven von i_3 , δ_1 , δ_2 sowie der Genauigkeit des Spritzgießprozesses des inneren Arms aus GFK

Tabelle 2: Einstellungen der PSO Toolbox analog der Anwendung in [10]

Bezeichnung	Wert
Population des Schwarms / Anzahl der Partikel	20
Tolerierte Verletzung der Zielfunktion in €	1e-3
Tolerierte Verletzung der Nebenfunktion in -	1e-6
Max. Anzahl "identischer" Generationen (bzgl. der Erfüllung von Zielfunktion und Nebenbedingung) bevor PSO stoppt	100

Somit kann nun das Optimierungsproblem (mit $c = 0,62\%$ ($\triangleq \pm 4\sigma$); $m_i = 0$) gemäß Kapitel 3 formuliert und anschließend anhand der Partikelschwarm-Optimierung gelöst werden. Tabelle 2 stellt die spezifischen Einstellungen des Optimierungsalgorithmus zusammen.

Das Optimierungsproblem konnte durch die PSO erfolgreich gelöst werden, da die Verletzung von Zielfunktion und Nebenbedingung für 100 aufeinanderfolgende Generationen unter den Akzeptanzgrenzen lagen. Die optimierte Tolerierung ist in Tabelle 3 der ursprünglichen Tolerierung gegenübergestellt. Den zugehörigen Schließmaßverlauf des Verkippwinkels zeigt Bild 5.

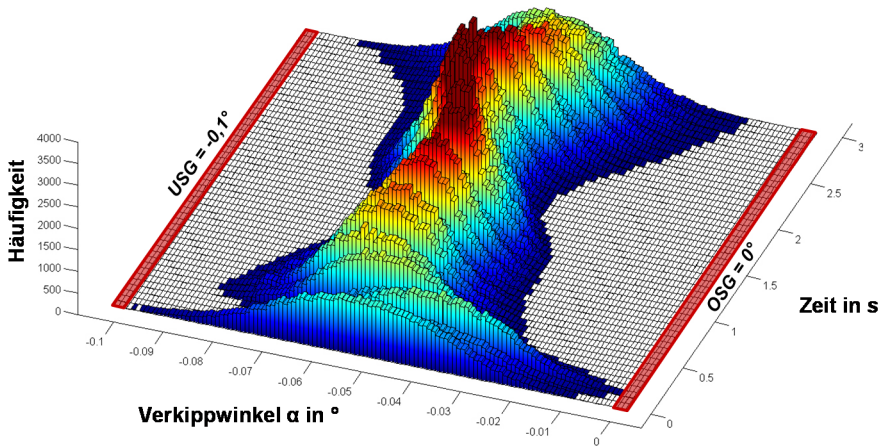


Bild 5: Häufigkeitsverteilung des Verkippwinkels für die optimierte Tolerierung

Tabelle 3: Gegenüberstellung: Ursprüngliche und optimierte Tolerierung

Bezeichnung		Nennwert (vorher)	Toleranz (vorher)	Nennwert (optim.)	Toleranz (optim.)
Gelenklänge l_3 in mm		195,6	$\pm 0,05$	195,552	$\pm 0,075$
Positionstoleranz δ_1		-	0,1 mm	-	0,071 mm
Positionstoleranz δ_2		-	0,2 mm	-	0,077 mm
Spritzgießprozess	Füllrate in cm^3/s	20	$\pm 2,5 \%$	19,838	$\pm 2,49 \%$
	Werkzeugt. in $^\circ\text{C}$	85		84,668	
	Schmelzet. in $^\circ\text{C}$	300		296,493	
	Nachdruck in %	40		40,276	
	Nachdruckzeit in s	19		18,743	
	Kühlzeit in s	25		24,929	
Resultierende Kosten		<i>Vorher: 19,50 €</i>		<i>Optimiert: 16,68 €</i>	

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurde die statistische Toleranz-Kosten-Optimierung eines zeitabhängigen bewegten Systems mittels des globalen

Optimierungsansatzes der Partikelschwarm-Optimierung diskutiert. Der Produktentwickler ist somit in der Lage, die optimale Tolerierung sowohl der Einzelteile des Systems als auch die Präzision der zugehörigen Fertigungsprozesse vor dem Hintergrund divergierender Anforderungen (weite Toleranzen, um Kosten zu reduzieren; enge Toleranzen, um die Funktionserfüllung sicherzustellen) zu identifizieren. Die Anwendung der Toleranz-Kosten-Optimierung wurde am Beispiel eines abweichungsbehafteten Fensterhebers gezeigt.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens WA2913/8-3.

Literatur

- [1] Wartzack, S.; Meerkamm, H.; Stockinger, A.; Stoll, T.; Stuppy, J.; Voß, R.; Walter, M.; Wittmann, S.: Lifecycle-oriented tolerance simulation. *Konstruktion* Bd. 63 (2011) Nr. 6, S. 63–67.
- [2] Walter, M.; Storch, M.; Wartzack, S.: On uncertainties in simulations in engineering design: A statistical tolerance analysis application. *Simulation* Bd. 90 (2014) Nr. 5, S. 547–559.
- [3] Walter, M.; Sprügel, T.; Wartzack, S. Tolerance analysis of systems in motion taking into account interactions between deviations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Bd. 227 (2013) Nr. 5, S. 709–719.
- [4] Campatelli, G.: Tolerance Synthesis Using Axiomatic Design. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Axiomatic Design*, Daejeon, 2011, S. 152–157.
- [5] Zhang, C.; Wang, H.-P.: Integrated Tolerance Optimisation with Simulated Annealing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 8 (1993) Nr. 3, S. 167–174.
- [6] Sivakumar, K.; Balamurugan, C.; Ramabalan, S.: Concurrent multi-objective tolerance allocation of mechanical assemblies considering alternative manufacturing process selection. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 53 (2011) Nr. 5-8, S. 711–732.
- [7] Zhang, J.; Li, S. P.; et al.: A robust design approach to determination of tolerances of mechanical products. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* Bd. 59 (2010) Nr. 1, S. 195–198.

-
- [8] Krishnaswami, P.; Kelkar, A. G.: Optimal design of controlled multi-body dynamic systems for performance, robustness and tolerancing. *Engineering with Computers* (2003) Nr. 19, S. 26–34.
- [9] Hanzaki, A. R.; Rao, P. V. M.; Saha, S. K.: Kinematic and sensitivity analysis and optimization of planar rack-on-pinion steering linkages. *Mechanism and Machine Theory* Bd. 44 (2009) Nr. 1, S. 42–56.
- [10] Walter, M.; Spruegel, T. C.; Wartzack, S.: Tolerance-Cost-Optimization of Systems with time-variant Deviations. *Procedia CIRP – The 13th Conference on Computer Aided Tolerancing* (2014).
- [11] Kennedy, J.; Eberhart, R.: Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks* Vol. 4, Perth, USA, 1995. S. 1942–1948.
- [12] Walter, M.; Wartzack, S.: Statistical tolerance analysis of mechanisms with interactions between deviations - A methodology with 10 easy steps. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (Volume 5, DS75-05)*, Seoul, South Korea, 19-22 August 2013, S. 191–200.
- [13] Walter, M.; Breitsprecher, T.; Gruber, G.; Wartzack, S.: Simulation based generation of an initial design taking into account geometric deviations and deformations. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (Volume 10, Part 2)*, Copenhagen, Denmark, 15–18 August 2011, S. 78–90.
- [14] Gruber, G.; Kößler, J.; Wartzack, S.: A visualization methodology for evaluating parts made of short fiber reinforced thermoplastics regarding their lightweight potential. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (Volume 9, DS75-09)*, Seoul, South Korea, 19-22 August 2013, S. 155–164.
- [15] Sutherland, G. H.; Roth, B.: Mechanism Design: Accounting for Manufacturing Tolerances and Costs in Function Generating Problems, *Journal of Engineering for Industry* Bd. 97 (2010) Nr. 1, S. 283–286.
- [16] Ziegler, P.; Breitsprecher, T.; Walter M.; Westphal C.; Wartzack S.: Application of sensitivities on simulation-data-based metamodels during the product synthesis. In: *Proceedings of International Design Conference (DS 70)*, Dubrovnik, Croatia, 21-24 Mai 2012, S. 589–598.

Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten – Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle

Sven Matthiesen, Sebastian Mangold, Tim Bruchmüller,
Adrian-Maximilian Marko
*IPEK – Institut für Produktentwicklung;
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Abstract

The product development of power tools struggle with the complex interaction of the power tool, the user and the application. Current investigations of the functional reliability of impact wrenches displayed a wide spread in clamping force of the bolt-nut-connection caused by different operators. This inconclusive influence on the technical system is a problem for the designers of power tools. In the human-machine-integration approach Hand-Arm-Models are one method to solve this problem, but currently there is no useful model for rotatory excitation. This paper displays the influence of various users on the clamping force applied by an impact wrench and introduces a method to analyze the reaction of power tool users by applying vibrations in translational and rotatory directions.

Keywords: power tool, Hand-Arm-Model, human-machine-integration

1 Ausgangssituation

1.1 Der Mensch als Teil des Gesamtsystems „Gerät“

Bei der Produktentwicklung von handgehaltenen Geräten ist sowohl die Anwendung als auch der Anwender für die Produktfunktion relevant. Sie bilden durch ihre Wechselwirkungen mit dem Gerät ein gemeinsames Gesamtsystem [1] (vgl. Bild 1). Bei der Überprüfung einer Produktfunktion muss das System aus Anwender, Gerät und Anwendung immer ganzheitlich betrachtet werden.



Bild 1: Das Gesamtsystem aus Anwender, Gerät und Anwendung

Der kontinuierliche Abgleich zwischen den geforderten und den erreichten Produktfunktionen ist eine zentrale Aktivität in allen Phasen der Produktentwicklung. Dieser Abgleich erfolgt heute zu wesentlichen Teilen in Laborumgebungen. Diese Laborumgebungen erhöhen die Sicherheit in der Produktentwicklung indem sie, im Gegensatz zu realen Anwendungstests, Versuche unter klar definierten Randbedingungen ermöglichen. Die Anwendung – beispielsweise Bohren in Beton, Sägen von Holz oder das maschinelle Anziehen einer Schraube – lässt sich in Entwicklungs- und Validierungsumgebungen für Geräte meist vereinfacht abbilden. Die Wechselwirkungen zwischen der Anwendung und dem Gerät lassen sich hierdurch in den relevanten Bereichen der Versuche konstant halten. Die Abbildung des Anwenders und dessen Heterogenität in Modellen stellt bisher jedoch noch eine große Herausforderung dar. Die Hersteller sind hier auf Versuche mit mehreren parallel arbeitenden Versuchspersonen angewiesen, die durch ihre Heterogenität zu großen Unsicherheiten im Entwicklungsprozess führen. Diese Unsicherheiten bei der Überprüfung einer Produktfunktion (bspw. das streuungsarme Anziehen einer Schraubverbindung mittels Impuls-Schrauber) führen zu unnötigen Iterationen im Entwicklungsprozess. Diese Iterationsschleifen führen wiederum zu Gewinneinbußen der Hersteller [2]. In realitäts-identischen – jedoch reproduzierbaren – Überprüfungen der Produktfunktion müssen zur Vermeidung sol-

cher Iterationen die Wechselwirkungen zwischen Anwender und Gerät in Modellen abgebildet werden.

1.2 Modelle zur Beschreibung der mechanisch-dynamischen Wechselwirkungen zwischen Anwender und Gerät

Um die mechanische Wirkung des Anwenders auf ein Gerät nachbilden zu können, beschäftigen sich Forscher schon seit den 50er Jahren damit, das menschliche Hand-Arm-System mit seinen dynamischen Eigenschaften durch ein beschreibbares mechanisches Ersatzmodell nachzubilden [3]. Als Grundlage für die Erstellung solcher Modelle dienen gemessene dynamische Eigenschaften des Menschen. Das Hand-Arm-System wird hierfür durch Vibrationen angeregt (vgl. Bild 2). Hierbei wird die entstehende Kraft am Griff im Bezug zur Auslenkungsgeschwindigkeit des Griffs erfasst. Die so gemessene Impedanz (Kraft / Geschwindigkeit) wird in Mehrmassen-Schwinger-Modellen (vgl. Bild 3) abgebildet.

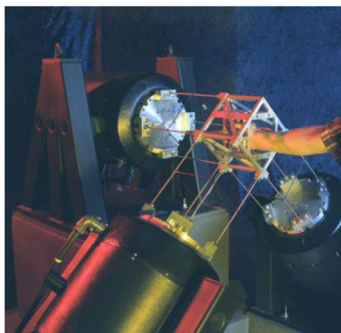


Bild 2: System zur Untersuchung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften des Anwenders in drei Raumrichtungen [4]

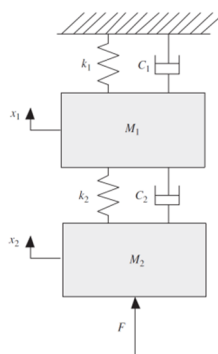


Bild 3: Mehrmassen-Schwinger-Modell zur Nachbildung der gemessenen dynamischen Eigenschaften[5]

Bei Schraubern ist funktionsbedingt die rotatorische dynamische Eigenschaft des Hand-Arm-Systems von größerem Interesse. Lediglich eine publizierte Quelle [6] berichtet von der Modellbildung des Hand-Arm-Systems in rotatorischer Richtung. Die Untersuchungen bezogen sich hierbei auf die Reaktion des Menschen auf ein sprunghaft ansteigendes Anfangsmoment beim Anziehen einer Schraube mittels eines Schraubers. Dabei wurde das Hand-Arm-System durch eine auswechselbare harmonisch schwingende Schwingscheibe angeregt (Bild 4). Durch dieses Anregungsprinzip ist die Untersu-

chung aber nur bei diskreten Anregungsfrequenzen, Amplituden und somit Beschleunigungen möglich. Eine vollständige Untersuchung der überlagerten Vibrationen, wie diese üblicherweise bei Impuls-Schraubern und Schlag-schraubern nach der Anfangsphase im Anziehvorgang auftreten, ist mit diesem Aufbau nicht möglich.

Lin et al. [6] leiteten aus diesen Untersuchungen ein einfaches Hand-Arm-Modell zur Nachbildung der dynamischen Eigenschaften des Anwenders in Rotationsrichtung ab (Bild 5). Dieses Modell ist jedoch, aufgrund des von Lin et al. betrachteten Untersuchungsszenarios, nicht für den Einsatz bei Schlag- und Impuls-Schraubern valide, da keine geregelten Aktoren aktiv eine Anregung auf das Hand-Arm-System aufprägen können und somit nur eine Untersuchung bei diskreten niederen Frequenzen möglich ist.



Bild 4: Untersuchung der dynamischen Eigenschaften des Anwenders in Rotationsrichtung [6]

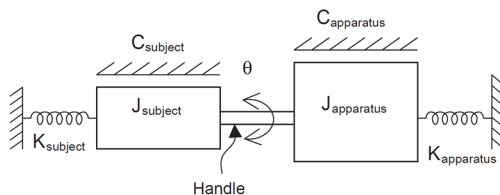


Bild 5: Ein-Massen-Schwinger in Rotationsrichtung zur Nachbildung der gemessenen dynamischen Eigenschaften [6]

Anhand eines beispielhaften Validierungsszenarios für einen Impuls-Schrauber, wird im nächsten Abschnitt die Notwendigkeit der Forschung an solchen rotatorischen Hand-Arm-Modellen herausgearbeitet. Hierfür wird gezeigt, dass der Anwender einen erheblichen Anteil an der Funktionserfüllung des Impuls-Schraubers besitzt.

2 Das Beispielsystem Impuls-Schrauber und eine Messvorrichtung zur Quantifizierung des Anwendereinflusses

2.1 Impuls-Schrauber

Impuls-Schrauber sind handgehaltene Geräte für die Erstellung von Schraubverbindungen mit hohen Vorspannkräften bei vergleichsweise niedrigem Gegen-Haltemoment für den Anwender. Das kontinuierlich vom Motor

abgegebene Moment führt ab einem Grenzmoment in einer hydraulischen Pulszelle zum Aufbau eines Öldruckes. Dieser Öldruck entlädt sich impulsartig auf die Abtriebswelle, welche dadurch mit einem Vielfachen des eigentlichen Motor-Drehmoments beaufschlagt wird. In dieser Untersuchung wurde der Impuls-Schrauber UDBP-T60(P) der Firma URYU genutzt.

2.2 Methode zur Quantifizierung des Anwendereinflusses

2.2.1 Messvorrichtung

Die Messvorrichtung (vgl. Bild 6) besteht aus zwei Stahlplatten, welche durch eine Schraube gegeneinander verspannt werden. Die schraubenkopfseitige Platte ist starr mit der Umgebung verbunden, während die zweite Platte verschiebbar gelagert ist und durch die Schraubenmutter an die erste herangezogen wird.

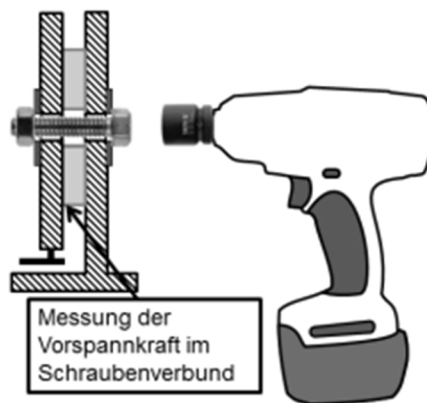


Bild 6: Messvorrichtung zur Erfassung der Vorspannkraft einer Schraubenverbindung

Zwischen den beiden Platten befindet sich die DMS-Ring-Kraftmessscheibe ALF313 der Firma ALTHEN. Mit diesem Sensor können Druckkräfte bis zu 40 kN an Schraubengrößen bis M10 gemessen werden. Die Messkette besteht weiter aus dem DMS-Messverstärker SG-KP-24E-010-GF30 von ALTHEN und einer NI PCI-6229 I/O Karte. Die Vorspannkraft wird mit einer Abtastrate von 20 kHz aufgezeichnet. Bei diesen Versuchen werden M8 Schaftschrauben der Festigkeitsklasse 8.8 verwendet. Die Klemmlänge beträgt 44 mm. Sowohl unter dem Kopf als auch unter der Mutter werden Unterlegscheiben aus Stahl verwendet. Die Reibung im Gewinde wird durch Fett reduziert.

2.2.2 Versuchsmethode

Um den Einfluss des Anwenders auf die Funktionserfüllung des Impuls-Schraubers darzustellen, wurde eine explorative Studie mit zwei Probanden durchgeführt. Ein Einzelversuch bestand im Anziehen einer Schraubverbindung mittels Impuls-Schraubers bis zu dessen automatischer Abschaltung. Die entstandene Vorspannkraft wurde zeitabhängig aufgezeichnet. Insgesamt wurden 24 Versuchsvariationen mit jeweils fünf gleichen Einzelversuchen durchgeführt. Die Parameter waren hierbei der Proband (männlich und weiblich), die Armhaltung der Person (vier Posen) und die subjektiv bewertete Greifkraft (schwach, mittel, stark). Die vier untersuchten Armhaltungen sind das Schrauben an der Decke über Kopf, senkrecht nach unten am Boden, horizontal in Kopfhöhe und vor der Brust.

3 Einfluss der Heterogenität des Anwenders auf die Funktionserfüllung eines Gerätes

3.1 Einfluss der Anwendung auf die Funktionserfüllung

Anwender, Gerät und Anwendung bilden ein Gesamtsystem und definieren gemeinsam die Produktfunktion. Deshalb ist es wichtig, sowohl Gerätefunktion als auch Anwendungswechselwirkungen konstant zu halten, um den Einfluss des Anwenders zu untersuchen. Dieser Einfluss muss zudem gegenüber der Streuung des Gerätes und der Streuung der Anwendungs-Geräte-Wechselwirkungen Relevanz besitzen. In einem Vorversuch wurden deshalb mehrere Versuche durchgeführt, in denen der Anwender durch eine möglichst starre Einspannung des Schraubers ersetzt wurde, um hierdurch auf die übrige Systemstreuung schließen zu können.

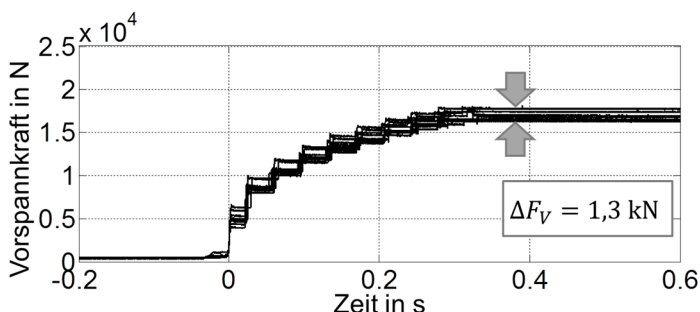


Bild 7: Streuung der Vorspannkraft aus Gerät und Anwendung

Das Bild 7 zeigt den Verlauf der erzeugten Vorspannkraft über der Anzugsdauer für verschiedene Versuchsdurchläufe. Für jeden der zehn durchgeführten Versuche wurde eine Kombination aus neuer Schraube und neuer Mutter verwendet. Wie in Bild 7 mit den grauen Pfeilen dargestellt, stellt sich hierbei eine Streuung der Vorspannkraft von 1,3 kN ein ($\sim 8\%$ der erzeugten mittleren Vorspannkraft). Diese Streuung ist ein Resultat aus der Gerätestreuung und der Wechselwirkung von Gerät und Anwendung.

3.2 Einfluss des Anwenders auf die Funktionserfüllung

In Bild 8 ist der zeitliche Verlauf der erzeugten Vorspannkraft für zwei Probanden dargestellt. Jeweils in gleicher Linienfarbe sind hierbei fünf Versuche mit gleichen Versuchskonfigurationen (Proband, Greifkraft, Pose) aufgetragen. Im Vergleich aller untersuchten Konfigurationen stellen diese beiden dargestellten Parameterkombinationen jeweils die Extremwerte in der erzeugten mittleren Vorspannkraft dar. Durch die grauen Pfeile in Bild 8 ist ersichtlich, dass gegenüber der Versuche mit fest eingespanntem Schrauber, eine mit 8,4 kN wesentlich höhere Streuung der erzeugten Vorspannkraft auftritt ($\sim 54\%$ der erzeugten mittleren Vorspannkraft).

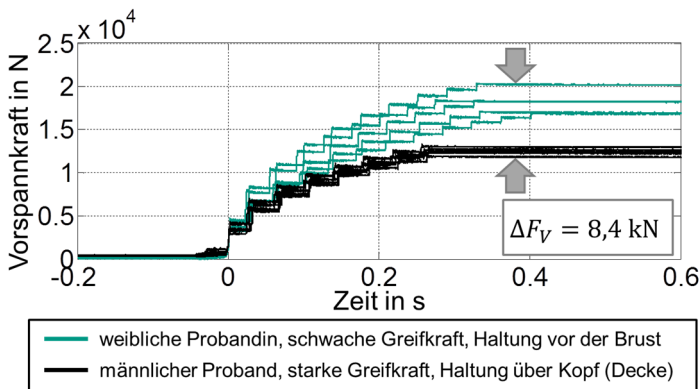


Bild 8: Maximale Streubreite der Vorspannkraft durch den Anwendereinfluss

Beispielhaft sind in Bild 9 die mittleren erzeugten Vorspannkraft für die beiden Probanden in der untersuchten Pose Armhaltung „über Kopf (Decke)“ für die drei Greifkräfte dargestellt. Ebenfalls ist die Standardabweichung, innerhalb der jeweils durchgeführten fünf Einzelversuche, dargestellt.

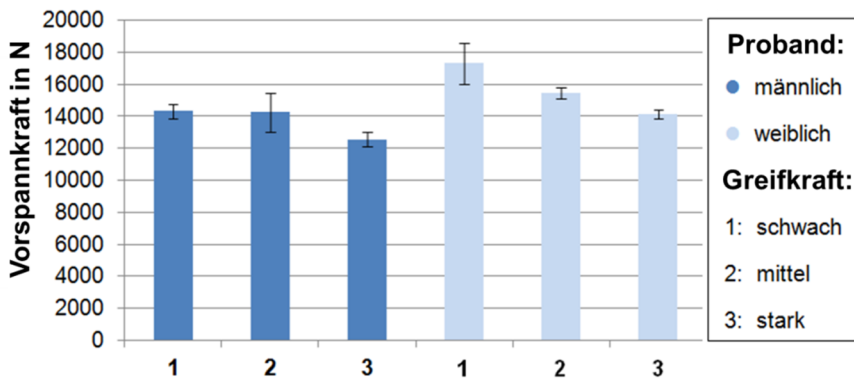


Bild 9: Erzeugte Vorspannkraft in der Armhaltung „über Kopf (Decke)“ für die beiden Probanden bei drei subjektiv bewerteten Greifkräften

Es ist ersichtlich, dass sowohl die Person als auch die Greifkraft zu einer Veränderung der Vorspannkraft und der Streubreite des Impuls-Schraubers führen. Insbesondere ergibt sich bei der weiblichen Probandin eine starke Abhängigkeit der gemessenen Vorspannkraft zur subjektiv bewerteten Greifkraft. Beim männlichen Probanden ist diese Abhängigkeit nicht so eindeutig ersichtlich.

Eine klare Abhängigkeit der Beeinflussung der erzeugten Vorspannkraft von den untersuchten Parametern konnte in dieser explorativen Studie nicht identifiziert werden. Das reproduzierbare Aufbringen der subjektiv bewerteten Greifkraft stellt für beide Probanden eine große Herausforderung dar. Insbesondere ist eine Abgrenzung zwischen schwacher und mittlerer Greifkraft kaum möglich. Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist der Einsatz einer Messtechnik im Gerätegriff zur Bestimmung der Greifkraft nötig. In weiteren Studien soll außerdem die Körperhaltung der Probanden durch ein Microsoft Kinect System überwacht werden.

4 Untersuchungsumgebung zur Ermittlung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften des Anwenders

In 3.2 konnte gezeigt werden, dass die mechanisch-dynamischen Eigenschaften des Anwenders einen erheblichen Einfluss auf die Funktionserfüllung eines Gerätes haben. Bei der Überprüfung einer Produktfunktion, wie beispielsweise das streuungsarme Anziehen einer Schraube, müssen die Wechselwirkungen mit dem Anwender immer mitbeachtet werden. Im Stand der Forschung sind keine geeigneten Ersatzmodelle für die rotatorische Anregung

des Hand-Arm-Systems bei hoher Frequenz bekannt. Um diese zu erstellen, ist eine Umgebung notwendig, welche eine reproduzierbare Untersuchung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften des Anwenders möglich macht.

4.1 Anforderungen an eine Untersuchungsumgebung

Für verschiedene Anwendungsgebiete müssen Anwender das handgehaltene Gerät in unterschiedlichen Arbeitshaltungen bedienen (vgl. Bild 10). Je nach Körperhaltung, insbesondere Armhaltung, ändern sich Kraft- und Hebelverhältnisse, die beim Anwender unterschiedliche mechanisch-dynamische Eigenschaften hervorrufen. Diese Eigenschaften sind beim Impulsschrauber ebenfalls von der Greifkraft abhängig, welche zu einer Vorspannung des Hand-Arm-Systems führt.



Bild 10: Körperhaltungen von Anwendern

Um die mechanisch-dynamischen Eigenschaften des Anwenders zu bestimmen, müssen Schwingungen reproduzierbar auf das Hand-Arm-System aufgeprägt werden. Diese Schwingungen müssen dabei äquivalent zu den Schwingungen am Gerätegriff eines realen Gerätes in seiner Anwendung sein. Wie bei Impuls-Schraubern treten bei vielen handgehaltenen Geräten hohe rotatorische Beschleunigungen am Gerätegriff auf. Abgesehen von Impuls-Schraubern, gibt es eine Reihe von Geräten, bei denen eine rotatorische Schwingung mit einer translatorischen Schwingung überlagert ist (Beispielsweise bei Bohrhämmern oder Schlagschraubern). Für diese Überlagerung von Rotation und Translation kann aus Gründen der geforderten Dynamik, wie auch im Stand der Forschung verwendet (vgl. Bild 2), nur ein elektromagnetisches Shaker-System eingesetzt werden. Mit diesem Ersatz-Anregungs-System muss es möglich sein, die entstehende Kraft an der Hand im Bezug zur Auslenkungsgeschwindigkeit des Griffs messtechnisch in verschiedenen Arbeitshaltungen zu erfassen. Dies bedingt sowohl eine Höhenverstellbarkeit, als auch eine Winkelverstellbarkeit des Ersatz-Anregungs-

Systems, um die in Bild 10 dargestellten Arbeitshaltungen zu untersuchen. Weiterhin muss die Vorschub- und die Greifkraft des Anwenders sowie die Gegenreaktionskraft am Boden erfasst werden.

In einer Studie zur Bestimmung der Anforderungen an eine solche Untersuchungsumgebung wurden die Frequenzen und Amplituden in axialer und rotatorischer Richtung für Schlagschrauber und Bohrhammer ermittelt. Es zeigte sich die Notwendigkeit, das Hand-Arm-System in sehr kleinen Amplituden mit bis zu 1000 Hz anzuregen. Beim Schlagschrauber traten hierbei bei mittleren Frequenzen translatorische Auslenkungen bis zu 3 mm und singuläre rotatorische Auslenkungen bis zu 30° auf.

4.2 Konzept einer Untersuchungsumgebung

Das Bild 11 zeigt die geplante konstruktive Umsetzung der Untersuchungsumgebung. Der Proband hält in seiner rechten Hand einen dem handgehaltenen Gerät nachempfundenen Griff.



Bild 11: Geplante Untersuchungsumgebung

Dieser Griff ist über entkoppelnde Übertragungselemente mit den Armaturen zweier Linearanreger (Shaker) verbunden. In der Verlängerung des Arms



des Probanden befindet sich der Shaker zur Erzeugung der translatorischen Schwingungen. Orthogonal zu diesem ist der Rotationsshaker angeordnet. Die translatorische Schwingung dieses Shakers wird durch ein Zahnstangen-Zahnrad-Getriebe in eine Rotationsschwingung gewandelt. Durch eine Keilwellenmutter kann die Rotationsschwingung auf den Griff übertragen werden und gleichzeitig kann die axiale Schwingung des Handgriffs vom Zahneingriff entkoppelt werden. Die Shaker sind in einem inneren Gestell in Anregungsrichtung gedämpft gelagert. Dieses Gestell ermöglicht eine Rotation der Anordnung samt Griff und ist in einem zweiten äußeren Gestell befestigt. In diesem Gestell kann das innere Gestell in der Höhe zum Anwender verändert werden. Dieser translatorische Freiheitsgrad, kombiniert mit dem rotatorischen des inneren Gestells, ermöglicht eine Positionierung des Griffs zum Probanden in den wichtigsten Arbeitspositionen (vgl. Bild 10).

Neben dieser Hardware wird eine Reihe von Messtechnik eingesetzt, um die mechanischen Eigenschaften des Probanden zu erfassen. Im Handgriff befinden sich ein 6-Achs-Kraft-Momentensensor und zwei 3-Achs-Beschleunigungssensoren. Die Wegänderung am Handgriff wird zusätzlich optisch durch 1-D-Lasersensoren überwacht. Die Verteilung der Greifkraft des Probanden wird durch eine Druckfolie ermittelt. Der Proband steht auf einer Kraftmessplatte, welche die Reaktionskräfte zum Untergrund erfasst. Er wird in seiner Haltung von einer Microsoft Kinect-Kamera beobachtet. Alle Messdaten werden zeitsynchron in einem Echtzeitsystem erfasst und ermöglichen dadurch die messtechnische Beurteilung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften des Anwenders.

Bei der Identifizierung der Parameter von Anwender-Modellen, welche sich aus den Untersuchungen ableiten lassen, ist eine intensive Zusammenarbeit mit dem Institut PKT der Technischen Universität Hamburg-Harburg geplant. Dort wurde bereits das dynamische Verhalten von verschiedenen Leichtbaustrukturen in Systemidentifikationstests unter einer gezielten Auskopplung der Umgebungseigenschaften, wie etwa der Prüfkörperanbindung untersucht [7]. Diese Erfahrungen sollen bei der Erstellung von Hand-Arm-Modellen mithilfe der vorgestellten Untersuchungsumgebung verwendet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Impuls-Schrauber zeigen eine Beeinflussung der Funktionserfüllung des Gerätes durch den Anwender, obwohl Impuls-Schrauber bisher als besonders wechselwirkungsarm eingestuft werden. Die Einflussfaktoren des Anwenders lassen sich aus diesen Versuchen

jedoch nicht eindeutig bestimmen. Mit Hilfe der beschriebenen Untersuchungsumgebung wird es erstmalig möglich, Modelle der Anwender-Geräte-Wechselwirkungen zu entwickeln, welche das Hand-Arm-System in geräteüblichen Frequenzbereichen bei überlagerter Translation und Rotation repräsentieren können. Unter Verwendung dieser Untersuchungsumgebung können neue Produktentwicklungsmethoden für die Mensch-Maschine-Integration erforscht werden, mit dem Ziel, Geräte mit dem Fokus auf die Funktionseinheit Mensch und Maschine zu entwickeln.

Literatur

- [1] Matthiesen, S., Mangold, S. und Schäfer, T.: „Modellierung und Simulation des Hand-Arm-Systems bei stoßartiger Anregung“, 23.DfX-Symposium, Bamberg, 2012.
- [2] Meboldt, M., Matthiesen, S. und Lohmeyer, Q.: “The dilemma of managing iterations in time-to-market development processes”, 2.International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes, Cambridge, UK., 2012.
- [3] Cronjäger, L., Jahn, R. und Riederer, H.: „Entwicklung eines Versuchsstandes zur reproduzierbaren Messung der Vibration schlagender handgeführter Maschinen“, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1984.
- [4] Dong, R.G., Welcome, D.E. und McCormick, R.E.: “3-D Laboratory Simulation of Hand-Transmitted Vibration”, 24th Conference and Exposition on Structural Dynamics, St Louis, Missouri, USA, 2006.
- [5] Marcotte, P., Boutin, J. und Jasinski, J.: “Development of a hand–arm mechanical analogue for evaluating chipping hammer vibration emission values”, Journal of Sound and Vibration 329, S. 1968-1980, 2010.
- [6] Lin, J.-H., Radwin, R.G. und Richard, T.G.: “A single-degree-of-freedom dynamic model predicts the range of human responses to impulsive forces produced by power hand tools”, Journal of Biomechanics 36, S. 1845-1852, 2003.
- [7] Plaumann, B.; Krause, D.: “A methodical approach for dynamic system analysis & synthesis in the dimensioning of variant lightweight cabin interior”, 29th International Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), St. Petersburg, 2014

Modellbildung der unteren Extremitäten und simulationsgestützte Auswertung von Gangparametern

Jan Moritz Sporbeck, Rainer Gößling, Beate Bender
*Lehrstuhl für Produktentwicklung;
Ruhr Universität Bochum*

Abstract

Model synthesis of the lower extremity and simulation based identification of gait parameters.

As the human body does not allow for direct measurement, a combined approach of indirect measurement linked with a supporting simulation model has to be taken. This paper presents a method to simultaneously develop this simulation model and an interlinked technical (measurement) system. Extending the existing approach by Uthmann, the method establishes a simplified way to aggregate all information and requirements necessary for design and implementation of both a simulation model and a technical system. Splitting the requirement acquisition and design process into three modelling stages, the method limits interdisciplinary collaboration for each step to two partners, reducing overhead and the chance of misinterpretation by peer validation.

Keywords: simulation model, interdisciplinary collaboration, peer validation, lower extremities

1 Einleitung

Grundlage einer Simulation ist eine geeignete Erfassung der Realität durch ein Modell. In der Ingenieurpraxis erfolgt eine Modellbildung üblicherweise auf Basis von charakteristischen Gleichungen, die die relevanten (physikalischen) Zusammenhänge des realen Systems beschreiben. Dieses Vorgehen ist bei der Erstellung von Modellen des menschlichen Körpers aufgrund der zu betrachtenden interdisziplinären Zusammenhänge nicht unmittelbar möglich. Die Kinematik des Menschen und damit auch die der unteren Extremitäten ist nur ungenau beschreibbar, da Bewegungen aufgrund der individuellen anatomischen Voraussetzungen und erlernter Bewegungsmuster großen Varianzen unterworfen sind. Hinzu kommen Einflüsse durch individuelle Konstitution, Störungen und Ausgleichsbewegungen. Da es insbesondere am Menschen nicht möglich ist, direkte Messungen an der Anatomie vorzunehmen, kann die messtechnische Erfassung von Bewegungen für die kinematische Modellbildung nicht angewendet werden, das Studium der biomechanischen Zusammenhänge ist daher zwingend notwendig.

Das hier vorgestellte Modellbildungsverfahren nutzt das Expertenwissen der einzelnen Disziplinen systematisch, um von einer biomechanischen Betrachtung des Menschen zu einem technischen Modell zu gelangen, das in eine Simulation umgesetzt werden kann und die Möglichkeit einer eindeutigen Rückübertragung der Erkenntnisse auf den konkreten Menschen erlaubt. Dieses Vorgehen wurde im Rahmen des Ziel2 Projektes „Aufbau und Betrieb eines Versuchsstandes zur Entwicklung von sensorbasierter neuronal adaptiver Prothetik“ (SNAP) angewendet um, ausgehend von der natürlichen Gangbewegung des Menschen, ein durch ein Messsystem gesteuertes virtuelles Simulationsmodell („Mensch-Bild“) zu erstellen, das unter anderem die automatisierte, echtzeitnahe Erkennung von Gangphasen eines Probanden ermöglicht.

2 Entwicklung der Modelle

Der vorgestellte Modellbildungsprozess orientiert sich an [1]. Grundlegende Modellbildungszyklen werden bereits von Page (1991) [2] und Häuslein (1993) [3] beschrieben. Dort werden auch die einzelnen beteiligten Prozesse ausführlich dargestellt. Uthmann (1996) [4] fasst diese in dem grundlegenden Modellbildungszyklus (Bild 1) zusammen. Diese Betrachtung ist jedoch aus zwei Gründen für das hier vorgestellte Vorgehen zur Modellbildung des Menschen nicht ausreichend. Zum einen muss, wie bereits oben dargestellt, die Betrachtung von System und Modell detailliert werden, um (Teil-) Modelle auf den verschiedenen Darstellungsebenen der beteiligten Fachdisziplinen zu

erstellen, einen Konsens über die Schnittstellen zwischen den Domänen zu etablieren und schließlich die Aussagen und Erkenntnisse abzugleichen. Zum anderen ist Ziel dieses Vorgehens, ein virtuelles Simulationsmodell zu erhalten, das direkt durch ein Messsystem parametrisiert wird. Daher muss der Modellbildungsprozess zusätzlich um die Schritte ergänzt werden, in denen die Eigenschaften abgeleitet und spezifiziert werden, die die Parametrisierung und Entwicklung des Messsystems ermöglichen.

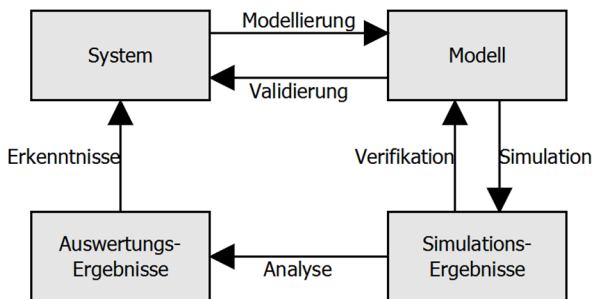


Bild 1: Modellbildungszyklus (nach Uthmann)

Bild 2 zeigt den Zusammenhang der einzelnen Abbildungsschritte, die im Folgenden erläutert und klassifiziert werden.

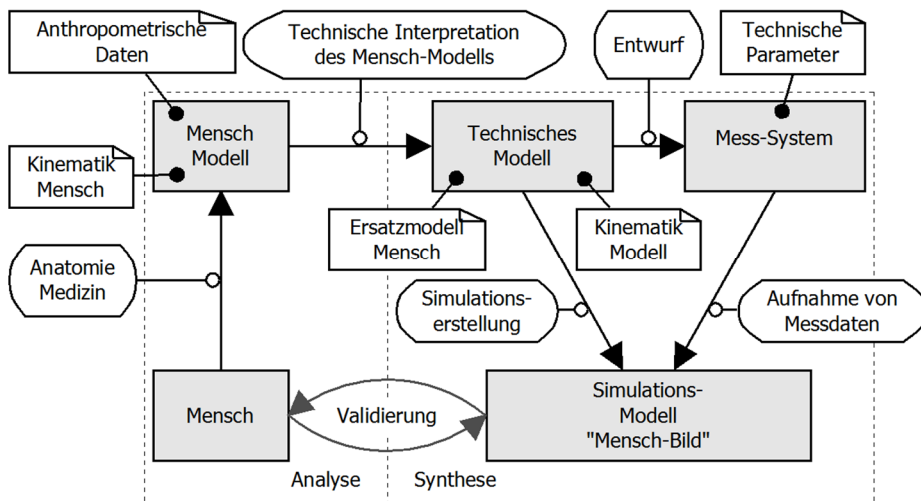


Bild 2: Abbildungsschritte zur Erstellung des „Mensch-Bildes“

Jeder dieser Schritte nutzt das Wissen einer Fachdisziplin so, dass die Konsequenzen und Einschränkungen der Allgemeingültigkeit für jede Abbildung auf eine Fachdomäne begrenzt bleiben. Gleichwohl erfolgt in jedem Arbeitsschritt zur Validierung des Modellierungsschrittes eine Rückkopplung mit der jeweils wissensgebenden, vorgelagerten Fachdomäne (z.B. Medizin <-> Biomechanik; Biomechanik <-> Maschinenbau).

2.1 Das Mensch-Modell

Die anatomische Beschreibung repräsentiert die reale Situation, die die Grundlage des Modellbildungsprozesses darstellt. Aufbauend auf den für die Ganganalyse relevanten Wesensmerkmalen wird durch Idealisierung, Strukturierung, Spezifizierung und Vereinfachung das Mensch-Modell entwickelt. Für dieses Modell werden Informationen (anthropometrische Daten, kinematische Beziehungen und Verknüpfungen, sowie anatomische Bedingungen) analysiert und in mathematische Konzepte umgesetzt und formalisiert. Das im Rahmen des SNAP Projektes entwickelte Mensch-Modell folgt dem Vorgehen von Smoliga [5]. Als Vorbereitung der technischen Unterstützung werden zusätzliche anthropometrische Daten des „Europamenschen“ [6] genutzt, um frühzeitig in der Entwicklung des Gesamtsystems die notwendigen Anpassungsintervalle zu definieren. Die für die weiteren Modellierungsschritte wichtigste Entscheidung ist die Festlegung der Kompromissdrehachsen, da z.B. die Bewegung des Knies nur annäherungsweise durch eine Viergelenkkette beschrieben werden kann (vgl. hierzu [7]). Bild 3 zeigt verschiedene fachspezifische Darstellungsformen der im Kontext des SNAP Projekts relevanten Aspekte der unteren Extremitäten.

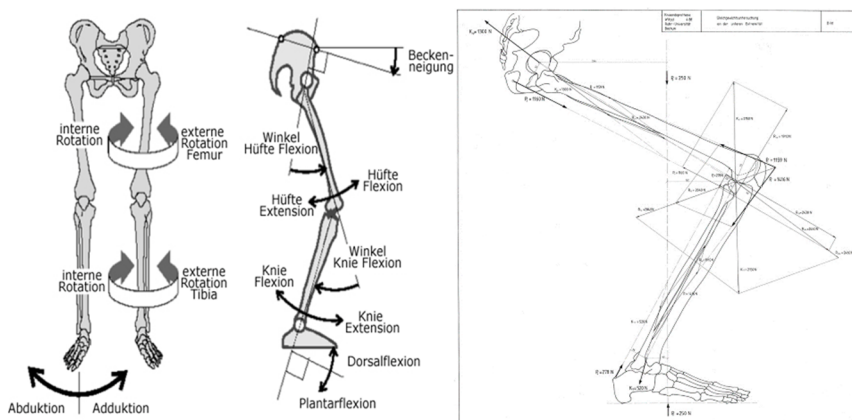


Bild 3: Darstellungen des Mensch-Modells (untere Extremitäten)

2.2 Das technische Modell

Mit der Festlegung der kinematischen Beziehungen der Ersatzgelenke im vorangegangenen Schritt sind die Grundlagen geschaffen das technische Modell aufzubauen. Dieses besteht aus der vollständigen kinematischen Beschreibung sowie den Betrachtungen zur Dynamik des Systems. Das technische Modell hat die Aufgabe alle Daten in technisch einheitlicher Form im Stil eines Pflichtenheftes zusammenzufassen, die im Folgenden zum Entwurf des Messsystems und des Simulationsmodell benötigt werden. Diese gemeinsame Datenbasis stellt insbesondere sicher, dass die gleichen Vereinfachungen und Annahmen in die beiden Systementwürfe einfließen.

2.3 Das Messsystem

Das Messsystem ist das Instrument der Datenerfassung, diese dient zum einen der Parametrisierung des Simulationsmodells und liefert zum anderen Informationen über die realen Bewegungen, die zur Kalibrierung des Simulationsmodells benötigt werden.

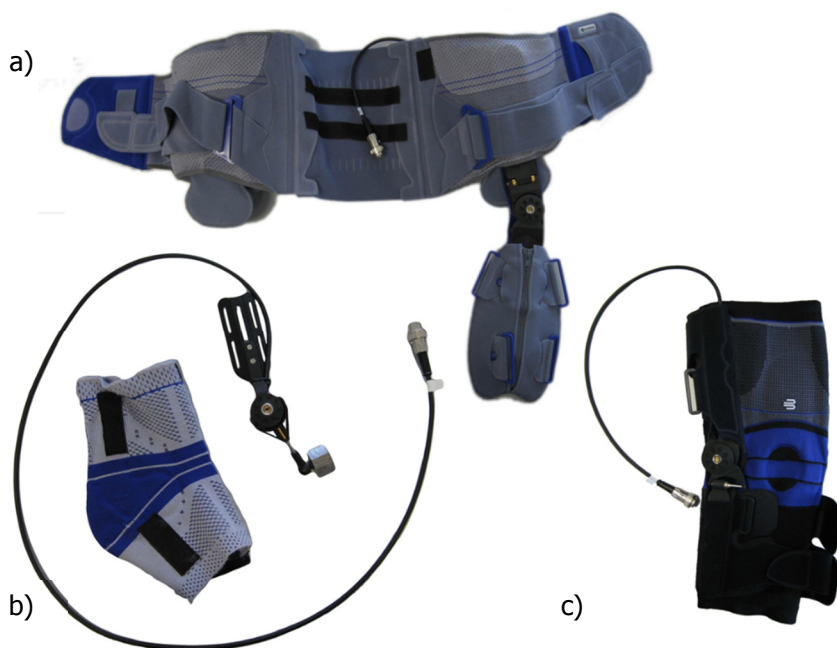


Bild 4: Komponenten des Messsystems: Hüfte (a), Sprunggelenk (b), Knie(c)
(Prototyp 2013)

Das im Rahmen des SNAP Projektes entwickelte Messsystem (siehe Bild 4) für die unteren Extremitäten erfasst je Bein fünf Freiheitsgrade und verfügt weiterhin über acht zwangsgeführte passive Freiheitsgerade (z.B. zum Längenausgleich), die sicherstellen, dass die erfassten Bewegungen im Bereich der Kompromissachsen liegen.

2.4 Das Simulationsmodell

Das Simulationsmodell schließlich setzt die konkrete Darstellung des Mensch-Bildes durch Projektion der vom Messsystem ermittelten Daten auf das Mensch-Modell um. Eine weitergehende Interpretation entsprechend der Ausgangssituation und des Ursprungsproblems ermöglicht die Rückübertragung auf den Menschen. Ebenso können durch den unmittelbaren Vergleich der Ergebnisse der Simulation (Soll) und den durch das Messsystem ermittelten Daten (Ist) Auffälligkeiten erkannt, in der aufgezeichneten Messreihe markiert und schließlich durch einen Experten weitergehend analysiert werden. Das Simulationsmodell selbst folgt bei der Umsetzung und Validierung den Ideen von Shan und Kenny ([8], [9]) und ist parallel in den Programmen Matlab und Anybody umgesetzt.

Zusammen mit dem Modell werden in der Simulation auch die Funktionen zur Analyse implementiert, die die einzelnen Fachdisziplinen benötigen. Die Aufbereitung der Daten muss dabei in einer Weise geschehen, dass diese sowohl in den Darstellungsformen des entsprechenden Fachgebiets ausgegeben, als auch in den domänenspezifischen Spezialanwendungen (AnyBody, ANSYS) weiterverarbeitet werden können.

Das realisierte Simulationsmodell erlaubt eine Echtzeitanalyse der Gangparameter, die wiederum als Eingangswerte nachgelagerter Analysen genutzt werden.

3 Validierung der Modellbildung

Die Validierung des Modells erfolgt in einem zyklischen Prozess ([10], [11]), durch den sichergestellt wird, dass alle notwendigen Aspekte des realen Problems mit Hilfe des technischen Modells erfasst werden und somit im Simulationsmodell reproduziert werden können. Diese Qualitätsprüfung ist essentiell für die Beurteilung der Güte der Modellbildung und einer Einschätzung der Tauglichkeit der Simulation, die gestellten Fragestellungen durch Rückübertragung der Ergebnisse wissenschaftlich klären zu können.

Konkret ist zur Erkennung der Gangphasen sicherzustellen, dass die einzelnen Winkelstellungen mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden, um zunächst auf die relevanten Stellungen der betrachteten Extremitäten im Mensch-Modell rückschließen zu können und somit letzten Endes eine korrekte Korrespondenz mit dem Probanden sicherzustellen. Der im Rahmen von SNAP entwickelte Algorithmus nutzt in Zeitintervalle geclusterte geometrische Analysen der kinematischen Kette, die im technischen Modell beschrieben ist. Zur Beurteilung dieser Genauigkeit wurden Vergleichsmessungen mit kommerziellen Systemen durchgeführt.

4 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Gesamtsystems betrifft sowohl das Messsystem als auch das Simulationsmodell. Das Simulationsmodell ist eine angenäherte Widerspiegelung der Wirklichkeit, wobei die benötigte Genauigkeit durch die Anpassung des Modells zu erzielen ist. Weil beide Systeme zunächst mit unbekannter Genauigkeit arbeiten und systematische Fehler aufweisen, kommt der Kalibrierung eine besondere Bedeutung zu, da es keinen als absolut anzusehenden Bezugswert gibt. Das Messsystem ist mit Messabweichung und Messgeräteabweichung behaftet. Um diese zu quantifizieren und nachfolgend zu reduzieren wurden Vergleichsmessungen mit kommerziellen Systemen (Cebri, Vicon) vorgenommen. Diese optischen Systeme verwenden eigene Modelle, um die von stationären Kameras aufgenommenen Marker-Positionen auf die Gliedmaßen zu projizieren. Diese Modelle sind nicht öffentlich zugänglich dokumentiert; beide Hersteller geben jedoch die Genauigkeit der abgeleiteten Winkelstellungen mit $1,5^\circ$ absolutem Fehler an. Bild 5 zeigt den Winkelverlauf einer, mit einem Vicon System aufgezeichneten (umgerechneten), Messreihe sowie die gleichzeitig durch das entwickelte System (Prototyp 2013) aufgenommenen Werte.

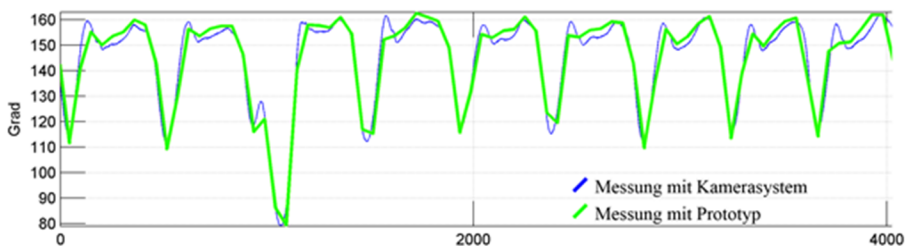


Bild 5: Vergleich der Bewegung des Knie-Sensors

Das Simulationsmodell ist mit systematischen Fehlern behaftet, die abhängig von den gewählten Parametern variieren und über eine simulationsbasierte Kalibrierung reduziert werden. Grundlage der simulationsbasierten Kalibrierung sind die Messdaten des Sensorsystems und die dazu gehörenden manuell ermittelten Analysedaten, die nur mit großem Aufwand von Experten (Domäne Orthopädie) gewonnen werden können. Bild 6 zeigt den grundlegenden Ablauf dieses Prozesses.

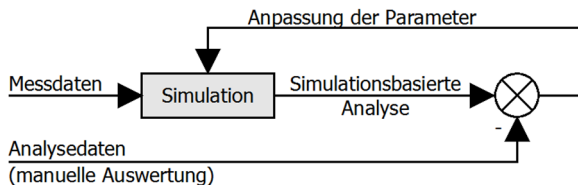


Bild 6: Simulationsbasierte Kalibrierung

Die Messdaten werden dabei als Eingangsdaten zur Steuerung des entwickelten Simulationsprogramms verwendet, das die korrespondierenden Analysedaten erzeugt. Durch den Vergleich dieser Daten mit denen der manuellen Auswertung lässt sich die Qualität der Simulationsparameter beurteilen. In rekursiven Schritten werden die Parameter so angepasst, dass die Abweichung zwischen den Ergebnissen manueller und simulationsbasierter Analyse über alle Datensätze möglichst gering wird (vgl. hierzu auch [12]). Mit den auf diese Weise bestimmten und sukzessiv verbesserten Parametern wird in der Simulation eine robuste Erkennung der Gangphasen erreicht.

Im Rahmen von Gangexperimenten wurden weitere Datenreihen aufgezeichnet und durch die Simulation ausgewertet. Die Qualität der Analyse wurde von Experten der Domäne Orthopädie begutachtet. Vorliegende Zwischenergebnisse bestätigen, dass eine weitgehende Vergleichbarkeit der simulationsgestützten Analyse und der fachlich-manuellen Auswertung erreicht wird.

5 Fazit

Die vorgestellte Methode zeigt einen konsistenten Weg auf, um, ausgehend von der fachdomänenübergreifenden Ermittlung der Anforderungen an ein Gesamtsystem, durch schrittweise Abstraktion zu einer einheitlichen, fachneutralen Beschreibung zu gelangen. Diese dient als Grundlage sowohl der Entwicklung eines technischen Messsystem, als auch des Entwurfs und der Anpassung eines Simulationsmodells. Von Vorteil ist dabei, dass in jedem Abstraktionsschritt nur das Expertenwissen von zwei Disziplinen verwendet

wird. Eine informationsgebende Disziplin liefert die Fakten, die von der informationsnehmenden Disziplin mit den fachspezifischen Modellierungsmethoden umgesetzt werden. Dieses Modell wird wiederum durch die Experten der ersten Gruppe geprüft. Das abgeleitete Modell wird in Rückkopplung mit dem Fachwissen der vorgelagerten Disziplin validiert.

Im SNAP Projekt wurde die vorgestellte Methode erfolgreich zur Entwicklung des LEA-Systems zur Ganganalyse angewendet. Vorteile zeigen sich dabei insbesondere durch die Strukturierung des Informationsflusses zwischen den Fachdomänen. Die Schaffung einer gemeinsamen Datengrundlage für die Umsetzung sowohl der Simulation als auch des Messsystems verbessert die Abstimmung der Domänen. Durch Anwendung der Methode sind bei komplexen Gesamtsystemen, die aus einem mechatronischen System und einer Simulationskomponente bestehen (z.B. bei biomechatronischen Systemen), weniger Rekursionen zur Absicherung der Eigenschaften des resultierenden Produktes notwendig.

Aktuell wird die Methode weiter detailliert und kommt in konkretisierter Form bereits bei einem Nachfolgeprojekt am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Ruhr-Universität Bochum zum Einsatz.

Literatur

- [1] Blum, W.: „Anwendungsorientierter Mathematikunterricht in der didaktischen Diskussion“, In: Mathematische Semesterberichte S. 195-232, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1985.
- [2] Page, B.: „Diskrete Simulation. Eine Einführung mit Modula-2“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
- [3] Häuslein, A.: „Wissensbasierte Unterstützung der Modellbildung und Simulation im Umweltbereich. Konzeption und prototypische Realisierung eines Simulationssystems“, Peter Lang Verlag, Frankfurt, 1993.
- [4] Uthmann, T.: „Einsatz von Methoden und Konzepten der KI in der medizinischen Informationsverarbeitung“, In: Informatik-Bericht 4/96, Mainz, 1996.
- [5] Smoliga, J.: „Kinematic and Electromyographic Analysis of the Legs, Torso, and Arms During An Exhaustive Run“, Dissertation, Cornell University, Pittsburgh, 2007.

-
- [6] DIN EN ISO 7250-1: „Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung - Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte“, Deutsches Institut für Normung, 2010.
- [7] Hohmann, D.; Uhlig, R.: „Orthopädische Technik“, 9. überarbeitete und neu gestaltete Auflage, Thieme, Stuttgart, 2004.
- [8] Shan, G.; Zhang, X.: „From 2D leg kinematics to 3D full-body biomechanics“, In: Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation, Therapy & Technology 3 (1), BioMed Central, London, 2011.
- [9] Kenny, I.; Wallace, E.; Brown, D.; Otto, S.: „Validation of a full-body computer simulation of the golf driver for clubs of differing length“, In: The Engineering of Sports 2-2006, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [10] Fischer, R.; Malle, G.: „Mensch und Mathematik“, Profil Verlag, München, 2004.
- [11] Hersh, R.: „What is Mathematics, really?“, Jonathan Cape, London 1997.
- [12] Anderson, R.; Kenny, I.; Tucker, C.; O’Halloran, J.: „Creation of theoretical data sets to examine movement variability using modelling“, In: International Society of Biomechanics in Sports (Hg.): Proceedings of the 28th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, Department of Health Physical Education and Recreation, Marquette, 2010.

Konzept zur Methodenbeschreibung und -auswahl auf Basis von Kompetenzen und Zusammensetzung von Entwicklungsteams

Ann-Kathrin Bavendiek, David Inkermann und Thomas Vietor
*Institut für Konstruktionstechnik;
Technische Universität Braunschweig*

Abstract

Design methods are used to support single steps of the product development process and are expected to contribute to reduce development time and higher degree of innovation. Increasing time and cost pressure as well as still low remaining practical use of design methods call for new approaches to describe and select appropriate methods. The high level of abstraction and the theoretical overload are seen as the main deficits of design methods and their descriptions. In order to improve the description, selection and training of methods with relevance to current practice, an approach to describe design methods considering competencies and team aspects is presented. The proposed concept is based on requirements which were determined from a survey among experts from the industry as well as students.

Keywords: methods selection, methods description, competencies, teams

1 Stand der Forschung und Hintergrund

Neben Ergebnissen aus Befragungen in verschiedenen Unternehmen sowie von Studierenden zur praktischen Anwendung von Methoden werden in diesem Abschnitt bestehende Forschungsansätze zur Beschreibung, Bereitstel-

lung und Auswahl von Methoden vorgestellt. Aufgrund des Team- und Kompetenzbezugs des vorgeschlagenen Konzeptes werden zudem Arbeiten mit Kompetenzbezug bei (Entwicklungs-) Teams vorgestellt.

1.1 Methodeneinsatz in Industrie und Lehre

Die mangelnde Akzeptanz von Methoden in der industriellen Praxis wird derzeit vorwiegend durch die hohe Komplexität, den hohen Abstraktionsgrad sowie die Theorielastigkeit der Methodenbeschreibungen begründet [1], [2]. Darüber hinaus bieten viele Methoden nicht die nötige Anpassungsfähigkeit an reale Entwicklungssituationen, sodass der Implementierungsaufwand oftmals nicht den Nutzen rechtfertigt [3]. Zudem verhindern begrenzte personelle und zeitliche Kapazitäten oftmals eine korrekte Einführung bzw. Umsetzung von Methoden in der Industrie [4]. Die fehlende Berücksichtigung der Eigenschaften der jeweiligen Methodenanwender erschwert zudem eine individuelle Anpassung an den Methodennutzer bzw. an die Entwicklungssituation [5].

Auch die Ergebnisse von Befragungen im Rahmen der Bedarfsstudie Mu-Pro-KMU spiegeln die in der Literatur beschriebenen Defizite der praktischen Methodennutzung und mangelnde Akzeptanz wider. Bei rund 70 befragten Mitarbeitern aus 5 KMU aus der Region Braunschweig sowie einem Großunternehmen ist ein im Allgemeinen geringer Methodeneinsatz sowie ein geringes Methodenwissen ermittelt worden. Etwa die Hälfte der ca. 20 abgefragten Methoden, wie beispielsweise QFD oder Synektik, sind nicht bekannt oder werden nicht angewendet. Durchschnittlich nutzt jeder Mitarbeiter 4 bis 5 Methoden (ca. 20 % der abgefragten Methoden) selbst. Der Einsatz von Methoden erfolgt grundsätzlich eher selten. Entsprechend der Aussagen in der Literatur wurden als Teil der Befragung Barrieren festgestellt, die den Methodeneinsatz nach Ansicht der potentiellen Nutzer in der Praxis erschweren. Beispiele hierfür sind die fehlende Anpassungsmöglichkeit, die zu hohe Theorielastigkeit oder der zu hohe Zeitaufwand bei der Anwendung und Aneignung. Als häufigster Zweck des Methodeneinsatzes wurde die Lösungssuche sowie das anschließende Bewerten, Vergleichen und Entscheiden angegeben. Qualitäts- und Wissenssicherung sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden hingegen kaum als Zweck von Methoden angesehen. Darüber hinaus nutzen knapp drei Viertel der Befragten Methoden sowohl im Team als auch alleine, weshalb bei der Beschreibung und Vermittlung von Methoden eine Berücksichtigung dieses Aspekts hilfreich erscheint. Da außerdem die meisten Methoden aus dem Studium oder der Ausbildung bekannt sind (vgl. Bild 1), sollte insbesondere in dieser Phase die Methodenkompetenz gefördert werden, damit im späteren Berufsalltag dieses Wissen besser präsent ist. Gleiches gilt für die Kollegen, die als zweitwichtigste Wissensquelle angesehen werden.

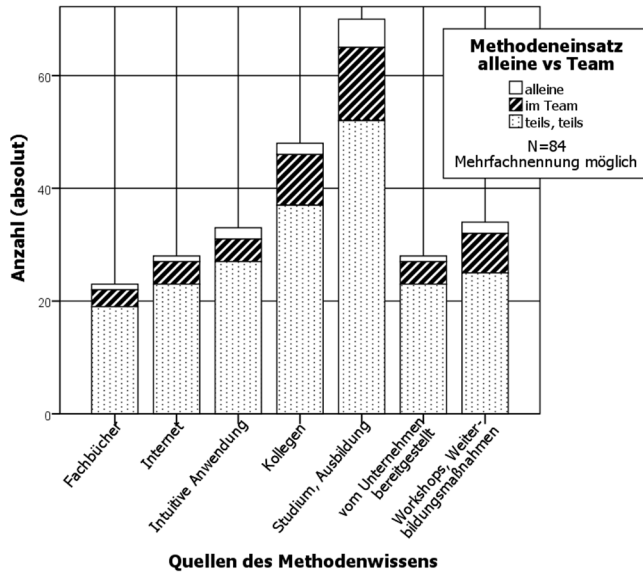


Bild 1: Angaben zu Quellen des eigenen Methodenwissens und der Arbeit im Team bzw. alleine

Die dargestellten Untersuchungen in der industriellen Praxis decken folglich ein Potential für methodischen Unterstützungsbedarf zur Steigerung der Effizienz und der Innovationsfähigkeit auf.

1.2 Wissenschaftliche Arbeiten

Da die Defizite der Methodenanwendung und -akzeptanz bereits länger bekannt sind, wurden in verschiedenen Arbeiten Ansätze verfolgt, um diese zu verringern. In Bild 2 ist ein Überblick über vorangegangene Forschungsarbeiten dargestellt. Die aufgeführten Ansätze wurden bezüglich ihres Beitrags zur Methoden-Thematik und zum Entwickler bzw. Entwicklungsteam hin analysiert. Insbesondere im Bereich der Methodenbeschreibungen und -sammlungen finden sich zahlreiche Autoren, jedoch ist ein Bezug auf den Entwickler und sein Team hierin nicht vorhanden. Im oberen Bereich des Diagramms sind wiederum Autoren mit starkem Kompetenz- oder Teambezug eingeordnet, die hingegen keine Verbindung zur Methodenthematik aufweisen. Lediglich in zwei untersuchten Arbeiten werden bei der Auswahl bzw. Anpassung von Methoden in Ansätzen die Methodenanwender berücksichtigt. Im Bereich der Methodenbeschreibungen und -sammlungen fehlt es dagegen an Forschungsarbeiten, die einen Teambezug herstellen.

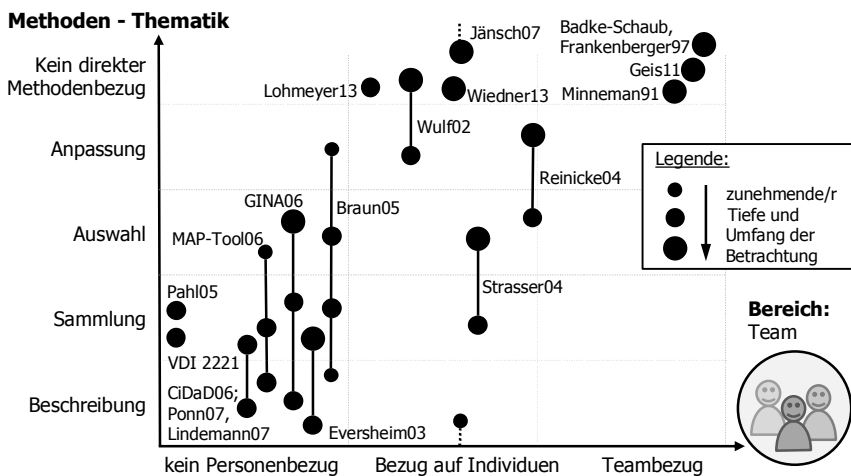


Bild 2: Überblick zum Stand der Forschung bezüglich der Methoden-Thematik und dem Bezug zum Entwickler bzw. zum Entwicklungsteam

1.2.1 Methodenbeschreibungen und -sammlungen

Methoden bilden einen wichtigen Bestandteil der Konstruktionsmethodik und werden seit den 60er Jahren [6] auf verschiedene Weise beschrieben und bereitgestellt. Ausgehend von unstrukturierten Beschreibungen innerhalb von Büchern ([6], [7]) wurden zahlreiche Modelle zur einheitlichen Darstellung von Methoden wie z.B. das Prozessorientierte Methodenmodell (PoMM) [8] entwickelt. Parallel zu diesen Beschreibungsmodellen hat mit dem technologischen Fortschritt ein Wandel des Mediums von Methodensammlungen in Papierform hin zu web-basierten Methodenportalen ([9], [10]) stattgefunden. In den verschiedenen Methodenportalen werden Suchfunktionen angeboten, um gezielt auf Methoden in einheitlichen und strukturierten Beschreibungen zuzugreifen. Im Allgemeinen werden die Methoden in Bezug auf Zweck bzw. Ziel, Vorgehen sowie zu den Voraussetzungen des Entwicklungsstandes beschrieben, wie beispielsweise dem Auftreten eines Fehlers oder dem Vorhandensein mehrerer zu bewertender Lösungen mit ähnlichem Detaillierungsgrad. Darüber hinaus erfolgt in der Regel ein Verweis auf weiterführende Literatur zu den einzelnen Methoden, vgl. [7].

Außer den Angaben zu Voraussetzungen werden in bestehenden Methodenbeschreibungen und -sammlungen die Einsatzbedingungen, unter denen die Methode angewendet werden kann, nicht oder kaum berücksichtigt. Zurzeit werden keine entsprechenden Attribute genutzt, die beispielhaft die er-

forderlichen Fähigkeiten des Entwicklers, wie Abstraktionsvermögen, zum erfolgreichen Methodeneinsatz beinhalten oder auf Unternehmensrestriktionen Bezug nehmen.

1.2.2 Methodenauswahl

Eine Vielzahl von Autoren beschäftigt sich ebenfalls mit der Auswahl für den Entwicklungskontext geeigneter Methoden. Grundsätzlich ist herauszustellen, dass web-basierte Methodensammlungen für die Auswahl von Methoden eine leichtere Handhabung bieten [11]. Dennoch seien zunächst die sogenannten Klassifizierungsdatenblätter von Strasser [12] zur Beschreibung von Methoden genannt, in denen verschiedene Methodencharakteristika und der Aufwand von Personal, Zeit, Schulung und Sachmitteln angegeben werden. Die Nutzbarkeit einzelner Methoden für Einzel- oder Gruppenarbeit ist ebenfalls in den Datenblättern in Form einer Checkbox enthalten. Somit wird über diese Angaben bereits ansatzweise ein Teambezug hergestellt. Durch die papierbasierte Form ist eine schnelle Auswahl über dieses Kriterium jedoch nur begrenzt möglich. Eine weitere Möglichkeit zur Berücksichtigung der Fähigkeiten des Methodenanwenders wird von Braun [13] durch die Unterteilung in *Methoden-Anfänger*, *Methoden-Fortgeschrittener* und *Methoden-Experte* vorgestellt. Je nach Methodenvorkenntnissen wird dem Anwender eine andere Art der Unterstützung angeboten.

Des Weiteren bietet das Methodenportal GINA-Methodos [10] sowohl prozess- als auch merkmalsbezogene Auswahlmöglichkeiten für Methoden. Wie bei den meisten Methodensammlungen ist auch hier ein Zugriff über einen alphabetischen Index vorhanden. Darüber hinaus kann über die Phasen im Produktentwicklungsprozess und über Grundtätigkeiten, wie *Lösungen bewerten*, eine Vorauswahl von Methoden getroffen werden. Als weitere Option steht die Auswahl über einen Methodenklassifizierungsbaum zur Verfügung. Somit werden wichtige Randbedingungen des Methodeneinsatzes in Bezug auf die Entwicklungsaufgabe berücksichtigt, Teamaspekte bzw. Anwenderaspekte werden jedoch kaum einbezogen.

1.2.3 Kompetenzen und Zusammensetzung von Entwicklungsteams

Unter spezieller Beachtung der Effizienz und des Innovationsvermögens eines Entwicklers oder eines Entwicklungsteams spielen die Fähigkeiten und Kompetenzen des Einzelnen eine bedeutende Rolle. Vor allem in Teams genügen nicht nur die Fachkenntnisse bzw. Fachkompetenzen. Vielmehr beeinflussen die Soft Skills der einzelnen Teammitglieder maßgeblich den Erfolg der Methodenanwendung. Kauffeld bspw. [14] beobachtet Teams im Meeting per

Videoaufzeichnungen und analysiert mithilfe des Kompetenzmodells, welches die vier Bereiche *Professionelle Kompetenz* (z.B. Lösungsvorschläge), *Methodenkompetenz* (z.B. Zeitmanagement), *Sozialkompetenz* (z.B. Aktives Zuhören) und *Selbstkompetenz* (z.B. Jammern) enthält, die Teamleistung, indem das Team mit anderen Vergleichsteams in Relation gesetzt wird. Basierend darauf werden Maßnahmen (z.B. Änderung im Kommunikationsstil) zur Steigerung der Teameffizienz und der Innovationskraft innerhalb der Meetings entwickelt. Ähnlich untersucht Badke-Schaub [15] kritische Situationen innerhalb von Entwicklungsteams. Zahlreiche weitere Autoren befassen sich mit der Kompetenz- und Teamthematik, die unter anderem zur Konstruktionsmethodik einen wichtigen Beitrag leistet. Ein direkter Bezug zu nötigen Kompetenzen bei der Anwendung von Methoden ist jedoch kaum zu finden.

2 Konzept

Ein wesentliches Defizit bestehender Ansätze liegt in der mangelnden Verknüpfung zwischen den wissenschaftlichen Arbeiten und der praktischen Anwendung in der Industrie [3]. Als Lösungsvorschläge werden in zukünftigen Forschungsarbeiten die Berücksichtigung verschiedener Disziplinen und das Einbinden der praktischen Anwender aus der Industrie in die Forschung (Opening up Design Methodology) gesehen (z.B. [11]). Bestehende webbasierte Methodensammlungen [9], [10] sind laut Gericke et al. ein Versuch, das Methodenwissen in der Industrie zu verbreiten. Verbesserungspotentiale ergeben sich insbesondere aufgrund des bisher statischen, generischen und vorwiegend disziplinspezifischen Aufbaus der Methodensammlungen. Hiervon ausgehend wird als Teil der aktuellen Forschungsarbeit am Institut für Konstruktionstechnik der Technischen Universität Braunschweig ein weiterentwickeltes Konzept für ein MethodenAssistenzSystem in Anlehnung an das bestehende GINA-Methodos-Portal vorgestellt. Bei diesem MethodenAssistenzSystem sollen besonders die Kompetenzen und Zusammensetzung von Entwicklungsteams berücksichtigt werden können. Als Grundlage für den Ansatz dient zum einen die Hypothese, dass der Entwickler und folglich das Entwicklungsteam, beispielsweise aufgrund ihres individuellen Faktenwissens oder ihrer Fähigkeiten, wesentlichen Einfluss auf den Entwicklungsprozess und somit auf den Erfolg der gesamten Produktentwicklung haben [16]. Folglich werden unter anderem die Fähigkeiten der Entwickler, bspw. die Fähigkeit zum abstrakten Denken, bei der Auswahl von Methoden berücksichtigt, wodurch zum anderen die von Badke-Schaub [5] beschriebenen Defizite derzeitiger Methodenbeschreibungen verringert werden. Auf diese Weise kann frühzeitig beurteilt werden, welche Methoden in der gegebenen Entwicklungssituation (Team, Aufgabe, Unternehmen und Produktidee) zielführend eingesetzt werden kann.

2.1 Anforderungen an Methodenbeschreibung und -Auswahl

Für die Entwicklung des Konzeptes zur Methodenbeschreibung und -auswahl werden Anforderungen zugrunde gelegt, die im Rahmen einer Bedarfsanalyse während der MuPro-KMU-Studie identifiziert wurden. Ausgehend von der Analyse kann geschlussfolgert werden, dass sich diese Anforderungen zwischen KMU und Großunternehmen nur unwesentlich unterscheiden. Darüber hinaus wurden auch von Studierenden vergleichbare Forderungen an eine methodische Unterstützung gestellt, sodass die Entwicklung eines gemeinsamen Konzeptes für verschiedene Anwendergruppen (KMU, Großunternehmen, Studierende) sinnvoll erscheint. Des Weiteren trägt die Entwicklung eines gemeinsamen Konzeptes den Befragungsergebnissen Rechnung, wonach der wesentliche Anteil des Methodenwissens aus dem Studium und der Ausbildung stammt (siehe Bild 1) und somit durch ein Methodenportal für alle Anwendergruppen eine langfristige Bindung erzielt werden kann.

Die wesentlichen Anforderungen der Anwender aus der Industrie an eine Methodenbeschreibung und -auswahl können in die in Tabelle 1 dargestellten Kriterien Verfügbarkeit, Komplexitätsgrad, anwendungsspezifische Flexibilität und Informationsumfang gegliedert und konkretisiert werden:

Tabelle 1: Anforderungen an Methodenbeschreibung und -auswahl

Verfügbarkeit	ständiger, digitaler Zugriff durch mehrere Nutzer gleichzeitig
Komplexitätsgrad	einfache Bedienbarkeit und strukturierter Aufbau für geringen Aufwand bei der Methodenaneignung
Anwendungsspezifische Flexibilität	Umsetzung einer Suchfunktion zur Berücksichtigung der Entwicklungsaufgabe, des Entwicklers bzw. des Entwicklungsteams sowie der Randbedingungen aus dem Unternehmen und des Produkts
Informationsumfang	Anwendungshinweise, produktbezogene Beispiele, Erfahrungsberichte bzw. Kommentarfunktion, Tutorials und Definitionskataloge zur Beschreibung der Methoden

2.2 Konzept für ein MethodenAssistenzSystem

Die Umsetzung basierend auf den ermittelten Anforderungen erfolgt zunächst in Form eines MethodenBeschreibungsModells, das als eine vereinheit-

lichte Darstellungsform zur Beschreibung, Charakterisierung und Illustration von Methoden definiert wird. Dieses Modell umfasst zum einen Kernattribute, die der Beschreibung der Methode selbst dienen, und zum anderen Randattribute zur Beschreibung der Randbedingungen sowie des Methoden-In- und Outputs. Dieses MethodenBeschreibungsmodell dient als Grundlage für das im Folgenden vorgestellte Konzept eines MethodenAssistenzSystems, in welchem die Methoden in Form eines einheitlich und strukturiert aufgebauten Modells (vgl. Bild 3) hinterlegt werden.

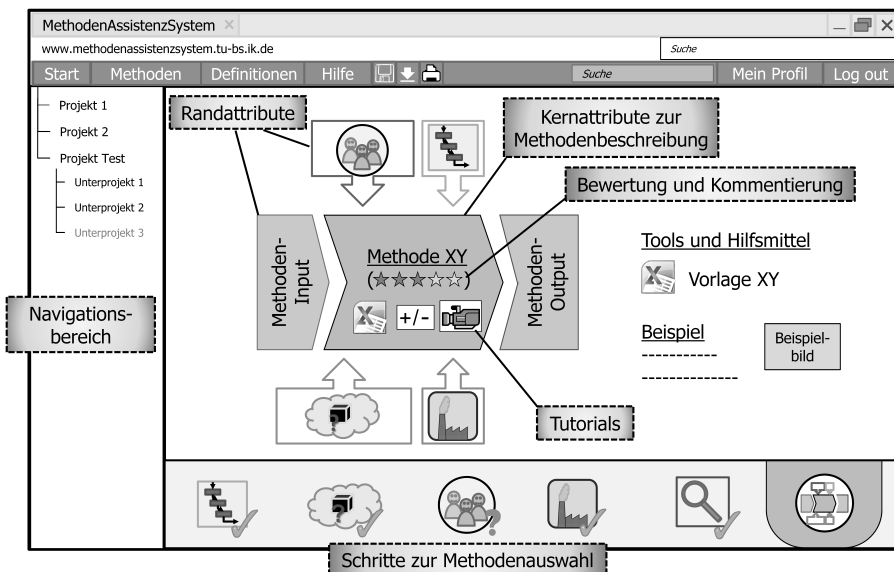


Bild 3: Konzeptionelle Darstellung des geschlossenen Bereichs des MethodenAssistenzSystems als webbasierte Methodensammlung

Zusätzlich zu herkömmlichen Beschreibungen mit Zielsetzung und Vorgehen der Methode werden Arbeitsvorlagen beispielsweise als Excel-Arbeitsblätter sowie kurze Tutorials zur schnellen Aneignung der Methode bereitgestellt. Des Weiteren werden in den Randattributen mögliche Restriktionen durch das Unternehmen (z.B. Größe oder Branche), die Entwicklungsaufgabe, die Produktidee (z.B. Art der Konstruktion, Produktkomplexität) sowie den Entwickler bzw. das Entwicklungsteam hinterlegt. Diese Attribute unterscheiden sich von den Kernattributen der Methoden (z.B. Zielsetzung, Vorgehen) dadurch, dass sie die Auswahl der Methoden durch den Anwender unterstützen. Zur Ergänzung und Veranschaulichung sind praxisnahe Beispiele für den Einsatz der Methode vorhanden, die je nach Vorauswahl beispielsweise der Branche angepasst werden können.

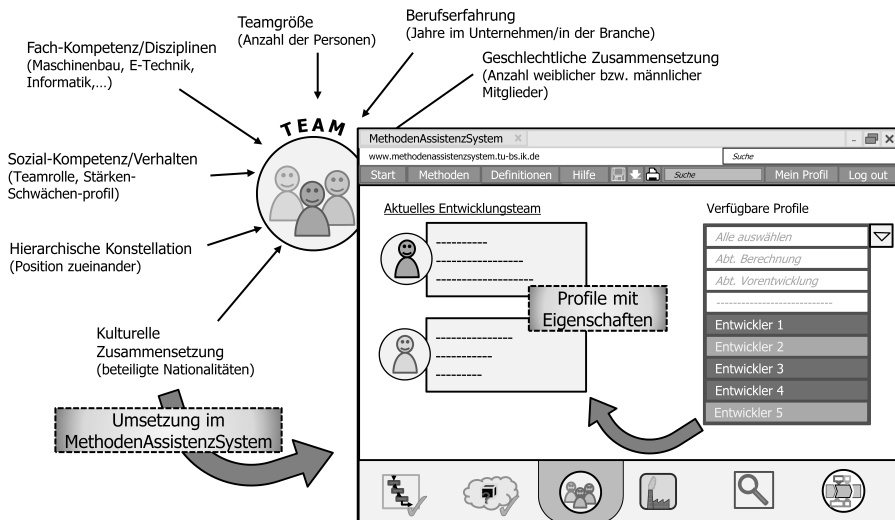


Bild 4: Einflüsse auf die Methodenauswahl durch das Entwicklungsteam und Umsetzung der Teamzusammensetzung im MethodenAssistenzSystem

Das vorgeschlagene Konzept für ein MethodenAssistenzSystem verfügt über mehrere Nutzersichten, sodass zum einen ein öffentlicher Bereich und zum anderen ein geschützter Bereich umgesetzt werden soll, innerhalb dessen Profile für die Nutzer angelegt werden. Der öffentliche Bereich bietet freien Zugang zur Methodensammlung, jedoch nur eingeschränkte Möglichkeiten bei der Methodenauswahl. Im geschützten Bereich hingegen können für die Selektion von Methoden und die Teamzusammensetzung relevante Informationen (z.B. Geschlecht und Berufserfahrung) vom Nutzer selbst durch das Anlegen eines Nutzerprofils hinterlegt werden. So kann durch eine im MethodenAssistenzSystem integrierte Abfrage, z.B. mithilfe des Belbin-Tests oder Selbsteinschätzungen, ein Teamrollen- und Kompetenz-Profil erstellt und im nutzerspezifischen Profil gespeichert werden. Diese Profile können zum Teil die in Bild 4 gezeigten Faktoren beinhalten, sodass bei der Auswahl einer Methode zunächst das Team als beeinflussende Randbedingung festgesetzt werden kann, z.B. hinsichtlich vorhandener Fachkompetenzen oder sozialer Kompetenzen. Der Teamleiter hat die Möglichkeit, die von den einzelnen Entwicklern angelegten Nutzerprofile für den Auswahlschritt zu einem Team zusammenzufügen (vgl. Bild 4). Ebenso können Voreinstellungen in Bezug auf Randbedingungen des Unternehmens, beispielsweise die Branche oder Größe, oder der zu entwickelnden Produkte vorgegeben werden. Da der Entwickler in der Regel Anpassungen oder Varianten entwickelt statt vollständig neue Pro-

dukte, kann durch das Hinterlegen gleichbleibender Randbedingungen die Methodensuche erheblich vereinfacht werden.

Darüber hinaus soll die Möglichkeit zur Bewertung und Kommentierung der Methoden bestehen, sodass Erfahrungen einzelner Anwender ausgetauscht werden können. Auf diese Weise lassen sich gut praktikable Methoden hervorheben und bei den weniger beliebten Methoden finden sich Hinweise auf die konkreten Probleme mit dieser Methode. Als weiterer Unterstützungsbedarf ist ein Definitionskatalog im Rahmen der Befragung als wichtig erachtet worden, weshalb eine Umsetzung innerhalb des MethodenAssistenz-Systems angestrebt wird. Vor allem Studierende unterstützt ein solcher Katalog bei der Aneignung von Methodenwissen.

2.3 Methodenauswahl

Besonderer Fokus liegt beim vorgestellten Konzept auf der Auswahl von für das Entwicklungsteam geeigneten Methoden. Hierzu ist ein MethodenAuswahlModell entwickelt worden, das durch eine Vorfilterung den gezielten Zugriff auf die im MethodenBeschreibungsModell hinterlegten Methoden ermöglicht, um so dem Anwender gemäß seiner Anfrage passende Methoden als Empfehlung auszugeben (Bild 5).

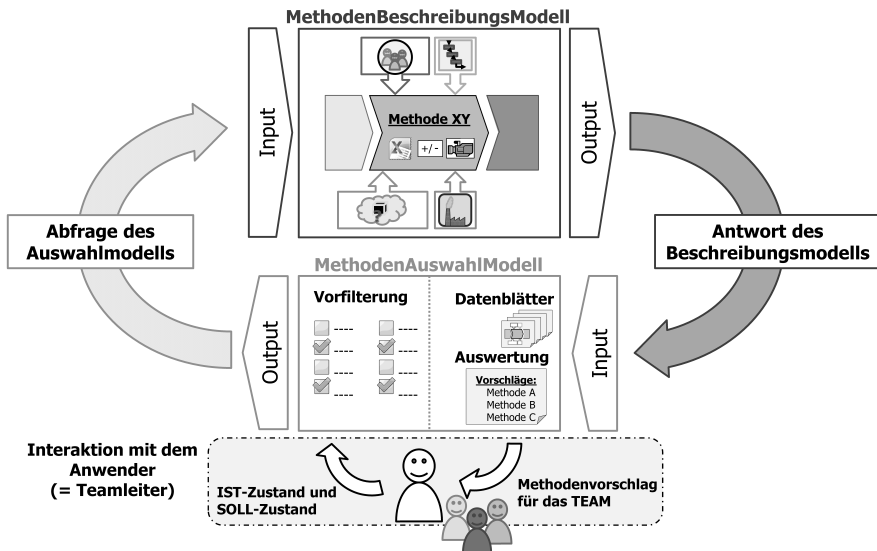


Bild 5: Interaktion zwischen dem MethodenBeschreibungsModell und dem MethodenAuswahlModell

Die Initiierung erfolgt zunächst durch die Vorgaben des Anwenders bzw. des Teamleiters oder Entwicklers, der durch die Angaben zum IST-Zustand der Entwicklungssituation eine Vorfilterung durchführt. Mit den selektierten Vorfilterkriterien wird die Abfrage des Auswahlmodells an das Beschreibungsmodell gestartet. Das Beschreibungsmodell wiederum gibt als Antwort alle den Vorfilterkriterien entsprechenden Methodendatenblätter aus, d.h. Methoden mit ihren vollständigen Beschreibungen. Diese werden im nächsten Schritt im Auswahlmodell hinsichtlich weiterer Kriterien ausgewertet. Die als der Vorgabe des Anwenders entsprechend bewerteten Methoden werden als Vorschlag für den Entwickler oder das Entwicklungsteams ausgegeben. Die endgültige Wahl der Methode bleibt weiterhin in der Verantwortung des Teamleiters bzw. Entwicklers, genauso wie die Aneignung im Falle der Auswahl einer unbekanntenen Methode. Die im Beschreibungsmodell hinterlegten Informationen und Hilfsmittel können hierbei lediglich unterstützen.

3 Zusammenfassung und weitere Arbeiten

Ausgehend von der fehlenden Verknüpfung von Forschung und industrieller Praxis im Bereich des Methodeneinsatzes wurde als Mittel der gegenseitigen Unterstützung das Konzept eines MethodenAssistenzSystems vorgestellt. Dieses Konzept basiert auf Anforderungen an eine methodische Unterstützung, die bei verschiedenen Anwendergruppen erfasst wurden. Im Fokus des MethodenAssistenzSystems stehen das Team bzw. die Entwickler mit ihren sozialen und fachlichen Kompetenzen, deren Abfrage innerhalb des MethodenAssistenzSystems entwickelt wird. Gleichzeitig werden die einzelnen Methoden bezüglich kompetenz- und erfahrungsrelevanter Aspekte bewertet und im MethodenBeschreibungsModell hinterlegt. Zur Ermittlung der für eine bestimmte Methode nötigen Fähigkeiten und Kompetenzen wurden in einem Pilotprojekt in Kooperation mit dem Institut für Nachrichtentechnik, Abt. Signalverarbeitung, und dem Institut für Psychologie, Abt. Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie, der TU Braunschweig studentische Entwicklungsteams über mehrere Monate per Video und Audio beobachtet. Gegenstand zukünftiger Untersuchungen werden unter anderem die Teamzusammensetzung und einzelne Kompetenzen speziell bei der Methodenanwendung sein, um hieraus Empfehlungen für die Teamzusammensetzung aus den im MethodenAssistenzSystem hinterlegten Profilen zu ermitteln. Auf diese Weise wird nicht nur eine geeignete Methode für ein vorhandenes Team sondern auch ein für die Methode geeignet zusammengesetztes Team vorgeschlagen werden können. Zur Absicherung des vorgeschlagenen Konzeptes werden im Anschluss an die MuPro-Studie interessierte Teilnehmer aus der Industrie im Rahmen von Workshops um Feedback gebeten werden.

Literatur

- [1] Jänsch, J.: "Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz", Dissertation, VDI, Düsseldorf, 2007.
- [2] Reinicke, T.: "Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung", Dissertation TU Berlin, Berlin, 2004.
- [3] Wallace, K.: "Transferring Design Methods into Practice", In: Birkhofer, H.: "The Future of Design Methodology", Springer, Berlin, 2011.
- [4] Geis, C. et al.: "Methods in Practice – A Study on Requirements for Development and Transfer of Design Methods". In: Proc. of the Int. Design Conf. – DESIGN 2008, Dubrovnik, 2008, S. 369-376.
- [5] Badke-Schaub, P. et al.: "Towards a Designer-Centred Methodology: Descriptive Considerations and Prescriptive Reflections", In: Birkhofer, H.: "The Future of Design Methodology", Springer, Berlin, 2011.
- [6] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [7] Lindemann, U.: "Methodische Entwicklung technischer Produkte", Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [8] Birkhofer, H. et al.: "Cleaning up Design Methods – Describing Design Methods completely and standardised", In: Proc. of the Int. Design Conf. – DESIGN 2002, Dubrovnik, 2002, S. 17-22.
- [9] Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München: CiDaD - Competence in Design and Development, <http://www.cidad.de/portal>.
- [10] Institut für Konstruktionstechnik, TU Braunschweig: Verbundprojekt GINA, <http://www.gina-net.de>.
- [11] Gericke, K. et al.: "Opening up Design Methodology", In: Proc. of the Int. Workshop on the Future of Trans-Disciplinary Design 2013, Luxemburg, 2013.
- [12] Strasser, C.: "Einsatz von Methoden in der Produktentwicklung – Ein Beitrag zur praxisgerechten Auswahl und Anwendung", Dissertation TU Wien, Wien, 2004.
- [13] Braun, T.: "Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld", Dissertation, Verlag Dr. Hut, München, 2005.
- [14] Kauffeld, S.; Montasem, K.: "Ein Kompetenzmodell als Basis", Coaching Magazin, Ausgabe 04/2009, 2009, S.44-49.
- [15] Badke-Schaub, P. et al: "Management Kritischer Situationen: Produktentwicklung erfolgreich gestalten ", Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [16] Dylla, N.: "Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren", Dissertation TU München, München, 1991.

Der Einsatz von Gaußprozessen zur Beschleunigung der automatischen Wissensakquisition

Thilo Breitsprecher, Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg*

Knowledge acquisition is the bottleneck in the process of developing and maintaining knowledge based systems and can be performed in a direct, indirect or automatic manner. While direct and indirect methods depend on the presence of experts and knowledge engineers, the automatic approaches depend on data e.g. from parameter variation studies. The data is later used in a KDD-process (knowledge discovery in databases) that can train useful prediction models. Here a conflict arises: More data will increase the reliability of the prediction model but will also increase the costs and the time necessary for the variation study. This paper reports about the utilization of gaussian process based machine learning that can handle the described conflict by enabling an adaptive sampling of training data.

1 Problemstellung und Zielsetzung

Das „Wissensbasierte Konstruieren“ – kurz KBE für Knowledge Based Engineering – stellt hilfreiche Methoden und Werkzeuge bereit, auf die Konstrukteure zurückgreifen können, um Konstruktionsprozesse zu standardisieren und zu beschleunigen. Wissensbasierte Anwendungen zeigen unterschiedliche Ausprägungen. Sie reichen von einfachen Makros im CAD-System bis hin zu wissensbasierten Systemen mit umfangreichen Funktionen, die außerhalb eines CAD-Systems betrieben werden. Einen wichtigen Bestandteil wissensba-

sierter Systeme (KBS für Knowledge Based System) stellt die Wissensbasis dar, die zunächst bei der Entwicklung des KBS aufgebaut und während des anschließenden Betriebs fortlaufend gewartet und aktualisiert werden muss. Für den dabei zu durchlaufenden Prozess der Wissensakquisition, der nach HAYES-ROTH als „Flaschenhals“ bei der Entwicklung eines KBS angesehen werden kann, stehen direkte, indirekte und automatische Methoden zur Verfügung [3, 10].

Die automatischen Methoden werden im Allgemeinen unter dem Kürzel KDD (englisch für knowledge discovery in databases) zusammengefasst und dem Bereich des maschinellen Lernens zugeordnet. Ziel ist das Trainieren von prädiktiven Modellen auf der Basis experimenteller oder simulativer Daten. Die Vorhersagemodelle repräsentieren das konstruktionsrelevante Wissen in Form von Formeln, Regeln oder Regressionsbäumen. Mit diesen kann der Konstrukteur beispielsweise die Fertigungsgerechtigkeit von Bauteilwürfen bereits in einer frühen Entwurfsphase abschätzen. [1, 10]

Ein KDD-Prozess liefert im Allgemeinen bessere Vorhersagemodelle, je mehr Versuchsdaten im Training zur Verfügung stehen [2]. Dies setzt jedoch einen höheren Umfang an Simulationen und Experimenten voraus, was zwangsläufig zu höheren Kosten und zu einem längeren Wissensakquisitionsprozess führt. Ziel der in diesem Beitrag beschriebenen Forschungsarbeit ist daher die Beschleunigung dieses Prozesses durch eine adaptive Versuchsdatenerhebung (Sampling), deren Grundlage sogenannte Gaußprozesse bilden.

2 Der Einsatz von Gaußprozessen im maschinellen Lernen

Gaußprozesse können als mehrdimensionale Gaußverteilungen über unendlich viele Zufallsvariablen verstanden werden, wobei jede endliche Untermenge an Zufallsvariablen normalverteilt ist. Ein Gaußprozess ist als stochastischer Prozess durch eine Mittelwert- (m) und eine Kovarianzfunktion (k) vollständig definiert, die im eindimensionalen Fall als Skalare abgebildet sind. Im Allgemeinen lässt sich für eine Funktion f , die durch einen Gaußprozess definiert ist, schreiben: $f \sim GP(m, k)$. Die Mittelwertfunktion spiegelt die Annahme über den generellen Verlauf der Funktion f (z. B. linear, quadratisch, exponentiell) wider, die Kovarianzfunktion beschreibt den Einfluss zweier Datentupel. Anhand eines Beispiels soll die Funktionsweise von Gaußprozessen kurz beschrieben werden. Ein beliebiger Gaußprozess sei wie folgt definiert:

$$m(x) = \frac{1}{4}x^2 \text{ and } k(x, x') = \exp\left(-\frac{1}{2}(x - x')\right)$$

Um das Verhalten des sich ergebenden stochastischen Prozesses darzustellen, werden n Stichproben an verschiedenen Stellen x_i gezogen und dargestellt. Das zufällige Verhalten eines Gaußprozesses kann der oberen Gleichung nicht entnommen werden. Für $n = 3$ ergibt sich das Bild 1.

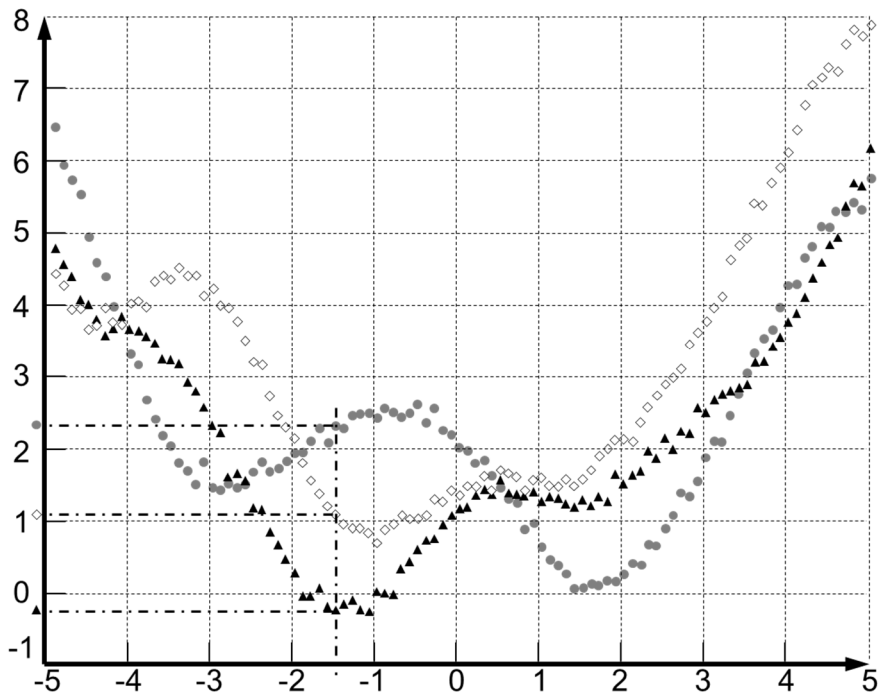


Bild 1: Drei aus einem Gaußprozess gezogene Stichproben mit einer beispielhaften Auswertung an der Stelle $x_i = -1,5$. Mehr Stichproben wären möglich, jedoch würde darunter die Darstellung leiden.

Obwohl leicht der Eindruck entsteht, es handle sich hierbei um drei Funktionsverläufe, sollten die Punktwolken nicht derart interpretiert werden. Trefender ist die Vorstellung von lokalen Gaußverteilungen (mit je $n = 3$ Stichproben) an verschiedenen Stellen x_i . Für $x_i = -1,5$ besteht diese lokale Verteilung aus den Werten $f(x_i) = [-0,8; 1,1; 2,3]$ und für größere Werte von n entsprechend aus mehr Einträgen. Das Trainieren eines Gaußprozesses mithilfe von Versuchs- oder Simulationsdaten beginnt mit der Festlegung eines sogenannten Priors aus Mittelwert- und Kovarianzfunktion. Dieser ist notwendig, um zunächst Annahmen über die Eigenschaften eines stochastischen Prozesses zu treffen und zwar unabhängig von den Trainingsdaten. Der Ver-

lauf der Punktwolken in Bild 1 lässt beispielsweise die Annahme zu, der zugrundeliegende Zusammenhang sei quadratisch. Durch das Training des Gaußprozesses wird aus dem Prior ein Posterior der die passende Mittelwert- und Kovarianzfunktion beinhaltet. Die Eigenschaften des Posteriors können durch sogenannte Hyperparameter beeinflusst werden. Wird im Sinne der Anschaulichkeit auf eine korrekte mathematische Formulierung verzichtet, so ist die zentrale Problemstellung beim maschinellen Lernen mit Gaußprozessen geeignete Werte für die Hyperparameter zu finden. [7]

Wie lässt sich nun der Bezug zum allgemeinen maschinellen Lernen herstellen? Das Ziel des maschinellen Lernens an sich stellt sich wie folgt dar: Durch eine Parameterstudie mit z Durchläufen ergibt sich ein Simulations- oder Versuchsdatensatz D mit z Zeilen. Jede Zeile enthält eine Kombination der Eingangsparameter X sowie die sich für diese Einstellung ergebende Zielgröße Y . $D = \{(X; Y) | i = 1, \dots, z\}$ ist somit das Trainingsdatenset und die Basis für ein zu trainierendes Vorhersagemodell $F(X^*) = Y^*$, mit dem für nicht in D enthaltene Parameterkombinationen X^* der zu erwartende Wert für die Zielgröße Y^* vorhergesagt werden soll. Eine solche Vorhersage mithilfe des Posteriors kann sich folgendermaßen vorgestellt werden: Unter der Annahme, dass die Trainingsdaten für den Gaußprozess in Bild 1 kein Datentupel an der Stelle $x_i = -1,5$ enthalten haben, soll nun der Wert für $f(x_i) = y^*$ vorhergesagt werden. Dieser Wert ergibt sich in diesem einfachen Beispiel durch das arithmetische Mittel aller Stichproben aus dem stochastischen Gaußprozess, also $f(x_i) = \overline{[-0,8; 1,1; 2,3]} = 0,86$. Bei einer vollständigen Auswertung des Gaußprozesses an dieser Stelle, wird der Mittelwert jedoch nicht aus drei, sondern aus einer unendlichen Anzahl von Funktionswerten gebildet. Es ist zu erkennen, dass für andere Werte von x_i sich auch die vorhergesagten Werte für Y^* ändern. Neben der reinen Vorhersage des Funktionswerts (Mittelwert) lässt sich durch den Gaußprozess auch ein Konfidenzintervall angeben, in dem die Vorhersage liegt. Hierzu wird aus der Stichprobe (mit theoretisch unendlichem Umfang) die Standardabweichung berechnet, die wie der Mittelwert von x_i abhängt. Für das einfache Beispiel mit drei Stichproben ergibt sich eine Standardabweichung von $\sigma_i = 1,27$. Der zu erwartende Wert für Y^* wird also mit 68,3%-iger Wahrscheinlichkeit in einem Intervall von $\pm 1,27$ um den vorhergesagten Mittelwert liegen.

Dies ist als Vorhersagegenauigkeit oder Performanz des Vorhersagemodells zu interpretieren. Sinkt der Wert der Standardabweichung, so erhält der Konstrukteur durch den Gaußprozess eine verlässlichere Vorhersage für den Wert der Zielgröße. Im Gegensatz zu Vorhersagemodellen wie Regressionsbäumen, künstlichen neuronalen Netzen oder linearen Regressionsmodellen, deren Performanz durch eine Kreuzvalidierung [5, 11] global berechnet wird,

erfolgt die Performanzbestimmung bei Gaußprozessen lokal: Für jedes x_i wird sich im gesamten Wertebereich der Systemparameter eine andere Genauigkeit (Standardabweichung σ_i) ergeben. Diese Eigenschaft der Gaußprozesse wird im folgenden Ansatz für das adaptive Sampling genutzt.

3 Adaptives Sampling mithilfe von Gaußprozessen

Wie bei jedem Regressionsverfahren gilt auch für Gaußprozesse, dass die Vorhersagegenauigkeit steigt, wenn mehr Trainingsdaten zur Verfügung stehen. In der Nähe bereits gelernter Datentupel ist die Vorhersage genauer, mit steigendem Abstand sinkt sie. Um die Stelle mit der höchsten Ungenauigkeit zu finden, wird auf eine einfache, aber sehr effiziente Vorgehensweise zurückgegriffen, die auf Arbeiten von [8, 9] basiert. Zunächst wird eine kleine Menge an Simulationen oder Experimenten durchgeführt, die den „Startversuchsdatensatz“ D_{Start} liefern. Dieser ist noch nicht adaptiv gesampelt, da jede Einstellung für die Systemparameter vorgegeben wird. Hierfür bieten sich teilfaktorielle, Screening- oder LHS-Versuchspläne an. Mit D_{Start} wird ein erster „Startgaußprozess“ trainiert. Im Wertebereich dieses Gaußprozesses werden mittels Latin Hypercube Sampling (LHS) [4] j Kombinationen von Systemparametern erzeugt, die gleichverteilt vorliegen. Hierfür sind u. U. entsprechende Befehlsaufrufe (MATLAB) notwendig, da LHS-Stichproben standardmäßig normalverteilt gezogen werden. Es kann an dieser Stelle sinnvoll sein, den zulässigen Wertebereich für die LHS-Stichproben etwas geringer zu halten als den des Gaußprozesses, da erfahrungsgemäß alle Vorhersagemodelle an ihren Rändern enorm große Ungenauigkeiten aufweisen, unabhängig vom Umfang des Trainingsdatensatzes. Für den Stichprobenumfang bietet sich der Wert $j = 1000$ als Kompromiss zwischen Rechenleistung und gleichmäßiger Abdeckung des Wertebereiches an. Der zuvor trainierte Gaußprozess wird nun an j Stellen mit den entsprechenden Einstellungen der Systemparameter ausgewertet und für jede Stelle erfolgt die Angabe einer Vorhersage und der Varianz. Aus diesen j Kombinationen von Systemparametern, Vorhersage und Varianz wird nun diejenige identifiziert, bei der die Varianz den höchsten Wert aufweist. Mit den jeweiligen Systemparameterwerten erfolgt die Durchführung einer einzelnen Simulation oder eines Experiments. Der ursprüngliche Versuchsdatensatz D_{Start} wird um den Wert der sich ergebenden Zielgröße und die Werte der Systemparameter erweitert. An dieser Stelle beginnt das Vorgehen (Gaußprozess trainieren, j LHS-Stichproben ziehen, finden der Stichprobe mit maximaler Varianz, Simulation oder Experiment durchführen) erneut und wird erst bei einem vorher definierten Kriterium abgebrochen. Als mögliche Kriterien bieten sich die Anzahl der adaptiv ermittelten Versuchsdaten oder ein unterer Schwellwert für die Varianz an, beispielsweise 5% des vorhergesagten (Mittel-)wertes.

4 Beschreibung eines Anwendungsfalls

Für die Demonstration des adaptiven Samplings wird ein Modell herangezogen, welches die Kontaktspannung zwischen den Zähnen einer Synchronring-Sperrverzahnung und der Schiebemuffe (Bild 2) während des Schaltvorgangs simuliert. Das FE-Modell ist vollständig parametrisiert, so dass die Modell- bzw. Systemparameter (Zahngeometrie) variiert und deren Einfluss auf die Zielgröße (Kontaktspannung) im Rahmen von Simulationsstudien erfasst werden können. Von den 18 Geometrieparametern werden die Größen Dachwinkel, Kontaktflächenlänge, Fasenwinkel und Überlappung der Zähne für diesen Anwendungsfall als zu untersuchende Parameter festgelegt.

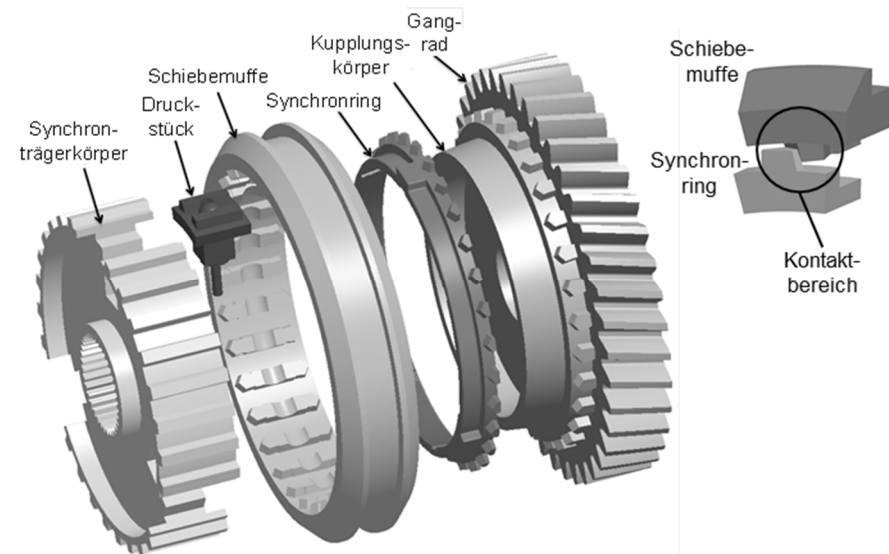


Bild 2: Synchronring und Schiebemuffe sowie der Kontaktbereich in der Vergrößerung

Für diese Systemparameter wird zunächst ein LHS-basierter Versuchsplan mit 100 Versuchen aufgestellt und die auftretende Kontaktspannung für all diese Einstellungen ermittelt. Mit diesem Trainingsdatensatz wird ein Referenzgaußprozess trainiert und dessen Vorhersagegenauigkeit über eine zehnfache Kreuzvalidierung bestimmt. Als Fehlerkennwert wird die Wurzel des mittleren Fehlerquadrats genutzt. Auf die Kreuzvalidierung wird an dieser Stelle zurückgegriffen, da dies die robusteste Methode ist, um die Performanz eines Vorhersagemodells zu bestimmen [11].

Als Grundlage für das adaptive Sampling dient ein LHS-Versuchsplan mit 10 gleichverteilten Versuchspunkten und unterschiedlichen Einstellungen für die vier oben genannten Geometrieparameter. Basierend auf diesem Datensatz werden 90 weitere Datentupel entsprechend des zuvor beschriebenen Vorgehens hinzugefügt. Nach jeder Iteration wird für den jeweiligen Gaußprozess die Performanz durch eine zehnfache Kreuzvalidierung bestimmt und in ein Diagramm eingetragen. Dieses Diagramm ist in Bild 3 dargestellt.

Das Ergebnis kann folgendermaßen interpretiert werden: Zum einen liefern 100 adaptiv erzeugte Trainingsdatentupel (also 10+90) einen Gaußprozess mit einer um ca. 5% verbesserten Vorhersagegenauigkeit, zum anderen erreichte der adaptive Gaußprozess bereits nach ca. 70 Simulationen (also 10+60) die gleiche Vorhersagegenauigkeit wie der nicht-adaptive Referenzgaußprozess nach 100 Simulationen. Es ließe sich somit in diesem Fall der Versuchsumfang um ca. 30 Simulationen reduzieren, was vor allem bei umfangreichen Rechnungen zu Zeit- und Kostenersparnissen führt.

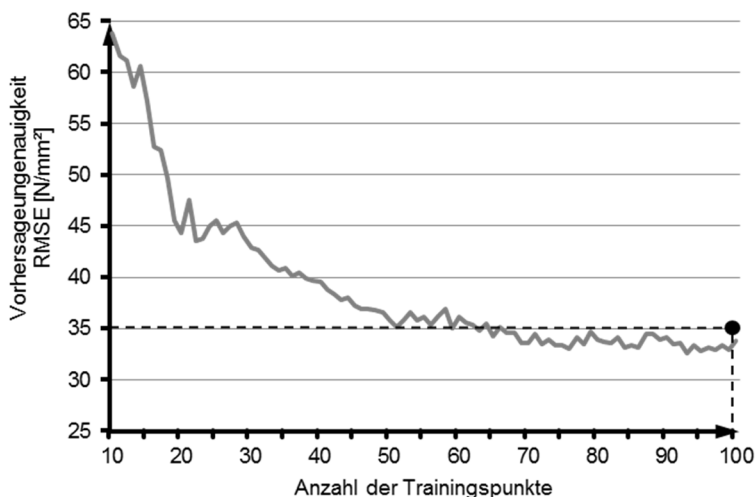


Bild 3: Vergleich der Ungenauigkeit des Referenzgaußprozesses mit 100 Trainingsdatentupel (Punkt) und des „adaptiv“ gelernten Gaußprozesses (Kurve)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag präsentierte Vorgehensweise unterstützt den Prozess der automatischen Wissensakquisition durch eine adaptive Erhebung von Versuchsdaten, die zum Trainieren von Vorhersagemodellen verwendet werden. Im Gegensatz zu deterministischen Werkzeugen wie voll- oder teilfaktoriellen Versuchsplänen werden die Einstellungen des zu simulierenden Systems vor jeder weiteren Simulation (adaptiv) festgelegt. Grundlage des präsentierten Ansatzes sind Gaußprozesse, eine spezielle Art stochastischer Prozesse. Sie werden im Rahmen des maschinellen Lernens eingesetzt und ermöglichen die Vorhersage von Zielgrößen auf der Basis eines Trainingsdatensatzes. Die Vorhersagegenauigkeit wird bei Gaußprozessen nicht global, beispielsweise durch Kreuzvalidierung, bestimmt. Sie ergibt sich lokal aus der „Funktionsweise“ eines Gaußprozesses. Diese Eigenschaft wird für das adaptive Sampling genutzt, indem die Stelle mit der geringsten Genauigkeit im Wertebereich des Gaußprozesses gesucht und dort ein neues Simulationsdatentupel eingefügt wird. Der Ansatz wurde kurz exemplarisch anhand einer FEM-Simulation vorgeführt und eine Reduzierung des Versuchsumfangs um 20% erreicht.

In weiterführende Arbeiten wird zum einen der Einsatz von Gaußprozessen für das maschinelle Lernen verbessert. Insbesondere bei der Auswahl des Priors kann der Benutzer mehr Unterstützung erfahren und bessere Ergebnisse erzielen. Weiterhin müssen Gaußprozesse für die Verarbeitung diskreter Systemparameter (z. B. Werkstoffklassen, Stufeneinstellungen) werden, was ihr Einsatzgebiet noch weiter vergrößert.

Danksagung

Die Autoren danken an dieser Stelle der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Teilprojekte B1 „Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems“ im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio 73 sowie Herrn Andreas Meinel, M.Sc., für die Unterstützung bei den hier vorgestellten Arbeiten.

Literatur

- [1] Breitsprecher, T., Wartzack, S., "Architecture and realization of a self-learning engineering assistance system for the use within sheet-bulk metal forming", Proceedings of the 9th Norddesign, Kyvsgård Hansen, P.; Rasmussen, J.; Jørgensen, K. A.; Tollestrup, C. (Hrsg.), Aalborg University, Dänemark, 2012, S. 79-86.
- [2] Breitsprecher, T.; Kestel, P.; Dingfelder, C.; Wartzack, S.: Gaussian Process based approach for automatic knowledge acquisition. Proceedings of the 13th International Design Conference 2014, S. 1733-1740.
- [3] Hayes-Roth, F.: Building expert systems. Addison-Wesley: London, 1983
- [4] Iman, R. L.: Latin Hypercube Sampling. Everitt, B. S.; Melnick, E. L. (Hrsg.): Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment. John Wiley & Sons: Hoboken, 2008.
- [5] Küstner, C.; Breitsprecher, T.; Wartzack, S.: Die Auswirkung der Reihenfolge von Mess- und Simulationsdaten auf das Ergebnis der Kreuzvalidierung in KDD Prozessen. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 24. DfX-Symposium 2013, 19.-20. September 2013, Jesteburg, 2013, S. 175-186.
- [6] Luft, T.; Breitsprecher, T.; Roth, D.; Lindow, K.; Wartzack, S.; Binz, H.: Die Rolle des Wissensingenieurs im Unternehmen - Ergebnisse einer Umfrage und Darstellung in der VDI-Richtlinie "Wissensbasiertes Konstruieren". Design for X. Beiträge zum 23. DfX-Symposium 2012, Tu-Tech Verlag, 2012, S. 63-78.
- [7] Rasmussen, C. E.; Williams, C. K. I.: „Gaussian Processes for Machine Learning“, The MIT Press, Massachusetts (USA), 2006.
- [8] Seo, S.; Wallat, M.; Graepel, T.; Obermayer, K.: Gaussian process regression: Active data selection and test point rejection. *Mustererkennung 2000*. Springer: Berlin Heidelberg, 2000, S. 27-34.
- [9] Gramacy, R.: Parameter space exploration with Gaussian process trees. Ad-vancement Proposal, University of California Santa Cruz, 2004.
- [10] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt Management der CAD-Technik. Carl-Hanser Verlag: München, 1997.

-
- [11] Witten, I. H.; Eibe, F.: Data Mining – Practical Machine Learning Tools and Techniques. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2005.

Vorgehensweise zur Identifikation von Potenzialen für Wissensmanagementunterstützungen in der Produktentwicklung

Alexander Laukemann, Hansgeorg Binz, Daniel Roth
*Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design;
Universität Stuttgart*

Abstract

In the research field of knowledge-based product development, a variety of knowledge management methods is available. Some of these approaches and concepts currently enjoy high attention in research and industry, but lack practical applicability. They don't find acceptance in the business environment. One of the reasons for this deficit is that some knowledge management methods are often considered of use across all business processes and have been designed for a comprehensive perspective. The introduced approach considers only the knowledge-intensive product development process. The information flows and knowledge transformations within the process are represented through a knowledge modeling language. The key advantage of the presented procedure is that the optimisation potential can be located exactly in the process and in addition, the emergence of knowledge flows are recognised as part of the process.

*Keywords: knowledge-based product development,
knowledge modeling language,
knowledge-based engineering,
knowledge management*

1 Einleitung

Seit Nonaka und Takeuchi [1] Mitte der neunziger Jahre die Organisation der Ressource Wissen im unternehmerischen Kontext dargestellt haben, sind zahlreiche Ansätze und Methoden zum Wissensmanagement entstanden. Das wesentliche Ziel dieser Ansätze und Methoden ist ein systematischer und optimierter Gebrauch von Wissen innerhalb des Unternehmens [2]. Obwohl bestimmte Methoden des Wissensmanagements im internationalen Forschungs- und Wirtschaftsumfeld große Aufmerksamkeit genießen, bleibt die Wissenschaft dem industriellen Umfeld ein konkret anwendbares bzw. praxisnahes Konzept für ein durchgängiges Wissensmanagement schuldig [3]. Zum einen basieren viele Ansätze auf einer allumfassenden Perspektive und/oder einer bekannten Geschäftsprozessoptimierungsmethode, welche lediglich mit Begrifflichkeiten des Wissensmanagement erweitert wurden. Im Gegensatz dazu existieren Wissensmanagementmethoden, die für einen spezifischen Anwendungsfall entwickelt wurden und auch praxistaugliche Lösungen anbieten, welche jedoch nicht auf weitere Szenarien adaptierbar sind. Der Versuch mit einer Wissensmanagementlösung jegliche Geschäftsprozesse sowie individuelle Herausforderungen abzudecken bzw. zu unterstützen, stellt oft die Schwachstelle vieler Konzepte dar, die unter realen Bedingungen keine Verwendung finden.

Dabei wird mittlerweile das immaterielle Gut "Wissen" als einer der maßgebenden Erfolgsfaktoren in Unternehmen verstanden. Deutlich belegt dies die Studie „Produktiver Umgang mit Wissen in Unternehmen“. Dort bestätigen die 300 Geschäftsführer sowie Mitarbeiter mit und ohne Personalverantwortung aus verschiedensten Branchen, dass der Erfolgsfaktor Wissen einen erheblichen Beitrag zum Unternehmenserfolg beiträgt. Dagegen haben 57 % der Befragten keine Vorstellung, wie das vorhandene und identifizierte Wissen produktiv genutzt werden soll. [4]

Indessen kann schon ein strukturierter und systematischer Einsatz des bestehenden Wissens zu einem entscheidenden Wettbewerbsvorteil beitragen [5]. Um Produkte in einem stetig turbulenten Umfeld absetzen zu können, müssen produzierende Unternehmen innovative Produkte in immer kürzerer Zeit auf den Markt einführen. Einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg des Produkts leistet die Produktentwicklung im Unternehmen. Zudem gilt die Produktentwicklung im Betrachtungsfokus sämtlicher Geschäftsprozesse als sehr wissensintensiv und komplex [6], [7] (siehe Bild 1).

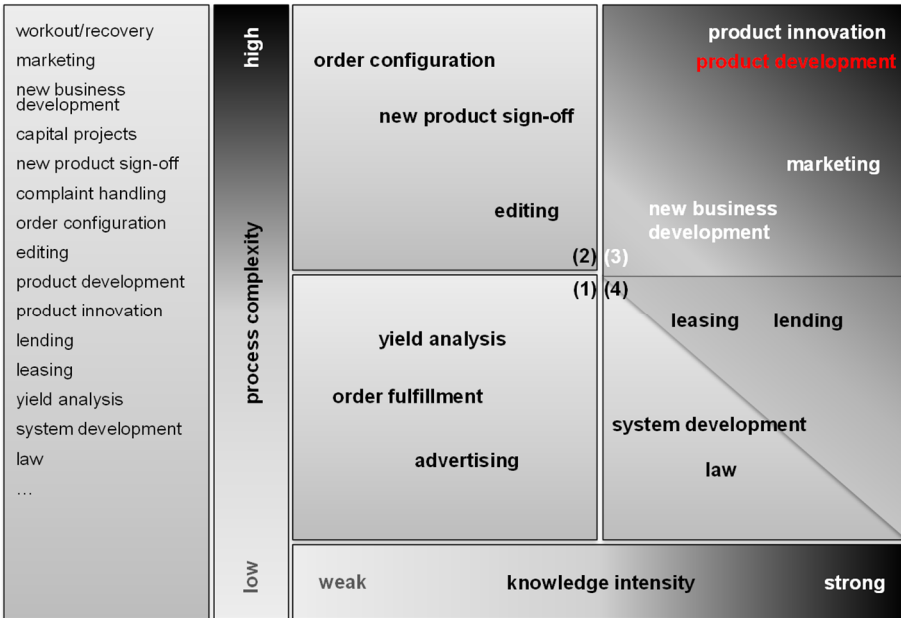


Bild 1: Klassifikation von Geschäftsprozessen hinsichtlich Komplexität und Wissensintensität nach Eppler et al. [7]

Aus diesem Grund birgt eine Unterstützung mit Hilfe von verschiedenen Wissensmanagementmethoden und -instrumenten im Produktentwicklungsprozess großes Potenzial. Allerdings sind keine Methoden und Instrumente bekannt, welche die Kernaktivitäten eines durchgängigen Wissensmanagements (Wissen teilen, Wissen erwerben, Wissen entwickeln etc.) im Kontext der Produktentwicklung adressieren.

Die in der Praxis oft angewendeten Normen und Richtlinien der Produktentwicklung beinhalten keine Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung von Wissensmanagementansätzen. Dabei beschreibt die VDI 2221 [8] den generischen Produktentwicklungsprozess, ohne auf die Thematik des Wissensmanagements einzugehen. Lediglich die Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 [9] geht in Form von Konstruktionskatalogen als Wissensspeicher auf eine Teildisziplin des Wissensmanagements ein. Umgekehrt verhält es sich mit der VDI 5610 [10], welche Grundlagen, Konzepte und Vorgehensweisen des Wissensmanagements im Ingenieurwesen beinhaltet, jedoch keinen konkreten Bezug zu den Prozessschritten der Produktentwicklung herstellt.

Eine Vorgehensweise zur Identifikation von Potenzialen für Wissensmanagementunterstützungen anhand des Geschäftsprozesses "Produktentwicklung" ist auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche nicht bekannt. Aus diesem Grund wird folgende Forschungsfrage betrachtet: *Wie kann ein unternehmensspezifischer Produktentwicklungsprozess analysiert werden, um Potenziale für wissensbasierte Unterstützungsmöglichkeiten abzuleiten?*

Zunächst erfolgt die Beschreibung einer bekannten Methode zur Modellierung wissensintensiver Geschäftsprozesse. Anschließend wird deren Anwendung auf den generischen Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 [8] erläutert. Danach wird eine Vorgehensweise zur Identifikation von Potenzialen für Wissensmanagementunterstützungen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses näher beschrieben. Eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf weitere Forschungstätigkeiten runden den Beitrag ab.

2 KMDL – Eine Methode zur Modellierung wissensintensiver Geschäftsprozesse

KMDL steht für „Knowledge Modeling and Description Language“ und ist eine von Gronau et al. [12] entwickelte Beschreibungssprache zur Modellierung von wissensintensiven Geschäftsprozessen. Die Modellierungsmethode bzw. -sprache ist thematisch dem prozessorientierten Wissensmanagement zuzuordnen, welches das Ziel hat, die Wissensverarbeitung in Geschäftsprozessen zu identifizieren. Mit Hilfe der Modellierung von wissensintensiven Prozessen wird Wissen über den Prozess erhoben, welches wiederum eine höhere Prozesstransparenz schafft [11]. Grund für die Entwicklung der neuen semiformalen Beschreibungssprache (KMDL) für Geschäftsprozesse war, dass bekannte und etablierte Modellierungswerkzeuge, wie beispielsweise ARIS, ADONIS oder BONAPART nicht die Fähigkeit besitzen, Umwandlung von Wissen sowie komplexe und wissensintensive Geschäftsprozesse abzubilden [12]. KMDL geht insbesondere auf die Entstehungswege von Wissen und die Verteilung der dazugehörigen Informationen ein. Ein weiterer Vorteil von KMDL ist die rechnergestützte Darstellung und Untersuchung der modellierten Wissensflüsse, welche verschiedene Analysemöglichkeiten zulassen [13]. Zur Identifikation relevanter Daten und Informationen des zu modellierenden Geschäftsprozesses wird ein KMDL-Vorgehensmodell von der KMDL-Wissensmanagementmethode zur Verfügung gestellt. Die erfolgte Anwendung des KMDL-Vorgehensmodells auf den Produktentwicklungsprozess vertieft nicht das Verständnis der resultierten Prozessmodellierung und wird aus diesem Grund an dieser Stelle nicht näher beschrieben. Allerdings trägt die Kenntnis über verschiedene KMDL-Objekte sowie Prozessmuster einen erheblichen Teil zum

besseren Verständnis der Prozessmodellierung bei und wird im Folgenden kontextspezifisch beschrieben.

Objekte der Knowledge Modeling and Description Language (KMDL)

Zur Modellierung der verschiedenen Aktivitäten der Geschäftsprozesse bietet KMDL unterschiedliche Objekttypen an. Mit Hilfe dieser Objekte können sämtliche Informationsflüsse und Wissenstransformationen visuell dargestellt werden. Von zentraler Bedeutung sind die Informations- und Wissensobjekte. Informationsobjekte beinhalten Informationen, die in unterschiedlicher Art und Weise im Informationsobjekt hinterlegt sein können (Texte, Bilder etc.) [12]. Je nach Art der Informationen, können diese an Personen gebunden oder ungebunden sein. Wissensobjekte hingegen sind ausschließlich personengebunden und repräsentieren das prozessspezifische Wissen dieser Person. Die Wissensschaffung im Unternehmen kann mit verschiedenen Konversionen abgebildet werden. Unter Konversion wird in diesem Zusammenhang die Umwandlung von implizitem und explizitem Wissen verstanden [1]. Dabei werden Informations- bzw. Wissensobjekte als Input- oder Outputobjekte einer solchen Konversion zugeordnet. Die Konversion stellt somit das Vorgehen der Wissensschaffung dar und wird mit dem Konversionsobjekt dargestellt. Um Konversionen strukturiert durchzuführen, können Anforderungen an die Konversion mittels Anforderungsobjekten formuliert werden. Ein weiteres bedeutendes Objekt ist die am Prozess teilnehmende Person. Das zugehörige Personenobjekt repräsentiert eine real existierende Person im Unternehmen. Da Wissensobjekte immer personengebunden sind, werden Personen auch als Wissensträger bezeichnet [12]. Im Kontext des Produktentwicklungsprozesses könnten die vorgestellten Objekte wie folgend beispielhaft beschrieben werden:

- Informationsobjekt = Ergebnisse aus Marktanalyse / Lastenheft des Kunden
- Wissensobjekt = Wissen über Anforderungsliste der Maschine XY
- Konversionsobjekt = Erstellung einer ersten Version der Anforderungsliste
- Anforderungsobjekt = Kundenspezifische Forderungen und Wünsche beachten
- Personenobjekt = Konstrukteur A

Die KMDL-Modellierung, der für den Anwendungsfall "Produktentwicklungsprozessschritt" beschriebenen Objekte, ist in Bild 2 dargestellt.

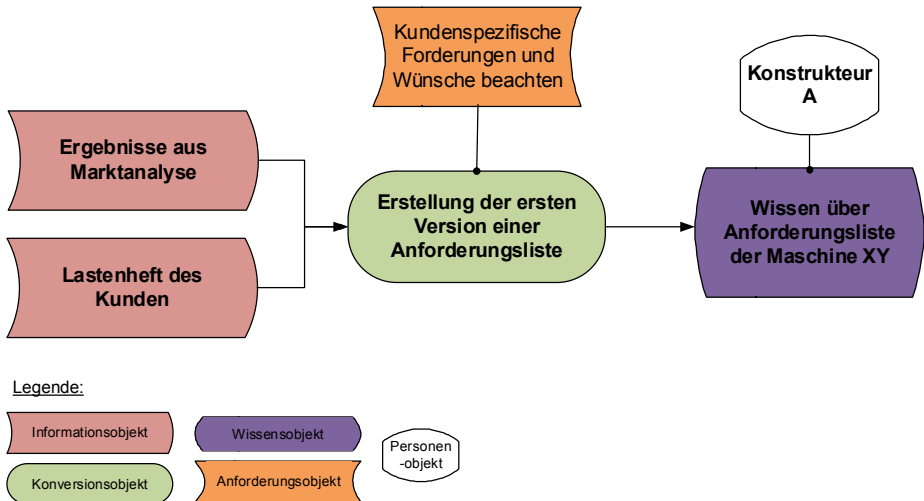


Bild 2: KMDL-Modellierung eines Prozessschritts der Produktentwicklung

Der beschriebene Prozessschritt visualisiert den Informationsfluss und die dabei stattfindende Wissensschaffung. Die beiden Informationsobjekte „Datenblatt der Maschine XY“ und „Lastenheft des Kunden“ sind Inputobjekte des Konversionsobjekts „Erstellung der ersten Version einer Auftragsliste“. Mit Hilfe des Anforderungsobjekts „Kundenspezifische Forderungen und Wünsche beachten“ kann das Konversionsobjekt die beiden ungebundenen Informationsobjekte zu einem personengebundenen Wissensobjekt „Wissen über Anforderungsliste der Maschine XY“ transformieren. „Konstrukteur A“ stellt das an das Wissensobjekt gebundene Personenobjekt dar.

Erkenntnis dieser KMDL-Modellierung ist, dass „Konstrukteur A“ aufgrund der Informationsobjekte „Datenblatt der Maschine XY“ und „Lastenheft des Kunden“ mit Hilfe der Konversion „Erstellung der ersten Version einer Anforderungsliste“ unter Anwendung der Anforderung „Kundenspezifische Forderungen und Wünsche beachten“ das prozessspezifische Wissen „Wissen über Anforderungsliste der Maschine XY“ aufbauen kann.

Diese Modellierung ist Ausgangspunkt einiger Analysemöglichkeiten. Zum einen ist schnell und einfach erkennbar, welche Informationsobjekte zur Wissensschaffung notwendig sind. Des Weiteren sind anhand der Modellierung

Experten mit verschiedenen Wissensobjekten identifizierbar und können zielgerichtet eingesetzt werden. Diese Analysemöglichkeiten werden im Folgenden näher erläutert und in einen produktentwicklungsspezifischen Zusammenhang gebracht.

Prozessmuster

Als Ergebnis der KMDL-Modellierung verschiedener Geschäftsprozesse entstehen komplexe semantische Netze. Diese semantischen Netze können auf Muster untersucht werden. Ziel dieser Prozessmusteranalysen ist es, eine generische Lösung für ein regelmäßig auftretendes Problem anzubieten. Somit kann ein erkanntes Prozessmuster mit einem identifizierten Optimierungspotenzial gleichgesetzt werden. KMDL bietet eine Fülle an Prozessmustern an, welche ganz unterschiedliche Absichten bzw. Optimierungspotenziale verfolgen. [14]

- Occurrence Pattern = Häufigkeitsanalyse unterschiedlicher KMDL-Objekte
- Multi-Step Pattern = Kombinationsanalyse verschiedener bzw. identischer Konversionen
- Relevance Pattern = Konversionen mit hohem Grad an Komplexität und Intensität
- Exclusive Pattern = Bestimmte Informations- und Wissensobjekte werden häufig im Geschäftsprozess nachgefragt

Für den Produktentwicklungsprozess soll exemplarisch das „Person Occurrence Pattern“ vorgestellt werden. Dieses Prozessmuster adressiert das Wissensmanagementproblem von Wissensmonopolen und lokalisiert diese. Wenn beispielsweise ein Mitarbeiter mit vielen an sich gebundenen, prozessrelevanten Wissensobjekten das Unternehmen verlässt, können im Vorfeld zielgerichtete Maßnahmen gegen einen Wissensverlust eingeleitet werden. In Bild 3 ist ein „Person Occurrence Pattern“ allgemeingültig dargestellt.

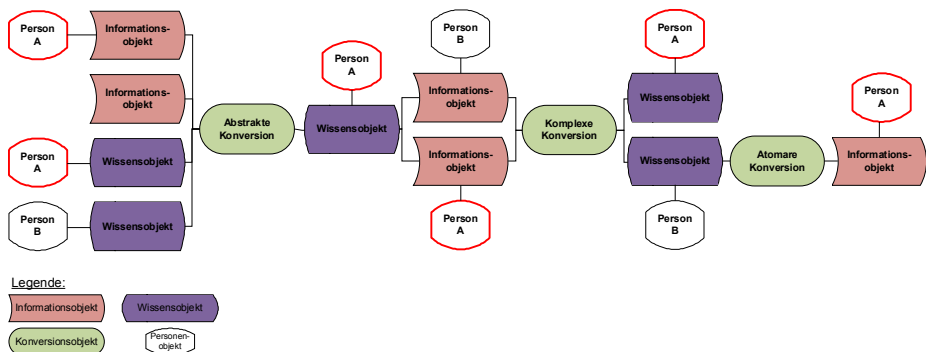


Bild 3: KMDL-Prozessmuster: Person Occurrence Pattern

Das beschriebene Prozessmuster zeigt deutlich, dass die Person A in diesem Prozessschritt eine wesentliche Rolle einnimmt. Viele Informations- sowie Wissensobjekte sind an diese Person gebunden. Diese Objekte wiederum sind oft notwendige Inputobjekte von prozessrelevanten Wissenstransformationen. Auf den Produktentwicklungsprozess bezogen, wäre Person A ein Entwicklungsingenieur, welcher mit seinem Konstruktionswissen den vorgestellten Prozess erst möglich macht. Um den Prozess aus Sicht des Wissensmanagements stabil zu gestalten, ist eine Umverteilung der personengebundenen Wissens- und Informationsobjekte auf mehrere Wissensträger zweckmäßig. Zudem könnte in Folge eines altersbedingten Ausscheidens der Entwicklungsingenieur seine personengebundenen Wissensobjekte als Informationen externalisieren und anderen Mitarbeitern in Form von Informationsobjekten zur Verfügung stellen. Wie solche Optimierungspotenziale innerhalb des Produktentwicklungsprozesses identifiziert und mit Hilfe von Wissensmanagement unterstützt werden, wird im folgenden Kapitel detaillierter erläutert.

3 Identifikation von Potenzialen für Wissensmanagementunterstützungen im Produktentwicklungsprozess

Um Optimierungspotenziale innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zielgerichtet zu identifizieren, kann eine wissensbasierte Modellierung des Prozesses durchgeführt werden. Dabei gilt, je höher die Qualität der Prozessmodellierung, desto besser können Wissensmanagementunterstützungspotenziale identifiziert werden. Eppler et al. [7] haben den Produktentwicklungsprozess als Ganzes als sehr wissensintensiv und komplex im Vergleich zu anderen üblichen Geschäftsprozessen dargestellt (siehe Bild 1). Die einzelnen Prozessschritte des Produktentwicklungsprozesses wurden dabei nicht näher untersucht. Allerdings ist dies notwendig, um zielgerichtet Wissensmanage-

mentunterstützungspotenziale innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zu identifizieren.

Die VDI 2221 [8] gilt als Richtlinie zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme. Diese Richtlinie kann als generischer Produktentwicklungsprozess verstanden werden, welcher in den meisten produzierenden Unternehmen in einer unternehmensspezifischen Form Anwendung findet. Um eine valide KMDL-Modellierung des generischen Produktentwicklungsprozesses durchführen zu können, reicht die übergeordnete Prozessbeschreibung in Form von Prozessbausteinen nicht aus. Erst die detaillierte Beschreibung der in den einzelnen Prozessschritten ablaufenden Aktivitäten ermöglicht eine exakte Modellierung der Informationsflüsse und Wissenstransformationen innerhalb des generischen Produktentwicklungsprozesses. Die Informationen über die Aktivitäten der einzelnen Arbeitsschritte sind bei Pahl/Beitz [15] detailliert beschrieben und mit praxisrelevanten Beispielen näher erläutert. Das Wissen über die Prozessschritte aus der VDI 2221 [8] in Kombination mit den weitergehenden Informationen aus Pahl/Beitz [15] ermöglicht die Modellierung eines Prozessmodells mittels KMDL. Auf Grund des modellierten Produktentwicklungsprozesses können wissensintensive und komplexe Prozessschritte bzw. Aktivitäten innerhalb des Gesamtprozesses identifiziert werden. Um Komplexität sowie Wissensintensität eines Prozessschritts zu bestimmen, können die in Kapitel 2 beschriebenen Prozessmuster angewendet werden. Ergebnis der ersten Analyse ist eine Erweiterung der von Eppler et al. [7] vorgestellten Matrix auf Prozessschritzebene. Hierbei können Aussagen über die einzelnen Arbeitsschritte sowie der übergeordneten Prozessschritte hinsichtlich der Wissensintensität und der Komplexität gemacht werden. Nachdem wissensintensive und komplexe Arbeitsschritte des generischen Produktentwicklungsprozesses lokalisiert sind, können die bis dahin bekannten Analysemöglichkeiten teilweise zur Identifikation von Wissensmanagementunterstützungspotenzialen angewendet werden.

Nach ersten Erkenntnissen sind Optimierungspotenziale aus Sicht des Wissensmanagers mit Hilfe der von KMDL zur Verfügung stehenden Prozessmuster identifizierbar, und erste Handlungsempfehlungen können abgeleitet werden. Somit unterstützen die Prozessmuster bei der Suche nach dem „Wo die Unterstützungspotenziale im Prozess zu finden sind“, allerdings stoßen sie sehr schnell an ihre Grenzen bei dem „Wie Wissensmanagementunterstützungen charakterisiert sein müssen“, um eine zielgerichtete Anwendbarkeit zu ermöglichen. Unter dieser Charakterisierung werden die kontextspezifischen Eigenschaften der anzuwendenden Wissensmanagementunterstützung verstanden. Um diese Herausforderung zu überwinden, können gängige Produktentwicklungsmethoden und/oder Wissensmanagementinstrumente eben-

falls mit KMDL modelliert werden. Die modellierte Methode bzw. das modellierte Instrument ergibt ein bestimmtes Prozessmuster, welches eindeutig mit Objekten und deren Verbindungen charakterisiert ist. Auf dieser Grundlage könnte ein KMDL-Prozessmustermodulbaukasten von üblichen Produktentwicklungsmethoden und Wissensmanagementinstrumenten entstehen. Mit Hilfe dieser neuen, wissensmanagementspezifischen Prozessmustermodule können Handlungsempfehlungen zielgerichtet und kontextspezifisch ausgewählt werden (siehe Bild 4).

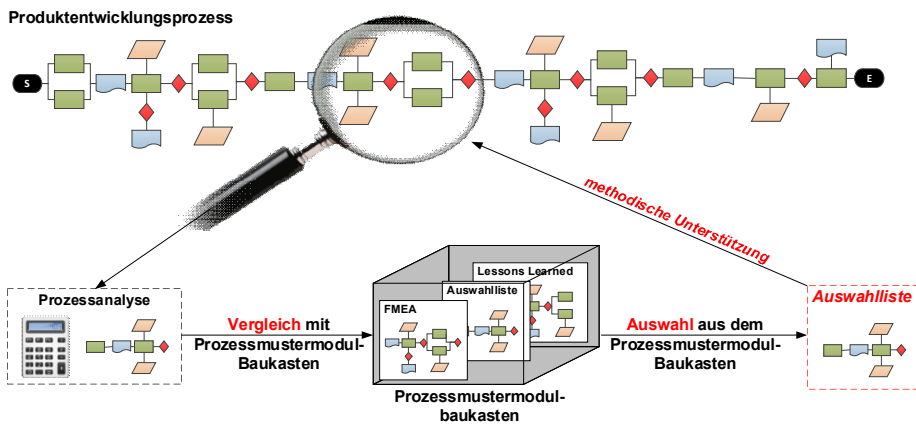


Bild 4: Zusammenhang zwischen Prozessmustermodulbaukasten und Produktentwicklungsprozess

Der Aufbau eines Prozessmustermodulbaukastens und die dadurch neu entstehende Prozessanalyse sind noch zu erarbeiten. Zudem muss eine Vorgehensweise entwickelt werden, welche es erlaubt, die Produktentwicklungsmethoden bzw. die Wissensmanagementinstrumente mit KMDL allgemeingültig zu modellieren.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Vorgehensweise zur Identifikation von Potenzialen für Methodenunterstützungen in der Produktentwicklung aus Sicht des Wissensmanagements anhand von KMDL-modellierten Produktentwicklungsprozessen vorgestellt.

Im ersten Kapitel wurde hierfür in die theoretischen Grundlagen und die aktuellen Herausforderungen des Wissensmanagement eingeführt. Anhand

der gestellten Forschungsfrage wurde in den folgenden Kapiteln auf die für die Untersuchung der Forschungsfrage notwendigen Methoden und Instrumente eingegangen und in einen produktentwicklungsspezifischen Kontext gebracht. In Kapitel 2 wurde eine semiformale Modellierungssprache bzw. -methode (KMDL) zur Modellierung von Informationsflüssen und Wissenstransformationen von Geschäftsprozessen vorgestellt. Die in dieser Modellierungsmethode zur Verfügung stehenden Analysemöglichkeiten können Aussagen über die Komplexität und Wissensintensität einzelner Prozessschritte treffen. Kapitel 3 beinhaltet die Beschreibung der Vorgehensweise zur Identifikation von Potenzialen für Methodenunterstützungen in der Produktentwicklung. Hierfür wurde der generische Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 [8] mit KMDL modelliert. Erste Erkenntnisse ergaben, dass die Prozessmusteranalysen eine Identifikation von Unterstützungspotenzialen aus Sicht des Wissensmanagements ermöglichen. Allerdings konnten keine umfassenden Handlungsempfehlungen aufgrund der vorhandenen Prozessmusteranalysen abgeleitet werden. Am Ende des Kapitels 3 wurde eine mögliche Lösung in Form eines Prozessmustermodulbaukastens dargestellt, welcher umfangreiche Handlungsempfehlungen zur Verfügung stellen könnte.

Der vorgestellte Ablauf zur Identifikation von Unterstützungspotenzialen hat gegenüber herkömmlichen Vorgehensweisen bei Anwendung von Wissensmanagementunterstützungen den entscheidenden Vorteil, dass das Unterstützungspotenzial im Prozess exakt lokalisiert werden kann und darüber hinaus auch die Entstehungswege des Wissens innerhalb des Prozesses berücksichtigt werden. Die aufgrund dieser Analysemöglichkeiten erschließbaren Erkenntnisse fließen direkt in Handlungsempfehlungen ein. Um diese Handlungsempfehlungen in Zukunft zu operationalisieren, bietet es sich an, die vorhandenen Prozessmusteranalysen von KMDL mit einem wissensmanagementspezifischen Prozessmustermodulbaukasten zu erweitern. Die dafür notwendigen Schritte wurden in diesem Beitrag skizziert.

Literatur

- [1] Nonaka I.; Takeuchi H.: Die Organisation des Wissens, Campus Verlag, Frankfurt/New York, 1997.
- [2] Heisig, P.: Integration von Wissensmanagement in Geschäftsprozesse, Dissertation, TU Berlin, Berlin 2005.
- [3] Mertins, K.; Seidel, S.: Wissensmanagement im Mittelstand, Springer-Verlag, Heidelberg, 2009.

-
- [4] Haufe-Lexware GmbH & Co.KG: Produktiver Umgang mit Wissen im Unternehmen, Studie, Freiburg, 2014.
 - [5] North, K.; Guldenberg, S.: Wissensorientierte Unternehmensführung, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.
 - [6] Spath, D.: Technologiemanagement in der Praxis : Forschen und Anwenden, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006.
 - [7] Eppler, J.; Seifried, P.; Röpnack, A.: Improving Knowledge Intensive Processes through an Enterprise Knowledge Medium, ACM SIGCPR Conference, New Orleans, 1999.
 - [8] Deutsches Institut für Normung: Konstruktion: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI Düsseldorf, 1997.
 - [9] Deutsches Institut für Normung: Produktentwicklung und Konstruktion: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. VDI Düsseldorf, 2004.
 - [10] Deutsches Institut für Normung: Produktentwicklung und Konstruktion: Wissensmanagement im Ingenieurwesen. VDI Düsseldorf, 2009.
 - [11] Remus, U.: Wissensorientierte Unternehmensführung, Dissertation, Universität Regensburg, 2002.
 - [12] Gronau, N.; Fröming, J.: KMDL[®] Eine semiformale Beschreibungssprache zur Modellierung von Wissenskonversionen, WIRTSCHAFTSINFORMATIK 48, 2006.
 - [13] Gronau, N.: Wissen prozessorientiert managen, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2009.
 - [14] Universität Potsdam; Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government: Arbeitsbericht (umfangreiche Beschreibung) – KMDL[®] v2.2, Potsdam, 2009.
 - [15] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.: Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung, 7. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, 2007.

Nutzerzentrierte Produktentwicklung durch systematische Integration von Marketingaspekten – ein erster Ansatz

Susan Kett, Tina Schröppel, Sandro Wartzack

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

Abstract

The shift from seller's to buyer's markets in many different product divisions leads to a raising role of the user in product development processes. Especially implicit decision parameters such as comfort feeling need better consideration. This article suggests to consequently integrate models and tools from other disciplines, e.g. marketing, to generate competitive advantages due to a better fulfillment of user's needs. In those areas, focusing on users is much more established. As a starting point, a first glance of the topic is given by adapting Portfolio Models. The potential to directly link "soft" user decision parameters with product properties without any intermediates offers value to minimize misleading product development efforts. Further investigation in this area is recommended.

Keywords: product development, user integration, methodology, marketing

1 Einleitung

Angesichts der zunehmenden Diversifizierung der Nachfrage bei gleichzeitig steigendem Wettbewerb von Anbietern entsteht ein verstärkter Bedarf an nutzerangepassten Produkten. Diese sind nicht mehr nur auf die produktions- und allgemein lebenszyklusrelevanten Parameter, sondern in hohem Maße auch auf den späteren Anwender auszurichten. Der Kunde und damit implizit der Nutzer als zentraler Bestandteil des Zielsystems ist dabei nicht mehr als homogen und in seinen Anforderungen als invariant, sondern als heterogene Gruppe von Marktteilnehmern mit individuellen Bedürfnissen zu verstehen. Dabei geraten gerade die sogenannten „weichen“ Faktoren des Nutzers immer mehr ins Zentrum der Betrachtung, da Faktoren wie die Motivation oder die kognitive Leistungsfähigkeit des Anwenders oftmals entscheidende Gründe für das Nutzen oder Nicht-Nutzen eines Produkts sind und damit eine Kaufentscheidung direkt beeinflussen.

Die Idee einer Fokussierung auf die individuellen Bedürfnisse des Produktnutzers an sich ist nicht neu. Neben der Produktentwicklung zielen andere Bereiche der Unternehmensorganisation bereits länger explizit auf eine Maximierung des Kundennutzens als Hauptanspruch ab und sind allgemein anerkannt, während der Vorteil einer Integration des Kunden und damit des Nutzers in den Produktentwicklungsprozess nach wie vor umstritten ist [1].

Eine Möglichkeit, ein besseres Verständnis dieser Thematik auch in der Produktentwicklungsumgebung zu generieren, liegt in einer näheren Betrachtung solcher Disziplinen, in denen eine starke Kundenorientierung bereits etabliert ist. Die Strategie modernen Marketings beispielsweise verfolgt – anders als in klassischen Unternehmensorientierungen – eine ganzheitliche Ausrichtung der Unternehmensprozesse auf die Belange des Kunden und beinhaltet dadurch ein entsprechendes Verständnis, sowie eine Darstellung der einzelnen Wirkzusammenhänge (Abbildung 1) [2].

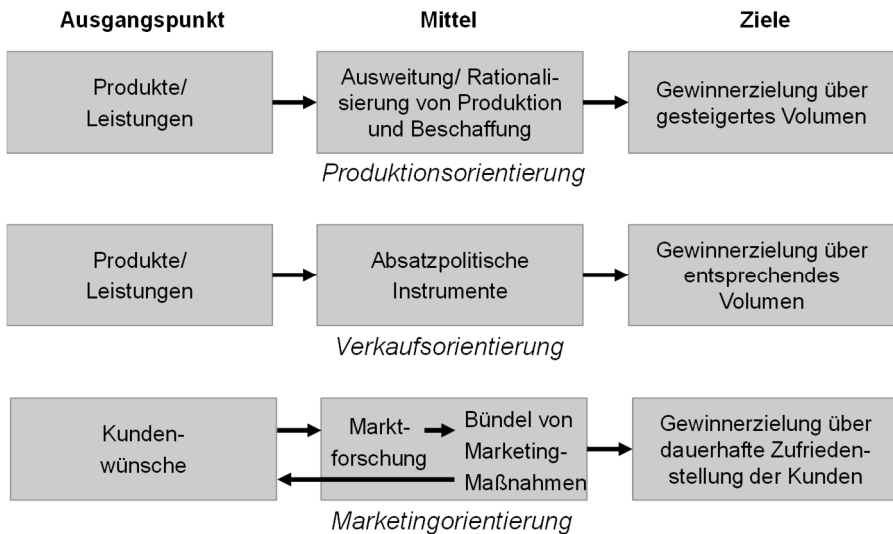


Abbildung 1: Verschiedene Unternehmensorientierungen nach [2]

2 Ableitung des Handlungsbedarfs

Heutige Unternehmenspraxis, in der ein ganzheitliches Marketing bereits Einzug gehalten hat und eine deutliche Kundenausrichtung beispielsweise durch aktives Innovationsmanagement und Open Source Strategien forciert wird, hat entsprechende Ansätze noch unzureichend in die Produktentwicklungsumgebung transportiert. Obwohl die Marktforschung als Teil des Marketings bereits über zahlreiche Methoden und Werkzeuge zur Beschreibung von Kunden bzw. Nutzern verfügt, ist es eine essentielle Aufgabe, entsprechendes Wissen in noch höherem Maße in die Produktentwicklungsprozesse einzubinden. Viele Modelle wie das Customer Life Cycle Costing, kundenorientierte Spezialisierungsstrategien oder verschiedene deskriptive Erklärungsansätze zum Kaufverhalten des Kunden erfassen bereits gezielt Charakteristiken von Kundengruppen [3] [4]. Erkenntnisse der Marktforschung werden zwar an die Produktentwicklungsabteilungen herangetragen, eine durchgängige Integration und Umsetzung innerhalb des gesamten Produktentwicklungsprozesses steht jedoch häufig noch aus. Die Potenziale dieser Ansätze können in der Produktentwicklung deutlich stärker ausgeschöpft werden. Zum einen zeigt sich diese bisherige Ineffizienz in der noch unzureichenden Abbildung der Heterogenität der Fokusgruppen sowie der eingangs genannten „weichen

Faktoren“, zum anderen an der noch nicht durchgehenden, parallel erfolgenden Reflexion dieses Wissens im Prozess. Ziel ist es also, Methoden und Werkzeuge des Marketings zu analysieren, zu bewerten und so zu modellieren, dass sie in der Produktentwicklung integriert werden können und einen sichtbaren Erfolg im Einsatz aufweisen. Ein erster Ansatz hierzu wird im Folgenden aufgezeigt. Dabei erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung der Disziplinen, bevor ein Beispiel kurz aufgezeigt und die Potenziale des Werkzeugs dargelegt werden.

Bisherige Einbindung des Nutzers in den Produktentwicklungsprozess

Der Produktentwicklung liegen nutzerintegrierende Instrumente vor, deren Etablierung in der Praxis jedoch noch nicht angemessen erfolgt [5] [6]. Dies scheitert weniger an deren Einsetzbarkeit, als vielmehr an der unzureichenden Nachweisbarkeit des späteren Erfolges. Darüber hinaus verfügen diese Konzepte nach wie vor über keine durchgehende Integration der nutzerzentrierten Werkzeuge in den Entwicklungsprozess, sondern entsprechen zumeist parallelen oder nachgelagerten Tätigkeiten (vgl. [7] [8]) oder lassen eine konkrete Empfehlung zur Eingliederung in den laufenden Produktentwicklungsprozess missen (bspw. in [9]). Zudem verfügen sie stets über einen Zwischenschritt, der eine einmalige Ableitung von Nutzercharakteristika auf entsprechende Nutzeranforderungen vorsieht. Dies ist nicht nur unter Betrachtung unterschiedlicher Einsatzszenarien von Produkten im späteren Gebrauch fraglich, sondern setzt gleichzeitig ein durchgängig gleichbleibendes Verständnis der Beziehung Nutzercharakteristika – Nutzeranforderung voraus, welches aufgrund der Prozessvielfalt und der Vielzahl an beteiligten Parteien schwierig ist.

Heutige Produktentwicklung basiert nicht mehr auf dem Vorhandensein einer konkreten, singulär zu betrachtenden Nachfrage, sondern vielmehr auf der implizierten Nutzenerfassung einer heterogenen Gruppe von Marktteilnehmern. Die marketingorientierte Definition eines Produktes als "Bündel von Eigenschaften, das auf die Schaffung von Kundennutzen jedweder Art abzielt" impliziert, dass die Zufriedenstellung dieser Kunden durch Maximierung des Nutzen als oberstes Ziel aller Prozesse anzusehen ist [4]. Dennoch wird in der Praxis auf eine konkrete Einbindung des Nutzers noch unzureichend Rücksicht genommen, in Leitfäden zur Konstruktionslehre ist der Hinweis auf eine Kundenbezogenheit nur sehr schwach (vgl. [8]).

Potenziale des Marketings

Anders als in der Produktentwicklung, in welcher nutzerintegrierende Methoden nach wie vor schwer zu etablieren sind, ist das Marketing ein weit verbreiteter, durch alle Hierarchiestufen anerkannter Bestandteil der Unternehmensstruktur. Dabei weist dieser Bereich in seiner primären Zielsetzung, der Identifikation von Kundenwünschen die in Abbildung 2 aufgezeigten Merkmale auf. Diese Philosophie des Marketings, das gesamte Unternehmen und darin enthaltenen Prozesse vollständig auf den Kunden auszurichten, erklärt die stets starke Nutzerzentrierung und -integration seiner Methoden. Exemplarisch werden nun zwei Teilbereiche des Marketings hinsichtlich ihrer Potenziale für die nutzerzentrierte Produktentwicklung sowie deren hierzu entstehenden Weiterentwicklungsbedarfe kurz näher betrachtet (siehe Markierungen in Abbildung 2).

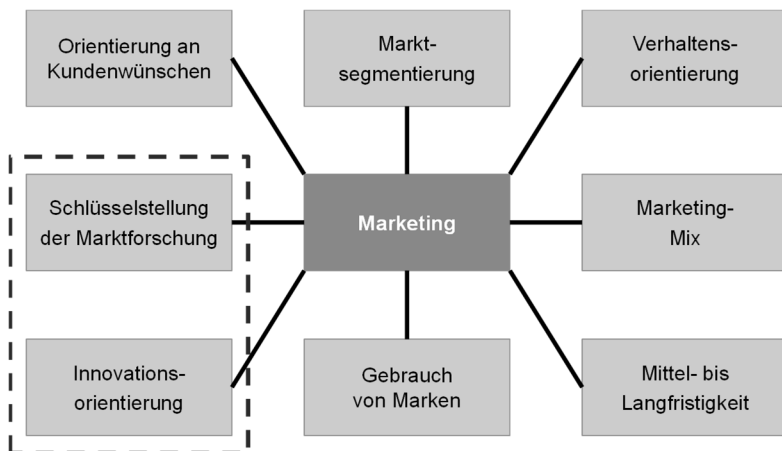


Abbildung 2: Bereiche des Marketings nach [2]

Zum besseren Verständnis der heterogenen Nutzer ist es erforderlich, diese zunächst in ihren Eigenschaften und Bedürfnissen sowie ihrer Umgebungsparameter zielangepasst zu dokumentieren. Bekannte Methoden zur Erfassung relevanter Markt-, Umfeld- und Unternehmensdaten sind in zahlreicher und bereits weitgereifter Form im Bereich der Marktforschung zu finden. Marktforschung zielt darauf ab, durch eine konsequente Sammlung, Aufbereitung, Analyse und Interpretation von Daten über Märkte (also potenzielle Kunden bzw. Nutzer) fundierte Marketingentscheidungen zu treffen [4]. Oft obliegt es jedoch dem Marketing ausschließlich, ein bereits definiertes Produkt möglichst erfolgreich zu platzieren und zu vermarkten.

Somit zielen die meisten der Marktforschungsinstrumente auf eine Erfassung von Kundendaten bezüglich bereits existierender Produkte oder Produktfamilien ab. Zudem gibt es ebenso retropektivische Methoden wie das Customer Satisfaction Reporting zur Kontrolle des Absatzerfolgs. Eine vollkommen generische Vorgehensweise speziell zum Zwecke einer Neudefinition eines Produkts liegt jedoch abgesehen von einer allgemeinen Markterfassung nicht vor. Hier besteht neben einer Adaption für die Produktentwicklung der Bedarf, rückwirkende Methoden so zu modifizieren, dass sie auch für Prognoseverfahren einsetzbar werden.

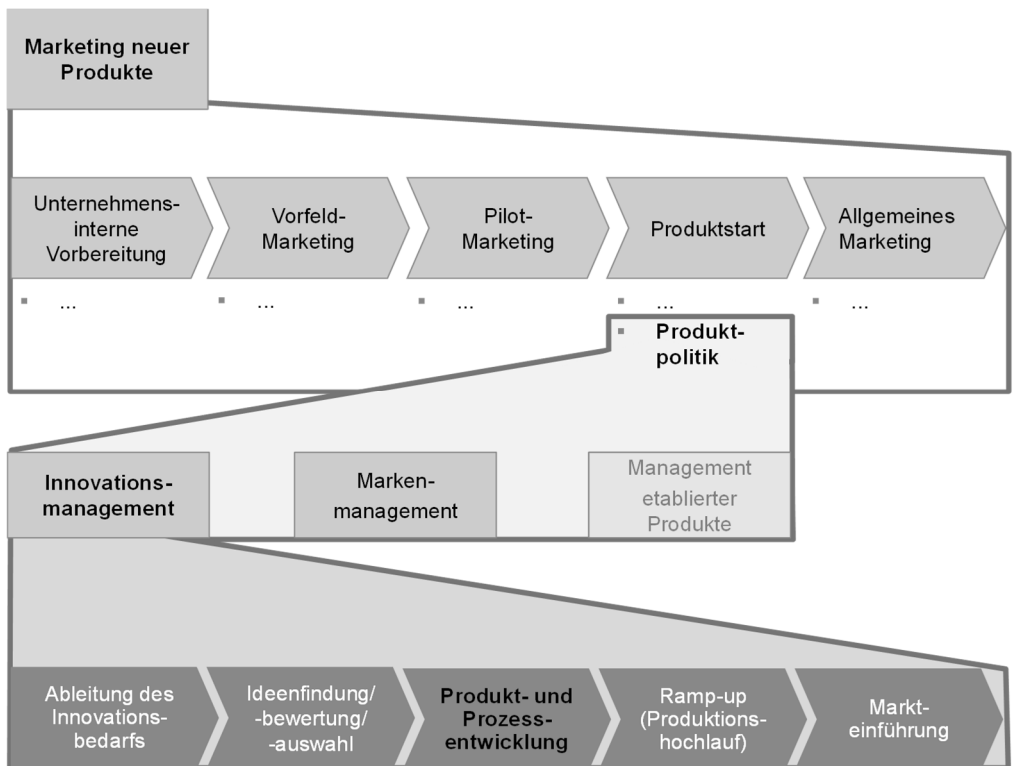


Abbildung 3: Verankerung der Produktentwicklung im Marketinggefüge in Anlehnung an [4] [10]

Das Innovationsmanagement und damit in die gesteuerte, erfolgreiche Markteinführung von Neuheiten wird als wichtiger Faktor zum langfristigen Unternehmenserfolg eingestuft (vgl. [11]). Die Produktentwicklung als solches allerdings ist nur an kurzer Stelle im dargestellten Prozess verankert (siehe Abbildung 3). Die hohe Bedeutung neuer Produkte für das langfristige Bestehen im Wettbewerb ist bekannt und anerkannt, deren Entstehungsprozess selbst wird in diesem Zusammenhang hingegen nur unzureichend betont und nachverfolgt. Ein stärkerer Austausch zur durchgehenden Berücksichtigung der Bedürfnisse des Nutzers sowie die Stärkung des beiderseitigen Verständnisses und damit der Anerkennung und Ergebnisqualität der jeweiligen Fachgebiete sind daher zu forcieren.

Adaption der Erkenntnisse

Durch einen Einbezug von Marketingaspekten in die nutzerzentrierten Produktentwicklung sollen kundenindividuelle Charakteristika und die daraus resultierenden Bedürfnisse erfolgreicher in den Produktentwicklungsprozess einfließen, aber auch die Steuerbarkeit ökonomischer Ziele optimiert werden. Hierbei ist das grundlegende Wissen der veränderten Ausgangsposition des Kunden Voraussetzung. Der allgemeine Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt ruft eine Verlagerung der wichtigen Entscheidungsfaktoren auf käufer-spezifische Präferenzen hervor. Daher wird vorgeschlagen, insbesondere Methoden zur Erfassung von Nutzerbedürfnissen aus dem Marketing zu adaptieren und sinnvoll in den methodischen Produktentwicklungsprozess zu integrieren. Es gilt, diese Bedürfnisse geeignet zu erfassen und in Anforderungen zu transferieren, um erwünschte Absatzvolumina zu identifizieren und das zu entwickelnde Produktspektrum gezielt und effizient nach diesen Anforderungen auszurichten. Gleichzeitig sind wirtschaftliche und situationsbezogene Aspekte stets zu berücksichtigen. Dazu sind einerseits eine Erhebung von Anforderungen und relevanter Merkmale potenzieller Nutzer systematisch zu erfassen, um daraufhin geeignete Methoden zu deren Umsetzung in konkrete Produkteigenschaften zu generieren. Andererseits sind Ansatzpunkte zu schaffen, wie diese Verfahren effektiv und effizient in der Entwicklungspraxis anzuwenden sind.

Wie extrahierte Anforderungen von Nutzern an ein Produkt auf dessen Design und Funktionalität umgesetzt werden können, ist in der Konstruktionsmethodik bereits in einigen Arbeiten wie dem SENSI-Konstruktionskatalog und zahlreichen Normen und Regelwerken dargelegt (bspw. DIN ISO 20282, VDI 2242, DIN 33402) [12]. Dennoch lassen all diese Empfehlungen noch keine konkrete, durchgängige Ausrichtung der Nutzerintegration nach wirt-

schaftlichen, ergonomischen und unternehmerischen Zielen sowie deren Einschätzungs- und Messbarkeit zu.

Das Konzept des Marketings sieht eine lebenszyklusübergreifende Betrachtung vor, das von vorbereitenden Maßnahmen einerseits bis hin zu Beschwerdemanagement und dessen Rückführung reicht [2] [4] [13]. Eine verstärkte und konsequente methodische Einbindung in den Produktentwicklungsprozess würde dazu führen, dass eine retrospektivische Betrachtung und Optimierung, wie sie zum Beispiel bereits in einem Ansatz der Integration von Marktforschungsmethoden in [14] vorliegt, in ein entwicklungsintegriertes Vorgehen zu transferieren ist.

Beispiel Portfolioanalyse

Ein erster Ansatz möglicher Verknüpfungen zwischen Produktentwicklung und Methoden des Marketings soll anhand einer Anpassung der Portfolioanalyse aufgezeigt werden. Dieses ursprünglich der Finanzwirtschaft zuzuordnende Werkzeug wird heutzutage zur Bestimmung eines nach zukünftigen Chancen und Risiken ausgewogenen Produkt-Markt-Programms vor allem im Bereich des strategischen Managements angewendet (Portfolio-Management). Dabei setzt diese Methode auf eine Visualisierbarkeit von Zusammenhängen zweier voneinander unabhängigen Determinanten. Als wohl bekanntester Vertreter dieser Methode kann die Portfolio-Analyse der Boston Consulting Group genannt werden [15] (siehe Abbildung 4). Anhand dieses Instruments können Handlungshinweise für bestimmte Geschäftsstrategien abgeleitet werden.

Marktwachstum	hoch	Fragezeichen III	Stars I
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ selektiv vorgehen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ fördern ▪ investieren
	niedrig	Arme Hunde IV	Melkkühe II
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ desinvestieren ▪ liquidieren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position halten ▪ ernten
		niedrig	hoch
		Relativer Marktanteil	

Abbildung 4: Portfolio-Matrix der Boston Consulting Group nach [15]

Sind Portfolios im Allgemeinen insbesondere dann wertvoll, wenn eine zukünftige qualitative Abschätzung der Verteilung bestimmter Größen in einem mehrdimensionalen Raum vorgenommen werden muss, so ist dieses Vorhersagepotenzial ebenso in der nutzerzentrierten Produktentwicklung nutzbar. Während in anderen DfX-Schwerpunkten diese Technik durchaus schon angewandt wird (vgl. Value-at-Risk-Portfolios [16]), kann dieses Werkzeug auch für qualitative Aussagen über kundenspezifische Eigenschaften wirkungsvoll verwendet werden. Dies bietet dem Produktentwickler insbesondere zwei Vorteile. Zum einen kann dieses Instrument aufgrund seines qualitativen Charakters bereits sehr früh im Prozess Verwendung finden und diesen bis in spätere Phasen begleiten und die Abbildung eines Anforderungs-Funktions-Fits sichern. Zum anderen erlaubt es ebenso den Einbezug sogenannter „weicher“ Faktoren wie der Motivation oder Kognition eines Nutzers. Gerade in diesem Feld bedarf es im Gebiet der nutzerzentrierten Produktentwicklung einer Weiterentwicklung bekannter Ansätze. Durch die konsistente Darstellung der visualisierten Verteilung ist sichergestellt, dass sehr früh abgeleitete Anforderungen an ein Produkt während des Produktentwicklungsprozesses stets korrekt interpretiert werden.

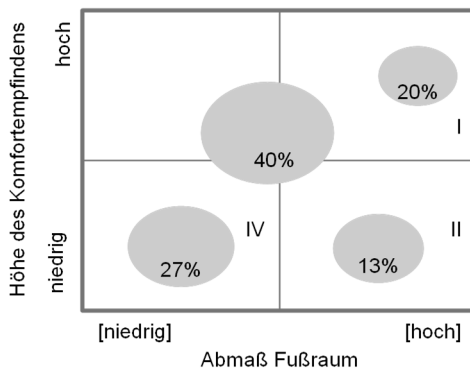


Abbildung 5: Beispiel eines Portfolios in der nutzerzentrierten Produktentwicklung

Als Beispiel eines angepassten Werkzeugs zum Treffen von Aussagen für die nutzerzentrierte Produktentwicklung ist das in Abbildung 5 dargestellte Portfolio. Die Effektivität dieser Darstellung liegt in der zuvor begründeten visuellen Darstellung der gewichteten Verteilung potenzieller Kunden des Absatzmarktes bezüglich zweier für die Ausgestaltung des Produktes relevanter Einflussparameter. Ersterer charakterisiert den vom Nutzer direkt wahrgenommenen, jedoch schwer quantifizierbaren Entscheidungsparameter Kom-

fort. Die zweite Determinante ist dem Produkt zuzuordnen und kann mit einem quantitativen Wert ausgewiesen werden (Abmaß eines Fußraums). In normalem Vorgehen wird zwischen diesen beiden Parametern zunächst eine Ableitung getroffen, indem das Attribut „Komfort“ in einen Wert wie „Beinfreiheit“ transferiert wird, ein direkter Zusammenhang geht somit verloren. Anstelle dieses klassischen Vorgehens wird hier nun aber nicht versucht, durch einen Zwischenschritt eine Transformation des Kundenkriteriums zu schaffen, nachfolgende Entwicklungsschritte beziehen die direkte Information „Komfortempfinden“ direkt mit ein (vgl. Abbildung 6). Durch die Unmittelbarkeit des Aussagegehaltes und dessen durchgängige Verwendung ist nun sichergestellt, im ganzen Prozess stets Rücksicherungen direkt an die tatsächlichen Präferenzen des Kunden zu erhalten. Eine besondere Qualität erlangt dieses Werkzeug insbesondere aufgrund der Einsetzbarkeit auf weiche Kriterien. Diese sind im aufgezeigten Beispiel die schwer durch Produktmerkmale zu quantifizierenden Determinanten des Komfortbedürfnisses. Gerade in jenem schwer greifbaren Feld impliziter Informationsbeschaffung fällt es schwer, eine direkte Ableitung auf Produkteigenschaften sinnvoll zu treffen und im gesamten Prozess sinnvoll nachzuverfolgen. Durch den Wegfall einer zwischengeschalteten Ableitung ist eine Primärabsicht stets verfü- und abgleichbar.

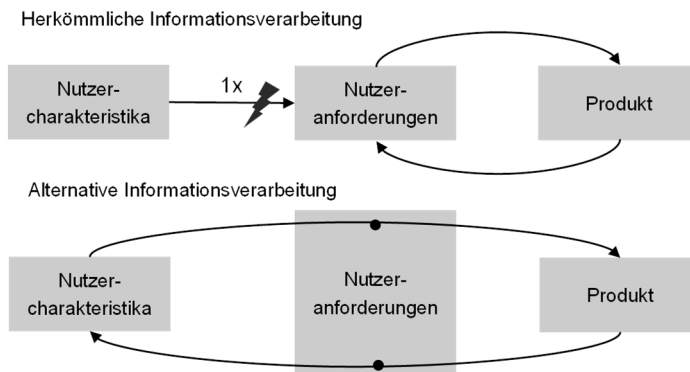


Abbildung 6: Bisherige und alternative Informationsverarbeitung in der nutzerzentrierten Produktentwicklung

Nun muss im Kehrschluss das Augenmerk auf die Gestaltung des Portfolios und die gemäße Gewichtung der darin abgebildeten Informationen geachtet werden. Dennoch gelingt es oftmals – ähnlich der im Marketing eingesetzten Portfolios – trotz geringer konkreter Daten und Informationen, qualitative Verteilungen der Kunden innerhalb des Portfolios vorherzusagen. Eine Validie-

rung, wer zur Erhebung und Erstellung eines solchen Portfolios herangezogen werden sollte, ist in weiterer Forschungsarbeit zu erarbeiten. Es zeigt sich jedoch bereits ab, dass hierbei eine Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen vielversprechend ist, da zum Beispiel Psychologen und Soziologen gerade über weiche Faktoren sehr gute Einschätzungen treffen können.

Fortsetzung des Forschungsansatzes

Anhand dieses Beitrags wurde aufgezeigt, dass eine notwendige Fokussierung der Produktentwicklung auf den Kunden und damit den späteren Nutzer von dringender Bedeutung ist. Durch die Diskussion bisheriger Ansätze und das Aufzeigen von Potenzialen von Methoden anderer Fachdisziplinen wie dem Marketing wird eine zusätzliche alternative Vorgehensweise vorgeschlagen. Dabei sind insbesondere die systematische Berücksichtigung „weicher“ Nutzercharakteristika während des gesamten Produktentwicklungsprozesses sowie die Auflösung von Zwischenschritten in der Informationsverarbeitung wichtige identifizierte Ansprüche. Bewertende, anschauliche und einfache Werkzeuge wie die im strategischen Management verwendete Portfoliotechnik versprechen einen hohen Erfüllungsgrad dieser Anforderungen.

Die aufgezeigten Potenziale einer Integration fachfremder Werkzeuge in die Produktentwicklung lassen die Thematik vielversprechend erscheinen. Neben einer eingehenderen Validierung des Vorteils einer Integration fachfremder angepasster Methoden in der Produktentwicklung sind tiefergreifende Betrachtungen vorzunehmen. So zeigt sich beispielsweise, dass eine Klärung Herkunft und der Qualität der in den Werkzeugen verarbeiteten Nutzerinformationen näher zu bestimmen ist sowie die gesamten Anwendungsspektren zu erörtern sind.

Literatur

- [1] Kujala, S.: User involvement: A review of the benefits and challenges. *Behaviour & Information Technology*, 22(1), 2003.
- [2] Kuss, A.: *Marketing-Einführung : Grundlagen – Überblick – Beispiele*. Gabler, Berlin, 2013.
- [3] Coenenberg, A. G. et al.: *Kostenrechnung und Kostenanalyse*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2007.
- [4] Homburg, Christian: *Marketingmanagement : Strategie - Instrumente - Umsetzung – Unternehmensführung*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden, 2012.

-
- [5] Reinicke, Tamara: Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung : Eine Systematik zur Anpassung von Methoden zur Nutzerintegration. 1.Aufl. München : Verl. Dr. Hut, 2004.
- [6] Glende, S.: Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung – mit Fokus auf die „Generation Plus“. Technische Universität, Berlin, 2010.
- [7] Stöber, C; Williger, B.; Meerkamm, H.; Lang, F. R.: Leitfaden für die altersgerechte Produktentwicklung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag; 2012.
- [8] Conrad, Klaus-Jörg: Grundlagen der Konstruktionslehre : Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik. Hanser, München, 2013.
- [9] Kroemer, K. H. E. ; Kroemer, H. B. ; Kroemer-Elbert, K. E.: Ergonomics : How to design for ease and efficiency. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2001.
- [10] Voigt, Kai-Ingo: Industrielles Management : Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht. Berlin : Springer, 2008.
- [11] Srinivasan, Shuba et al.: Product Innovations, Advertising and Stock Returns. Journal of Marketing, Vol. 73, 2009.
- [12] Biermantel, Holger ; Weißmantel, Heinz: Seniorengerechtes Konstruieren SENSI : Das Design seniorengerechter Geräte. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995.
- [13] Pepels, Werner: Moderne Marktforschung : Systematische Einführung mit zahlreichen Beispielen und Praxisanwendungen. Auswahlverfahren, Erhebungsmethoden, Datenauswertung, Absatzprognose. 3., komplett überarb. Aufl. Berlin : Duncker & Humblot, 2013.
- [14] Wang, Jiliang et al.: A usage coverage-based approach for assessing product family design. In: Engineering with Computers 29 (2013), Nr. 4, S. 449–465.
- [15] Baum, Heinz-Georg et al.: Strategisches Controlling. 4., überarb. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2007.
- [16] Jahn, Tobias: Portfolio- und Reifegradmanagement für Innovationsprojekte zur Multiprojektsteuerung in der frühen Phase der Produktentwicklung. Stuttgart: IKTD, 2010.

Konstruktion eines Messaufbaus zur präzisen Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit von Motorwicklungen

Martin Stöck, David Sauter, Quentin Lohmeyer, Mirko Meboldt
Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich

Abstract

In the future, the sustainable use of renewable energy is becoming more important. About 80% of the total world energy demand is actually derived from fossil fuels¹. Mobility currently uses over 50% of total global energy². Approaches for the efficient and sustainable energy use are electric and hybrid vehicles. An important component to power these cars is the electric motor. The economic and efficient design of an electric motor requires knowledge of the exact thermal conductivities of all components. A difficult parameter to be determined is the thermal conductivity of the winding. This paper presents the construction of a test setup which allows the precise measurement of the thermal conductivity of winding samples.

Keywords: measurement, test setup, thermal conductivity, winding

¹ Helen Lindblom et al. 2010

² John Conti et al. 2013

1 Einleitung

Für die thermischen Simulationen von elektrischen Motoren werden Materialdaten benötigt. Hierzu muss die thermische Leitfähigkeit der einzelnen Komponenten bekannt sein. Die Leitfähigkeit der Wicklung ist einerseits ein schwierig zu ermittelnder Parameter, andererseits muss dieser möglichst genau bekannt sein, da die Resultate der thermischen Simulation sehr sensitiv auf Abweichungen reagieren³. Dieses Dilemma findet sich in vielen Publikationen wieder, in welchen durch verschiedenste Methoden die thermische Leitfähigkeit der Wicklung bestimmt wird. Die meisten Publikationen beschreiben eine Parameteranpassung eines FEM-⁴ oder analytischen-Modells⁵ mit thermischen Messungen im Elektromotor. All diese Methoden haben den Nachteil, dass für die präzise Bestimmung nur ein Parameter unbekannt sein darf, was oftmals nicht gegeben ist. Zudem kann bei diesen Methoden der Einfluss von einem Produktionsparameter nur mit dem kostspieligen Aufbau von Motoren untersucht werden. Eine Übersicht über die in der Literatur aufgeführten Werte zeigt, dass aktuell keine einheitlichen Werte zur thermischen Leitfähigkeit von Motorenwicklungen vorhanden sind (vgl. Abbildung 1).

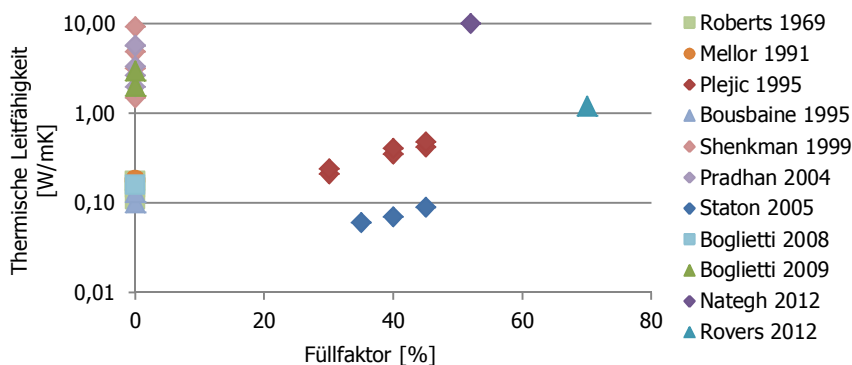


Abbildung 1: Thermische Leitfähigkeiten für Wicklungen aus der Literatur

In einer der wenigen Forschungsarbeiten, welche zur Messung der thermischen Leitfähigkeit von Wicklungsproben publiziert wurde, beschreibt Simp-

³ Boglietti et al. 2004

⁴ Boglietti et al. 2009

⁵ Boglietti et al. 2009

son et al.⁶ einen Aufbau, in dem die thermische Leitfähigkeit von einer würfelförmigen Wicklungsprobe gemessen wird. Jedoch wird in dieser Publikation weder die Messgenauigkeit noch die Konstruktion zur Minimierung des Messfehlers thematisiert. Da bislang keine kommerziellen Messgeräte für die Messung von anisotropen Wicklungsproben erhältlich sind, ist die Konstruktion eines speziellen Messaufbaus nötig. Diese spezielle Konstruktion ermöglicht das kostengünstige und schnelle Testen einer großen Versuchsserie von realitätsnahen Wicklungsproben. In den folgenden Kapiteln wird diese Konstruktion näher beschrieben.

2 Messaufbau

Mit dem Ziel, die Wärmeleitfähigkeit der Wicklung auf 5 % genau zu bestimmen, wurde hierfür ein Messkonzept erarbeitet. Für das erarbeitete Konzept wurde mittels eines analytischen Modells die Messunsicherheit ermittelt. Die Annahmen und Vereinfachungen, welche für das analytische Modell getroffen wurden, sind mit einer thermischen FEM-Simulation überprüft und bestätigt worden. Mit Hilfe dieses validierten Modells wurde ein Geometrieparameter optimiert um den Messfehler zu minimieren. Das optimierte Design wurde aufgebaut und der Messfehler durch verschiedene Referenzproben validiert.

Die thermische Leitfähigkeit der Wicklungsprobe wurde mittels eines Wärmestroms, welcher die Probe quer durchdringt, gemessen. Durch die Quantifizierung des Wärmestroms \dot{Q} und des Temperaturabfalls über der Wicklungsprobe ΔT errechnet sich der thermische Widerstand der Probe $R_{Wicklung}$ mit der Formel (1). Mittels der Geometrieparameter der Probe kann aus dem thermischen Widerstand die gesuchte thermische Leitfähigkeit berechnet werden.⁷

$$R_{Wicklung} = \frac{d}{\lambda_{Wicklung} * A} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (1)$$

Der Wärmestrom wird durch eine Anordnung von Leistungswiderständen (Nr. 4 in Abbildung 2) als Wärmequelle und einer Kühlplatte (Nr. 7 in Abbildung 2) als Senke generiert. Die Wicklungsprobe (Nr. 12 in Abbildung 2) ist zwischen zwei Schenkeln eingespannt. Der Wärmestrom durchfließt diese

⁶ Simpson et al. 2013

⁷ Bergman 2011

zwei Metallschenkel inklusive der Probe. Um eine homogene Wärmeeinleitung in den Schenkel sicherzustellen, wird zwischen den Leistungswiderständen und dem Schenkel ein Aluminiumteil (Nr. 3 in Abbildung 2) angebracht. Aufgrund der großen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium und der geringen Abstände zwischen den Widerständen wird angenommen (Annahme 1), dass die Wärme vom Aluminiumteil ausreichend homogen in den Schenkel eingeleitet wird.

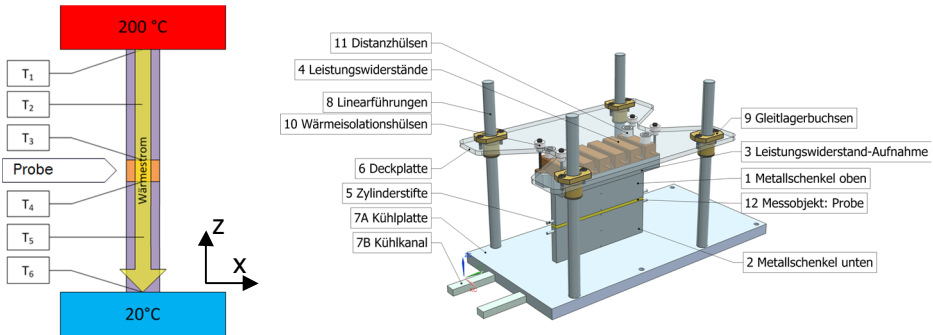


Abbildung 2: Links, Aufbau im Schnitt. Rechts, 3D Darstellung des Versuchsaufbaus.

Da ein unidirektionaler Wärmestrom für die präzise Messung von Nöten ist, müssen die Schenkel seitlich möglichst gut isoliert werden. Zu diesem Zweck wurden die Seitenflächen der Metallschenkel mit Steinwolle thermisch isoliert. Für die Auslegung des Messaufbaus wurde ein analytisches Modell hergeleitet, welches das thermische Verhalten berechnet. Für dieses analytische Modell wurde ein unidirektionaler Wärmestrom in Z-Richtung angenommen (Annahme 2). Die Deckplatte (Nr.6 in Abbildung 2) hält vier Linearführungen (Nr. 8 in Abbildung 2) zusammen, welche den oberen Metallschenkel führen. Dadurch ist sichergestellt, dass sich der obere Metallschenkel direkt über dem unteren befindet.

Aus Formel 1 wird klar, dass der eingepreßte Wärmestrom bekannt sein muss. Dieser Wärmestrom kann durch den Temperaturabfall im Schenkel bestimmt werden (siehe Formel 2). Hierzu muss die Wärmeleitfähigkeit der Metallschenkel möglichst präzise bekannt sein. In Stählen ist die Wärmeleitfähigkeit stark von der Temperatur abhängig.⁸ Ein Material, bei welchem die Wärmeleitfähigkeit im Gegensatz zu den meisten anderen Stählen sehr gut

⁸ Peet et al. 2011

dokumentiert ist, ist Armco-Eisen. Es wurde 1934 von R. W. Powell als „thermal-conductivity standard“ gewählt⁹. Aus diesem Grunde wurde dieses Material für die Schenkel gewählt. Der Wärmestrom in diesen Schenkeln kann durch folgende Formel bestimmt werden:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{d_{13}}{\lambda_{Schenkel} * A}} \quad (2)$$

Die Temperaturen im Schenkel wurden mit Hilfe von Thermofühlern in kleinen Löchern gemessen. Es wird angenommen, dass diese Löcher den Wärmefluss nicht bedeutend beeinflussen (Annahme 3). Der thermische Widerstand der Wicklung kann aus dem Wärmestrom und der oberen und unteren Temperatur der Probe berechnet werden:

$$R_{Litze} = \frac{T_3 - T_4}{\dot{Q}} \quad (3)$$

Aus dem thermischen Widerstand und den Dimensionen der Probe wird die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnet:

$$\lambda_{Litze} = \frac{d}{R_{Litze} * A} \quad (4)$$

Mit d : Probenhöhe, A : Querschnittsfläche. Einsetzen der Gleichungen (2) und (3) in (4) liefert:

$$\lambda_{Litze} = \lambda_{Schenkel} \frac{d}{d_{13}} \frac{T_1 - T_3}{T_3 - T_4} \quad (5)$$

Es wird ersichtlich, dass die Höhe der Wicklungsprobe d bekannt sein muss. Die Probenhöhe entspricht dem vertikalen Abstand zwischen den Schenkeln. Um den Abstand bei jeder Messung genau bestimmen zu können, werden in die Stirnflächen der Metallschenkel hervorstehende Zylinderstifte angebracht. Mit einem Mikrometer kann somit die Höhe der Wicklungsprobe

⁹ Powell 1962

präzise bestimmt werden. Der Wärmestrom wird zudem redundant am unteren Schenkel (T_4 bis T_6) gemessen (siehe Abbildung 2).

3 Minimierung des Messfehlers

Durch die Anwendung des Gaußsche Fortpflanzungsgesetzes (6) auf die Gleichung (5) kann die Messunsicherheit der Wärmeleitfähigkeit der Wicklung ermittelt werden. Hierfür werden alle unabhängigen Eingangsgrößen x_i aus Gleichung (5) abgeleitet. Aus der Summe dieser Ableitungen und deren Unsicherheiten $u(x_i)$ (siehe Tabelle 1) errechnet sich die totale Messunsicherheit $u(\lambda_{Litze})$ folgendermaßen¹⁰.

$$u(\lambda_{Litze})^2 = \sum_i \left(\frac{d\lambda_{Litze}}{dx_i} u(x_i) \right)^2 \quad (6)$$

Durch das Einsetzen folgender angenommenen Unsicherheiten kann die Messunsicherheit berechnet werden:

Tabelle 1: Unsicherheiten der Eingangsgrößen

Grösse	Nennwert		Unsicherheit	
$\lambda_{Schenkel}$	x_1	65 W/(mK)	$u(x_1)$	1.3 W/(mK)
d	x_2	3.45 mm	$u(x_2)$	0.03 mm
d_{13}	x_3	40 mm	$u(x_3)$	0.7 mm
T_1	x_4	180 °C	$u(x_4)$	0.65 °C
T_3	x_5	128.74 °C	$u(x_5)$	0.65 °C
T_4	x_6	71.26 °C	$u(x_6)$	0.65 °C

Bei einer normierten Probengeometrie und einer gegebenen Heitz- und Kühltemperatur bleibt in Formel 5 die Schenkellänge (d_{13}) als letzte zu bestimmende Größe. Wenn die Schenkellänge zu lang ist, kann durch den hohen Temperaturabfall ($T_1 - T_3$) der Wärmestrom im Schenkel genau bestimmt werden, dafür kann der Temperaturabfall über der Probe ($T_3 - T_4$) nicht mehr genau bestimmt werden. Wird der Schenkel zu kurz, gilt das Gegenteil. Somit

¹⁰ Deutsches Institut für Normung 1996

ergibt sich ein Optimum für jeden Probenleitwert (siehe Abbildung 3 links). Da zudem die thermische Leitfähigkeit der Proben noch nicht bekannt ist, wurde dies für diverse Wärmeleitfähigkeiten zwischen 1 W/mK und 20 W/mK durchgeführt.

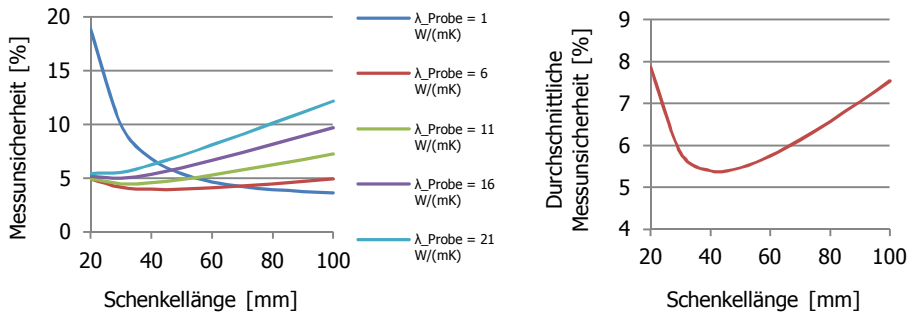


Abbildung 3: Messunsicherheit in Abhängigkeit der Schenkellhöhe

Für eine homogene Gewichtung der erwarteten Wärmeleitfähigkeiten wird eine mittlere Messunsicherheit für mehrere Schenkellängen berechnet (siehe Abbildung 3 rechts). Aus den angenommenen Messunsicherheiten und Wärmeleitfähigkeiten ergibt sich eine optimale Schenkellänge (ca. 40 mm), bei welcher der Messfehler minimal wird. Der zu erwartende Messfehler in Abhängigkeit der Probenleitfähigkeit kann für die ermittelte optimale Schenkellänge somit mit der Formel (6) bestimmt werden.

4 Thermische Simulation Messaufbau

Die Annahmen (1 bis 3) des analytischen Modells wurden durch eine thermische 3D-FEM Simulation überprüft. Diese Überprüfung wird hier vorgestellt.

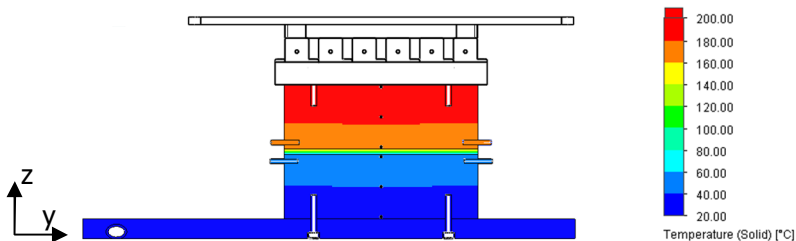


Abbildung 4: FEM-Simulierte Temperaturverteilung im Messaufbau

Ein homogener Temperaturabfall in den Schenkeln sowie ein hauptsächlich unidirektionaler Wärmefluss (Annahme 2) kann aus den Simulationen erkannt werden (siehe Abbildung 4). Um die als konstant angenommenen Randbedingungen (Annahme 1) zu bewerten, wurden die Temperaturabweichungen entlang von der Y-Achse an den jeweiligen Z-Positionen in Abbildung 5 ausgewertet.

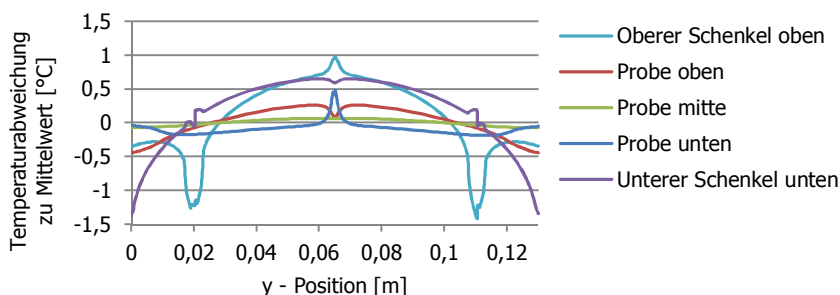


Abbildung 5: Ausgewertete Temperaturabweichung an verschiedenen Z-Positionen entlang der Y-Achse

In Abbildung 5 wurde der Temperaturverlauf an der Schnittstelle zur Kühlbeziehungsweise zur Heizplatte analysiert. Die Ausreißer lassen sich durch die Schraubenlöcher erklären und müssen nicht weiter betrachtet werden, da sie auf den weiteren Kurvenverlauf keinen Einfluss haben. Beide werden zur Mitte hin um maximal 2 °C wärmer. Dies lässt sich durch den Randeffect erklären, weil hier der größte Wärmestrom in die Isolation entweicht. Da die Temperaturdifferenz nur 1 % zum maximalen Temperaturunterschied ausmacht, wird angenommen, dass dieser Effekt vernachlässigt werden kann. Bei der Probe fallen die Ausreißer in der Mitte auf, diese sind durch die Bohrungen für die Thermolemente zu erklären. Ein maximaler Temperaturunterschied von ca. 0.5 °C zur Trendlinie ist zu beobachten. Da der Temperatureinfluss der Löcher kleiner ist als die Messunsicherheit der Messfühler, wurde dieser Effekt ebenfalls vernachlässigt (Annahme 3). Durch die 3D-FEM Simulation konnten somit die Annahmen (1 bis 3) für das analytische Modell bestätigt werden.

5 Messung von Referenzproben

Das Ziel eine Messgenauigkeit von 5 % zu erreichen, konnte nach der Montage des Messaufbaus überprüft werden. Um die Messgenauigkeit zu testen, wurden Referenzproben mit bekannter Leitfähigkeit ausgemessen.

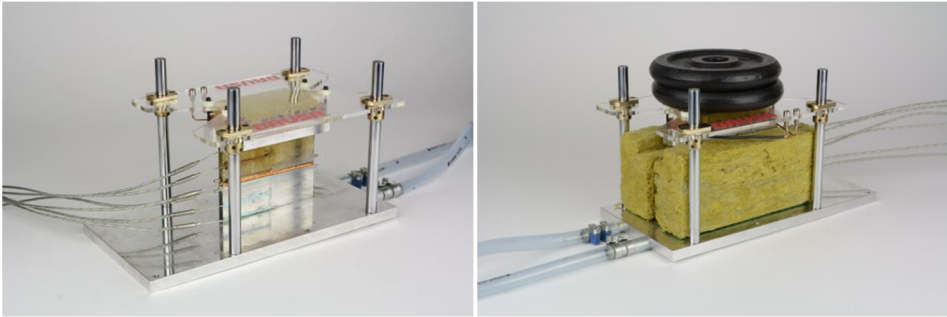


Abbildung 6: (links) Versuchsaufbau mit eingespannter Probe, (rechts) Durchführung der Messung mit Isolation und Gewichten

Während der Durchführung der Messungen wird die Kühlung wie auch die Verlustleistung eingeschaltet. Die Temperaturen im System steigen an und schwingen sich nach einer gewissen Zeit ein (siehe Abbildung 7). Die Wärmeleitfähigkeit kann für all diese Messpunkte ausgewertet werden, jedoch sind nur die Werte im eingeschwungenen Zustand aussagekräftig. Ein Kriterium für die Steigung der thermischen Leitfähigkeit über die Zeit wurde getroffen, um den eingeschwungenen Zustand zu definieren.

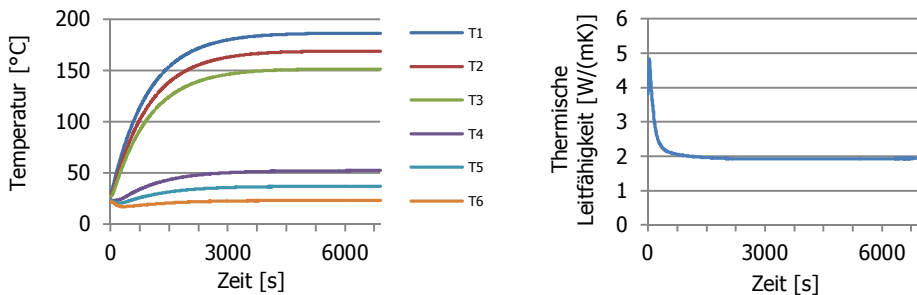


Abbildung 7: Temperaturverlauf (links) und die errechnete thermische Leitfähigkeit (rechts) einer typischen Messung

Anhand von zwei Proben konnte die mit Formel 6 berechnete Messunsicherheit überprüft werden. Durch das Vergleichen mit Literaturwerten¹¹ konnte der Messfehler bestimmt werden. Die errechnete Messunsicherheit wurde anschließend mit dem tatsächlich ermittelten Messfehler verglichen. Dies er-

¹¹ VDI e. V. 2013

möglichte eine Validierung der Auslegung des Prüfstands und des analytischen Modells.

Tabelle 2: Vergleich der Messunsicherheit und des Messfehlers

Probe	Literaturwert [W/mK]	Messwert [W/mK]	Messunsicherheit [%]	Messfehler [%]
S235JR	54 W/mK	50.9 ±	± 13.7 %.	- 5.6%
PTFE 0.3mm	0.24	0.215 ± 0.023	± 10.7 %	- 10.4 %
PTFE 0.5mm	0.24	0.246 ± 0.017	± 6.9 %	+ 2.5 %

Aus dem Vergleich der errechneten Messunsicherheit und des gemessenen Messfehlers in der Tabelle 2 wird ersichtlich, dass die gemessenen Werte innerhalb der rechnerisch bestimmten Messunsicherheiten liegen. Infolge dieser Übereinstimmung wird ersichtlich, dass mit der Fehlerrechnung (vergleiche Kapitel 3) und dem analytischen Modell (vergleiche Kapitel 2) die Messunsicherheit zuverlässig berechnet werden kann.

6 Schlussfolgerung

In dieser Publikation wurde das Vorgehen für die Konstruktion eines Messaufbaus zur präzisen Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit von Motorwicklungen vorgestellt. Sowohl konstruktive Elemente, welche eine präzise Messung ermöglichen, wie auch eine Optimierungsmethode zur Minimierung des Messfehlers wurden präsentiert. Erste Messungen an Referenzproben bestätigen die hohe errechnete Messgenauigkeit des Aufbaus.

Literatur

- [1] Bergman, Theodore L. (2011): Fundamentals of heat and mass transfer. 7. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley.
- [2] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Staton, D. (2008): Determination of critical parameters in electrical machine thermal models. In: Industry Applications, IEEE Transactions on 44 (4), S. 1150–1159.
- [3] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Staton, D. A. (2004): TEFC induction motors thermal models: a parameter sensitivity analysis. In: Industry applications conference, 2004. 39th IAS annual meeting., Bd. 4, S. 2469–2476 vol.4.

-
- [4] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Staton, D.; Shanel, Martin; Mueller, M.; Mejuto, C. (2009): Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56 (3), S. 871–882.
- [5] Bousbaine, A.; McCormick, M.; Low, W. F. (1995): In-situ determination of thermal coefficients for electrical machines. In: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 10 (3), S. 385–391.
- [6] Deutsches Institut für Normung (1996): Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit. 1996. Aufl. Berlin: Beuth (Deutsche Norm, 1319,3).
- [7] Helen Lindblom et al. (2010): *Energy in Sweden facts and figures*. The Swedish Energy Agency.
- [8] John Conti et al. (2013): *International energy outlook 2013*. U.S. Energy Information Administration.
- [9] Mellor, P. H.; Roberts, D.; Turner, D. R. (1991): Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. In: *Electric Power Applications, IEE Proceedings B* 138 (5), S. 205–218.
- [10] Nategh, S.; Wallmark, O.; Leksell, M.; Shuang Zhao (2012): Thermal Analysis of a PMaSRM Using Partial FEA and Lumped Parameter Modeling. In: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 27 (2), S. 477–488.
- [11] Nicolet, André; Belmans, R. (Hg.) (1995): *Electric and magnetic fields*: Springer US.
- [12] Peet, M. J.; Hasan, H. S.; Bhadeshia, H. K. D. H. (2011): Prediction of thermal conductivity of steel. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (11–12), S. 2602–2608.
- [13] Plejić, Matjaž; Goričan, Viktor; Hribernik, Božidar (1995): FEM Thermal modeling of an induction motor. In: André Nicolet und R. Belmans (Hg.): *Electric and magnetic fields*: Springer US, S. 155-158.
- [14] Powell, R. W. (1962): 42 - Armco Iron as a Thermal Conductivity Standard. In: JOSEPH F. MASI und DONALD H. TSAI (Hg.): *Progress in International Research on Thermodynamic and Transport Properties*: Academic Press, S. 454–465.

-
- [15] Pradhan, M. K.; Ramu, T. S. (2004): Estimation of the hottest spot temperature (HST) in power transformers considering thermal inhomogeneity of the windings. In: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 19 (4), S. 1704–1712.
- [16] Rovers, J. M. M.; Stöck, M.; Jansen, J. W.; van Lierop, C. M. M.; Lomonova, E. A.; Perriard, Y. (2013): Real-time 3D thermal modeling of a magnetically levitated planar actuator. In: *Special Issue on Linear Drives* 23 (2), S. 240–246.
- [17] Shenkman, A.; Chertkov, M. (1999): Heat conditions of a three-phase induction motor by a one-phase supply. In: *Electric Power Applications, IEE Proceedings -* 146 (4), S. 361–367.
- [18] Simpson, N.; Wrobel, R.; Mellor, P. H. (2013): Estimation of Equivalent Thermal Parameters of Impregnated Electrical Windings. In: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 49 (6), S. 2505–2515.
- [19] Staton, D.; Boglietti, A.; Cavagnino, A. (2005): Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors. In: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 20 (3), S. 620–628.
- [20] T. J. Roberts (1969): Determination of the thermal constants of the heat flow equations of electrical machines. College of Engineering Technology, Eastlands, Rugby. Department of Electrical Engineering.
- [21] VDI e. V. (2013): *VDI-Wärmeatlas*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

Parametrische biomechanische Simulation am Beispiel des Radfahrens

Jörg Miebling und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

Shrinking product lifecycles and consequently shorter development times demand a decreasing number of iterations as well as physical prototypes to be manufactured. An efficient implementation of the virtual product development paradigm can contribute to achieve these objectives. As product designers do not need general design guidelines, but specific recommendations on how to design products, especially the field of user-centred design holds high potential for the virtual prediction and optimisation of user-product interactions. This contribution features the parametric biomechanical simulation of cycling creating an approach to directly compare design alternatives based on the inner strain condition of the human musculoskeletal system considering the given external boundary conditions.

Keywords: biomechanics, virtual product development, digital human modelling, parametric simulation

1 Einleitung und Motivation

Die Produktentwicklung wird durch immer kürzere Produktlebenszyklen und demzufolge verringerten Entwicklungszeiten vor die Herausforderung gestellt, Iterationen sowie die Anzahl zu fertigender physischer Prototypen im Produktentwicklungsprozess zu reduzieren. Dem kann vor allem durch eine

zunehmende Virtualisierung begegnet werden. Simulationen wie etwa Finite Elemente-, Mehrkörper- oder aber auch Spritzgießsimulationen ermöglichen die Absicherung der Herstellungs- und Nutzungsphase auf Produktebene. Die Berücksichtigung der späteren Nutzer erfolgt jedoch vor allem bei kleineren Unternehmen meist erst ab der Markteinführung. Die über die kontinuierlichen Verbesserungsprozesse generierten Informationen können dann erst bei der Entwicklung von Nachfolgeprodukten mit einfließen. Gelingt es hingegen die späteren Nutzer mit ihren heterogenen Kompetenzen und Bedürfnissen, die über die Nutzung oder Nicht-Nutzung sowie die sichere, komfortable und effektive Nutzbarkeit eines Produktes mitentscheiden, rechnerintern abzubilden und somit bereits frühzeitig in die Produktentwicklung einzubeziehen, können neuartige, innovative und qualitativ hochwertige Produkte entstehen. Wichtig ist jedoch, dass Produktentwickler generische Richtlinien nur bedingt umsetzen können und somit auf präzise Handlungsempfehlungen angewiesen sind [1].

Gegenstand der Forschung ist deshalb die virtuelle Abbildung der Nutzer-Produkt-Interaktion für gesamte Nutzergruppen. Hierbei müssen zuerst Gruppen virtueller Repräsentanten der zu betrachtenden Nutzerpopulation erzeugt werden. Dies kann beispielsweise unter Verwendung empirischer Daten aus Populationsdatenbanken erfolgen [2]. Um schließlich Aussagen über die Passung von Nutzer und Produkt unter Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen treffen zu können, sind neben der Generierung alters- und leistungsadaptierter digitaler Nutzergruppen parametrische Simulationen dieser nötig. Ein entsprechendes Vorgehen wird im Folgenden anhand einer einzelnen Person am Beispiel des Radfahrens genauer dargestellt.

2 Biomechanische digitale Menschsimulation

In der Produktentwicklung werden bis heute wenn überhaupt meist nur anthropometrische Menschmodelle verwendet. Diese werden oft innerhalb kommerzieller CAD-Systeme bereitgestellt und ermöglichen beispielsweise Erreichbarkeits- und Sichtanalysen. Aktuelle Fortschritte lassen jedoch eine zunehmende Anwendung biomechanischer digitaler Menschsimulationssysteme bei der Entwicklung zukunftsweisender Produkte und technischer Systeme sowie der Auslegung zukünftiger Arbeitsplätze vermuten. Solche Simulationssysteme ermöglichen die Analyse des inneren Beanspruchungszustandes bei dynamischen Bewegungen unter Berücksichtigung neuromuskulärer Zusammenhänge und äußerer Belastungen von Muskel-Skelett-Systemen. Beispiele hierfür sind das kommerziell verfügbare AnyBody Modeling System [3] und das Open Source-System OpenSim [4]. OpenSim ermöglicht eine vollständige Kopplung mit MATLAB, wodurch eine Automatisierung von der vorbereitenden

Modellbildung über die eigentliche Berechnung bis hin zur Auswertung der Versuchsergebnisse erreicht werden kann. Die besondere Herausforderung besteht in der umfassenden Integration biomechanischer Menschsimulationen in die Produktentwicklung [5]. Bei biomechanischen Simulationen ist der qualitative Vergleich von Designalternativen dem quantitativen Vergleich von Absolutwerten vorzuziehen, da die zur Verfügung stehenden biomechanischen digitalen Menschmodelle und -analysen meist noch nicht in ausreichendem Maße validiert sind. Zusätzlich schlagen sich unvermeidbare Ungenauigkeiten der Eingangsgrößen auf die Ergebnisqualität der Simulationen nieder. Aus diesen Gründen erscheint die parametrische biomechanische Simulation zielführend für die Analyse und Optimierung der Nutzer-Produkt-Interaktion für größere Nutzergruppen.

Je nach prognostiziertem Nutzungskontext ergeben sich unterschiedliche nutzerzentrierte Entwicklungsziele, die als Bewertungs- oder Vergleichsgrößen biomechanischer Simulationen herangezogen werden können. Einerseits kann die Minimierung der durchschnittlichen oder maximalen Muskelaktivität, des Energieumsatzes, der Gelenkreaktionskräfte, der Wirbelsäulenkompression oder aber auch des Joint Strain Index nach [6] bei stark beanspruchenden, mehrfach ausgeführten oder zyklischen Bewegungen und Tätigkeiten sinnvoll sein. Andererseits kann aber auch eine gezielte Muskelrekrutierung, eine konstante Kraftentfaltung oder Muskelaktivierung, wie etwa bei Trainings- und Rehabilitationsgeräten, gefordert werden.

3 Parametrische Simulation des Radfahrens

Das Fahrrad zählt zu den verbreitetsten mobilitäts- und gesundheitsfördernden Produkten [7]. Das Radfahren eignet sich im Vergleich zu anderen im Alltag vorkommenden Nutzer-Produkt-Interaktionen in besonderem Maße für einen ersten Versuch der parametrischen biomechanischen Simulation. Die Bewegung ist bereits über die Geometrie des Fahrrades eingeschränkt und kann auch ohne Bewegungsaufzeichnungsverfahren gut kinematisch nachempfunden werden. Darüber hinaus sind in der Literatur bereits umfassende Erfahrungen sowie Messwerte bezüglich der Muskelaktivierungsverläufe und Krafterzeugung vorhanden, auf die zur Absicherung der Versuchsergebnisse zurückgegriffen werden kann. Die im weiteren Verlauf vorgestellte Simulation untersucht die Auswirkungen unterschiedlicher Sitzhöhen auf die Krafterzeugung und innere Beanspruchung des Radfahrers. Der erste Schritt ist der Aufbau eines Simulationsmodells und die Erzeugung der Radfahrbewegungen für die unterschiedlichen Sitzhöhen. Dem schließt sich die Simulation zur Berechnung der Muskelaktivierungsverläufe sowie die abschließende Interpretation der Versuchsergebnisse an.

3.1 Modellbildung

Als Menschmodell dient ein mit der OpenSim-Anwendung mitgeliefertes dreidimensionales muskuloskeletales Modell, das die unteren Extremitäten und den Rumpf des Menschen detailliert nachbildet. Es wurde von DARRYL THELEN (University of Wisconsin-Madison), AJAY SETH, FRANK C. ANDERSON und SCOTT L. DELP (Stanford University) erstellt. Die Gelenkdefinitionen wurden dabei aus [8], die anthropometrischen Daten sowie die Gelenkverbindung zwischen Becken und Wirbelsäule aus [9] übernommen. Das verwendete planare Kniemodell ist in [10] beschrieben. Das vorliegende biomechanische Menschmodell wiegt etwa 76 kg und besitzt eine Schrittlänge von 0,84 m. Es ist für vorwärts-dynamische Berechnungen geeignet und beinhaltet 23 Freiheitsgrade sowie 92 Muskelabschnitte, die insgesamt 76 Muskeln der Beine und des Torsos repräsentieren. Für die parametrische Simulation des Radfahrens wurden an diesem Menschmodell einige Anpassungen vorgenommen. Der virtuelle Versuchsaufbau ist in Bild 1 skizziert.

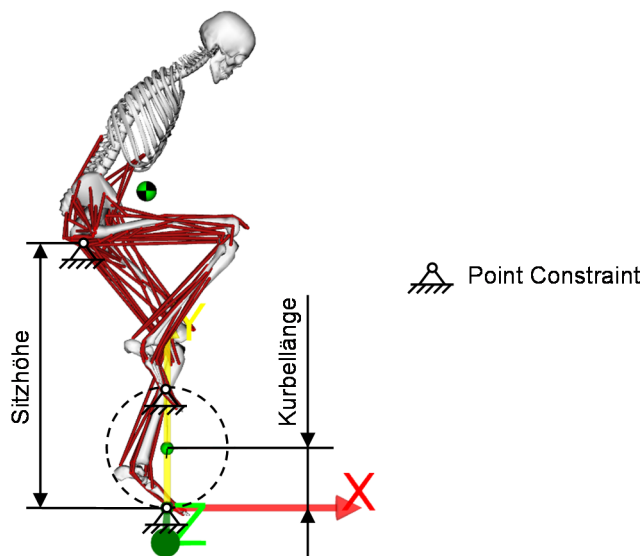


Bild 1: Anpassung des OpenSim-Modells für die Radfahr-Simulation

Damit sich die Füße wie beim Radfahren auf einer Kreisbahn um die Kurbelachse bewegen können, wurde zuerst die Tretkurbel als zusätzlicher Körper mit einem rotatorischen Freiheitsgrad am globalen Koordinatensystem des Modells angeheftet. Danach wurden die Fußballen an den Mittelfußknochen über Punkt-zu-Punkt-Zwangsbedingungen (Point Constraints) versetzt an der

Kurbel befestigt. Die Kurbellänge beträgt im vorliegenden Fall 0,175 m. Die Trägheit der Vorwärtsbewegung wird in der Realität über das Ritzel des Hinterrades, dann über die Kette und das Kettenblatt schließlich auf die Kurbel übertragen. Um dies abbilden zu können, musste im vorliegenden reduzierten Modell die Trägheit des Gesamtsystems auf die Tretkurbel umgerechnet werden. Das Massenträgheitsmoment um die Kurbelachse folgt in Anlehnung an [11] folgender Beziehung:

$$J_{Gesamt,Kurbel} = (r_{Rad}^2 \cdot m_{Gesamt} + 2 \cdot J_{Rad}) \frac{f_{Rad}^2}{f_{Kurbel}^2}$$

r_{Rad} ist dabei der Radius des Hinterrades, m_{Gesamt} die Gesamtmasse von Fahrrad und Fahrer, J_{Rad} die Massenträgheit eines Rades, f_{Rad} die Drehzahl des Hinterrades und f_{Kurbel} die Drehzahl der Tretkurbel. Die rotatorische Trägheit der Tretkurbel ist im Vergleich zur Gesamtträgheit sehr klein und wurde deshalb vernachlässigt. Bei einer Gesamtmasse von 90 kg, einer Trittfrequenz von 60 U/min und einer Fahrgeschwindigkeit von etwa 25 km/h entspricht dies einer Gesamtträgheit an der Tretkurbel von etwa 117 kg·m².

Zur Nachbildung der Sitzposition (Sitzbeinhöcker auf Sattel) wurde der Beckenknochen über ein weiteres Point Constraint in geeigneter Lage zur Kurbel am globalen Koordinatensystem angeheftet. Becken, Beine und Kurbel bilden schließlich eine geschlossene Kette, deren Winkelverhältnisse von der Kurbelstellung sowie der eingestellten Sitzhöhe abhängen. Die Sitzposition entspricht in etwa der auf einem Trekkingfahrrad.

3.2 Bewegungserzeugung und Modellierung der äußeren Lasten

Die Bewegung des Menschmodells kann grundsätzlich über unterschiedliche Verfahren erzeugt werden. Wie in der Sport- und Bewegungsmedizin üblich, können beispielsweise markerbasierte Trackingverfahren eingesetzt werden. Diese zeichnen sich durch eine große Genauigkeit aus, erfordern jedoch einen hohen Vorbereitungsaufwand und stellen deshalb keine Option für die spätere Simulation größerer Nutzergruppen dar. Die fokussierten Nutzer müssten allesamt ins Bewegungslabor kommen und direkt mit einem Produktprototyp in Kontakt treten. Beim vorgestellten Ansatz ist dieser jedoch idealerweise noch nicht vorhanden. Außerdem müssten für die nachgeschaltete Simulation die auf den Menschen einwirkenden äußeren Lasten mit aufgezeichnet werden. Neben den markerbasierten Verfahren wurden markerlose Bewegungsaufzeichnungsverfahren entwickelt, die sich Stereovision oder Tiefenkameras zu Nutze machen [12]. Dadurch können die Bewegungen der Testnutzer zwar mit weniger Aufwand erfasst werden, jedoch müssten auch

hier die Nutzer mit einem physischen Prototyp in Kontakt treten. Zusätzlich müsste bei der Verwendung von Bewegungsaufzeichnungsverfahren für jeden einzelnen Testnutzer ein genaues virtuelles Abbild geschaffen werden, um valide Berechnungsergebnisse zu erlangen. Dieser Aufwand scheint für größere Nutzergruppen nicht zielführend. Bewegungssyntheseverfahren können hier Abhilfe verschaffen [5], indem versucht wird die Bewegung des Menschen durch Optimierung möglichst realistisch abzuschätzen.

Das Radfahren ist wie bereits erwähnt ein relativ festgelegter und bekannter Bewegungsablauf, welcher auch mittels effizienterer Verfahren detailgetreu nachgebildet werden kann. Die Bewegungserzeugung erfolgte im vorgestellten Beispiel in MATLAB und folgt der Vorgehensweise aus Bild 2.

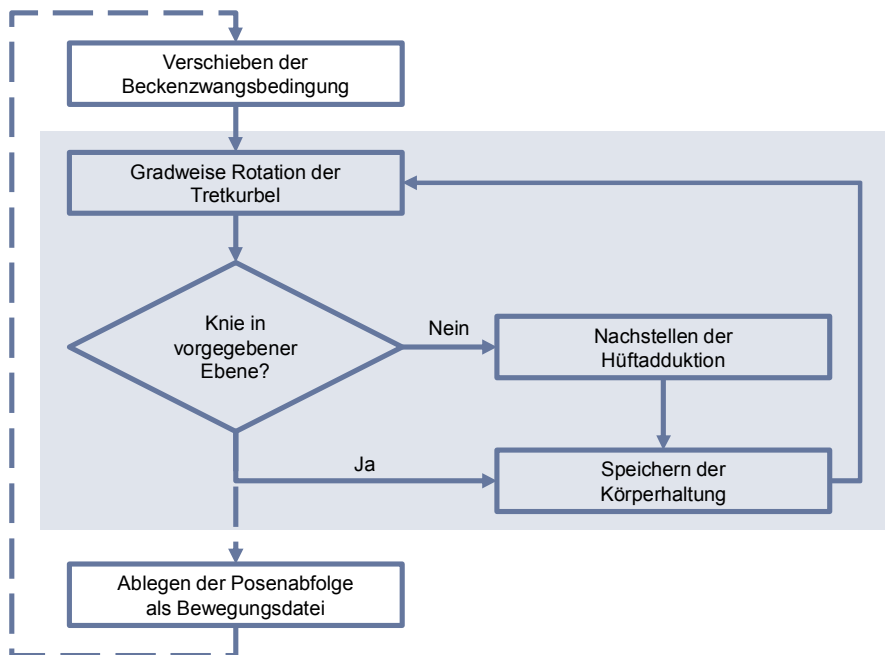


Bild 2: Vorgehensweise zur Erzeugung der Radfahrbewegung

Der Prozess zur Bewegungserzeugung startet mit der Einstellung der gewünschten Sitzhöhe durch Verschieben der Beckenzwangsbedingung in y-Richtung. Der resultierende Simulationsaufbau wird dann als OpenSim-Modelldatei abgelegt. Danach wird die Kurbel gradweise gedreht, wobei die resultierende Körperhaltung für jeden Zeitschritt mitgeschrieben und schließlich in einer Bewegungsdatei für die spätere Simulation abgelegt wird. In je-

dem dieser Zeitschritte muss kontrolliert werden, ob sich die Knie in der jeweiligen im Vorfeld definierten Ebene bewegen, damit eine realitätsgetreue Bewegung erhalten werden kann. Gegebenenfalls wird das jeweilige Knie über die Hüftadduktion in die gewünschte Lage zurückgestellt. Die Bewegungsaufzeichnung wurde auf diese Weise für alle gewünschten Sitzhöhen wiederholt. Bei der Aufzeichnung der Radfahrbewegung waren einige Freiheitsgrade des Menschmodells gesperrt, da es sich sonst nicht in einer aufrechten Position halten könnte. Diese wurden nach der Bewegungserzeugung wieder geöffnet, sodass sich das Menschmodell in der Simulation durch eigene Muskelkraft aufrecht halten muss.

Ein weiteres wichtiges Schlüsselement bei der biomechanischen Simulation ist das Wissen über die Lasten, die bei der jeweiligen Nutzer-Produkt-Interaktion von außen auf den Menschen einwirken. Beim Radfahren erzeugt der Nutzer üblicherweise ein Antriebsmoment an der Tretkurbel, das schließlich in Vortrieb des Fahrrades umgewandelt wird. Hierbei wird erfahrungsgemäß kein konstantes Drehmoment an der Tretkurbel erzeugt. Dieses folgt vielmehr einem harmonischen Kurvenverlauf. Im oberen und unteren Totpunkt wird das Drehmoment minimal, in 90° und 270°-Stellung der Tretkurbel maximal [11][13]. Das Antriebsmoment wurde für die Simulation als Widerstandsmoment entgegen der Tretbewegung modelliert (siehe Bild 3). Diesen Widerstand muss das Menschmodell beim Treten schließlich überwinden. Die Simulation sollte die Fahrt auf einem Trekkingrad bei etwa 25 km/h in der Ebene ohne Windeinflüsse widerspiegeln. Dazu ist bei einer Trittfrequenz von 60 U/min eine Antriebsleistung von etwa 150 W nötig.

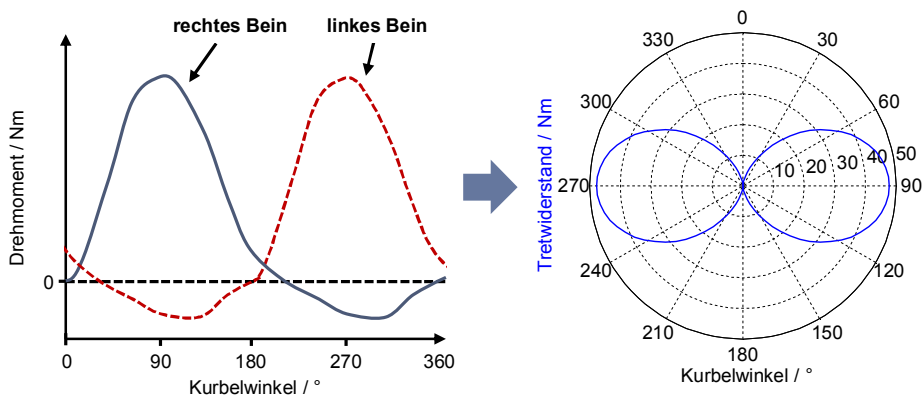


Bild 3: Verlauf der Einzelkomponenten des Antriebsdrehmoments in der Realität (links) und modellierter Gesamttretwiderstand an der Tretkurbel für die Simulation (rechts)

3.3 Muskuloskeletale Simulation

Zur Stabilisierung der Simulation wurden an allen Freiheitsgraden außer der Tretkurbel Reserve-Drehmomentaktuatoren angebracht. Danach konnten die CMC-Simulationen (Computed Muscle Control) für die unterschiedlichen Sitzhöhen aus MATLAB heraus gestartet werden. CMC ist eine optimierungsbasierte vorwärts-dynamische Methode zur Berechnung der Anregungsverläufe von Aktuatoren redundanter Mehrkörpersysteme. Diese ist gut geeignet beim Auftreten von Nichtlinearitäten und zeitverzögerter Krafterzeugung, wie es bei Muskeln der Fall ist. Bei muskuloskeletalen Mehrkörpersystemen bedeutet dies, dass mit Hilfe der CMC-Simulation die für die Erzeugung der vorgegebenen Bewegung notwendigen Muskelaktivierungsverläufe unter Berücksichtigung der zu erzeugenden äußeren Kräfte ermittelt werden können. Die Simulation des Radfahrens kann als erfolgreich angesehen werden, da bei allen Sitzhöhen die Trackingfehler (Differenz von vorgegebener zu von CMC erzeugter Bewegung) sowie die Residuen (erzeugte Drehmomente der Reserve-Aktuatoren) sehr klein sind.

3.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

Nach Durchführung der Simulationen gilt es die dabei gewonnenen Ergebnisse zu analysieren und die richtigen Schlüsse hinsichtlich der Effizienz der Bewegungen sowie der hervorgerufenen inneren Beanspruchungen zu ziehen, um auf dieser Basis die Sitzposition für den simulierten Nutzer optimieren zu können.

Da das verwendete Menschmodell noch nicht für die Simulation von Radfahrbewegungen validiert war, wurden die aus der Simulation gewonnenen Muskelaktivierungsverläufe mit empirischen Daten [14][15] verglichen. Im Laborversuch wurden die Muskelaktivierungen mittels Elektromyografie (EMG) aufgezeichnet. Bild 4 zeigt exemplarisch die Übereinstimmung der Aktivierungszeitpunkte sowie Aktivierungsverläufe von EMG-Messung [14] und biomechanischer Simulation für den großen Gesäßmuskel (Musculus gluteus maximus) und den geraden Muskel des Oberschenkels (Musculus rectus femoris). Die Kurvenverläufe sind lediglich um einige Grad verschoben, da die Totpunkte der EMG-Messung und der Simulation nicht genau übereinstimmen. [14] enthält die Kurvenverläufe für insgesamt zehn Muskeln der unteren Extremität. Auch für die hier nicht dargestellten Muskeln stimmen die Verläufe gut überein, weshalb von einer sehr guten Abbildung der Realität durch die Simulation ausgegangen werden kann.

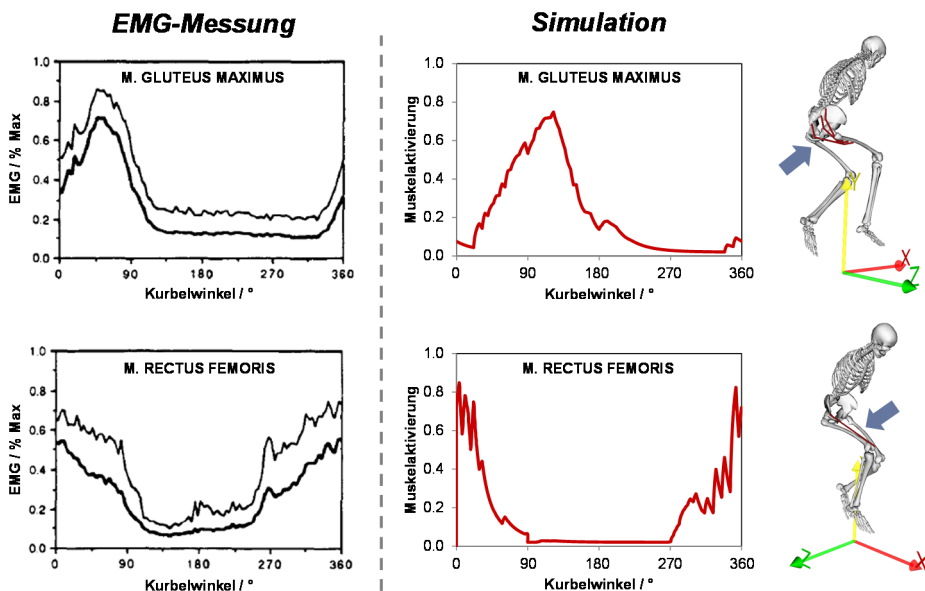


Bild 4: Vergleich der Muskelaktivierungsverläufe aus der Simulation (Sitzhöhe: 0,76 m) mit EMG-Messungen aus [14]

Im weiteren Verlauf werden die Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Sitzhöhen miteinander verglichen. Bild 5 zeigt exemplarisch die durchschnittliche Muskelaktivierung des vierköpfigen Oberschenkelstreckers (Musculus quadriceps femoris) sowie des großen Gesäßmuskels (Musculus gluteus maximus) über die komplette Kurbelumdrehung. Die mittlere Aktivierung sinkt bei diesen Muskeln mit steigender Sitzhöhe des digitalen Menschmodells. Für den M. quadriceps femoris ist dieser Trend stärker ausgeprägt. Dies deckt sich mit empirischen Erkenntnissen aus der Literatur [15].

OpenSim stellt zusätzlich die Möglichkeit zur Verfügung den Energieverbrauch der Muskeln des Menschmodells zu berechnen [16]. Hierbei werden die Aktivierungs-, die Erhaltungs-, die Längenänderungswärme sowie die von den kontraktilelementen erzeugte mechanische Arbeit berücksichtigt. In Bild 6 ist der Energieumsatz über je eine Kurbelumdrehung für die verschiedenen Sitzhöhen aufgetragen. Es fällt auf, dass auch der Energieverbrauch mit steigender Sitzhöhe bis zu einem gewissen Grad abnimmt und somit die Effizienz der Bewegung ansteigt.

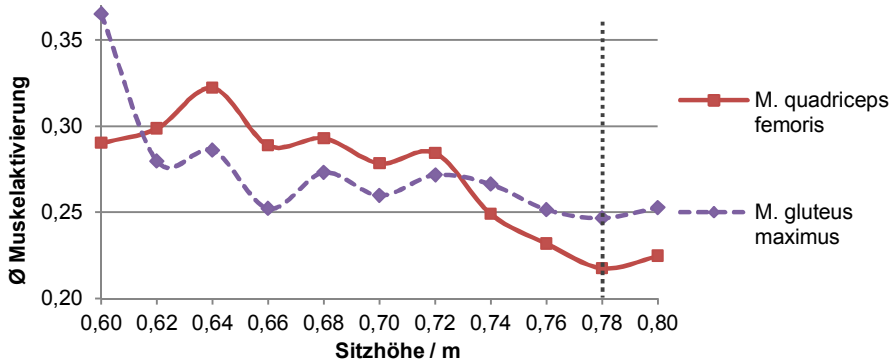


Bild 5: Verlauf der durchschnittlichen Muskelaktivierung des M. quadriceps femoris und des M. gluteus maximus über die Sitzhöhe

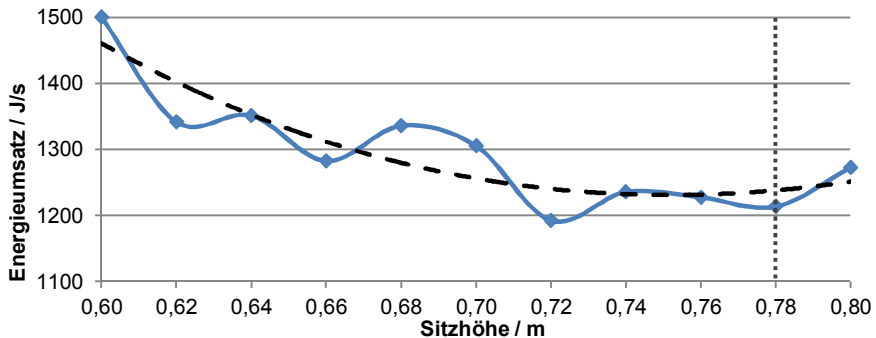


Bild 6: Verlauf des Energieumsatzes einer Kurbelumdrehung über die Sitzhöhe; Werte aus Simulation (durchgezogene Linie), Trend (gestrichelte Linie)

Die vorgestellten Analysen lassen darauf schließen, dass für das simulierte Menschmodell eine Sitzhöhe von etwa 0,78 m (gepunktete Linie in Bild 5/6) bezüglich des Energieumsatzes und der durchschnittlichen Muskelaktivierung der unteren Extremitäten optimal ist. Diese Erkenntnis stimmt auch mit Erfahrungen aus rein kinematischen Sitzpositionsoptimierungsverfahren überein.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag verdeutlicht die Notwendigkeit und den Nutzen parametrischer Simulationen in der virtuellen nutzerzentrierten Produktentwicklung am Beispiel des Radfahrens. Hier wurde erstmals die Sitzhöhe vari-

iert. Mit dem vorgestellten Modell können in weiteren Forschungsarbeiten die Auswirkungen weiterer Geometrieparameter (z. B. Nachsitz, Kurbellänge, seitlicher Abstand der Pedale) und physikalischer Kenngrößen (z. B. Trittfrequenz, erzeugte Leistung an der Tretkurbel) auf die Muskelaktivierung, Muskelrekrutierung oder auch die Bewegungseffizienz untersucht werden. Es ist geplant das Modell sukzessive auf ein Ganzkörpermodell inklusive Lenker zu erweitern. Ferner sollen Wind- und Steigungseinflüsse mit einbezogen sowie Ermüdungs- und Erholungserscheinungen berücksichtigt werden. Weitere Beispiele, wie etwa die parametrische Abbildung von Ruderbewegungen, sollen den Wert und die Anwendbarkeit des vorgestellten Ansatzes bestätigen. Aufbauend auf dieser Arbeit ist die automatisierte Durchführung parametrischer Simulationen gesamter Nutzergruppen geplant.

Literatur

- [1] Chapanis, A.: "Ergonomics in product development: a personal view", *Ergonomics*, Vol. 38, Nr. 8, 1995, S. 1625-1638.
- [2] Miehling, J.; Geißler, B.; Wartzack, S.: "Towards Biomechanical Digital Human Modeling of Elderly People for Simulations in Virtual Product Development", *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 2013 International Annual Meeting*, Vol. 57, SAGE Publications, Thousand Oaks, 2013, S. 813-817.
- [3] Rasmussen, J.; Dahlquist, J.; Damsgaard, M.; de Zee, M.; Christensen, S.T.: "Musculoskeletal modeling as an ergonomic design method", *International Ergonomics Association XVth Triennial Conference*, Seoul, 2003.
- [4] Delp, S.L.; Anderson, F.C.; Arnold, A.S.; Loan, P.; Habib, A.; John, C.T.; Guendelman, E.; Thelen, D.G.: "OpenSim: Open-source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 54, Nr. 11, 2007, S. 1940-1950.
- [5] Miehling, J.; Krüger, D.; Wartzack, S.: "Simulation in human-centered design – past, present and tomorrow", In: Abramovici, M; Stark, R. (Hrsg.): "Smart Product Engineering", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, S. 643-652.
- [6] Cutlip, K.; Nimbarte, A.D.; Ning, X.; Jaridi, M.: "A Biomechanical Strain Index to Evaluate Shoulder Stress", *Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference*, 2014.

-
- [7] Lagerstrøm, D.: "Radfahren und Ergometertraining in der Rehabilitation", In: Kulenkampff, H.-A.; Berg, A. (Hrsg.): "Ausdauersport in der Rehabilitation", Kästner Druck, Berlin, Nr. 10, 2003, S. 131-138.
- [8] Delp, S.L.; Loan, J.P.; Hoy, M.G.; Zajac, F.E.; Topp E.L.; Rosen, J.M.: "An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 37, 1990, S. 757-767.
- [9] Anderson F.C.; Pandy M.G.: "A dynamic optimization solution for vertical jumping in three dimensions", Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Vol. 2, Nr. 3, 1999, S. 201-231.
- [10] Yamaguchi G.T.; Zajac F.E.: "A planar model of the knee joint to characterize the knee extensor mechanism", Journal of Biomechanics, Vol. 22, Nr. 1, 1989, S. 1-10.
- [11] Hansen, E.A.; Jørgensen, L.V.; Jensen, K.; Fregly, B.J.; Sjøgaard, G.: "Crank inertial load affects freely chosen pedal rate during cycling", Journal of Biomechanics, Vol. 35, Nr. 2, 2002, S. 277-285.
- [12] Miehling, J.; Wartzack, S.: "Markerlose Bewegungsaufzeichnung und Bewertungsmethoden für die menschenzentrierte Produktentwicklung", Design for X – Beiträge zum 23. DfX-Symposium, TuTech Verlag, Hamburg, 2012, S. 101-112.
- [13] Umberger, B.R.; Gerritsen, K.G.M.; Martin, P.E.: "Muscle fiber type effects on energetically optimal cadences in cycling", Journal of Biomechanics, Vol. 39, Nr. 8, 2006, S. 1472-1479.
- [14] Ryan, M.M.; Gregor, R.J.: "EMG profiles of lower extremity muscles during cycling at constant workload and cadence", Journal of Electromyography and Kinesiology, Vol. 2, Nr. 2, 1992, S. 69-80.
- [15] Jorge, M.; Hull, M.L.: "Analysis of EMG measurements during bicycle pedalling", Journal of Biomechanics, Vol. 19, Nr. 9, 1986, S. 683-694.
- [16] Umberger, B.R.; Gerritsen, K.G.M.; Martin, P.E.: "A Model of Human Muscle Energy Expenditure" Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Vol. 6, Nr. 2, 2003, S. 99-111.

Wissensbasierte nachhaltige Produktentwicklung - Systematische Auswahl und Kombination von Methoden zur Entscheidungsunterstützung

Tom Buchert¹, Friedrich Halstenberg¹, Sebastian Adolphy², Kai Lindow^{1,2}, Rainer Stark^{1,2}

¹ *Institut für Industrielle Informationstechnik; Technische Universität Berlin*

² *Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik*

Abstract

Today a wide range of approaches is at hand to support tasks in the development of more sustainable products. However methods and tools available provide only punctual support for decision-making, whereas a holistic approach is required. In the course of this research, current decision support in sustainable product design has been analyzed from a design engineer's perspective. Based on 48 methods and tools a taxonomy of methods was built to facilitate a complementary combination that covers the entire development process. For validation of the approach nine methods and tools have been systematically selected and applied in a case study. By identification of information gaps improvement measures for selecting and applying methods in the perspective of decision-making could be derived.

Keywords: Decision-making, Design Methodology, Sustainability, Product Development

1 Motivation und Zielsetzung

Ressourcenknappheit, veränderte Kundenanforderungen und legislative Rahmenbedingungen bilden die Motivation für Hersteller von Konsum- und Investitionsgütern zur Entwicklung nachhaltiger Produkte ([1];[2];[3]). Bei der Berücksichtigung sozialer und ökologischer Faktoren entstehen hierbei oft Zielkonflikte mit funktionalen und ökonomischen Anforderungen ([4];[5]). Die hieraus entstehende Komplexität erfordert eine methodische Unterstützung des Produktentstehungsprozesses (PEP), welche durch zahlreiche entwickelte Ansätze in der Literatur adressiert ist (siehe u. a. [6];[7]).

Aus Sicht des Konstrukteurs ist die Entwicklung nachhaltiger Produkte in erster Linie eine Frage der Verfügbarkeit von Wissen um informierte Entscheidungen in Rahmen der gegebenen Anforderungen treffen zu können. In den vergangenen Jahrzehnten ist eine große Bandbreite von Methoden entstanden, die auf verschiedenen Wegen den Konstrukteur bei der Entwicklung von nachhaltigeren Produkten unterstützen sollen. Die Mehrheit der verfügbaren Methoden liefert dabei eine punktuelle methodische Unterstützung in bestimmten Abschnitten des Produktentstehungsprozesses [6]. Um die Weichen zu nachhaltigen Produkten effektiv zu Stellen, ist aber eine durchgängige Unterstützung des Konstrukteurs in allen relevanten Entscheidungssituationen erforderlich. Forschungsbedarf besteht also neben der Validierung der Anwendung, in der Schaffung eines Bezugs zwischen den verschiedenen Ansätzen.

2 Lösungsansatz und Vorgehensweise

Eine bedarfsgerechte Auswahl und Kombination von Einzelmethoden muss sich am Kontext der Anwendung orientieren und die praktische Kompatibilität berücksichtigen. Um eine adäquate Methodenauswahl für den Anwender zu ermöglichen, bedarf es der Transparenz bezüglich der durch die Methoden-anwendung generierten und der für die Methoden-anwendung erforderlichen Informationen. Die systematische Beschreibung der methodenübergreifenden Informationsflüsse im Entstehungsprozess nachhaltiger Produkte ermöglicht im nächsten Schritt die informationstechnischer Unterstützung des Entwicklers.

2.1 Methodenanalyse und -taxonomie

Im Rahmen der in diesem Beitrag vorgestellten Forschung erfolgte zunächst eine Sammlung, Analyse, Kategorisierung und systematische Beschreibung von 48 bestehenden Methoden und Werkzeugen der Entscheidungsunterstützung für die Entwicklung nachhaltiger Produkte. Als Ergebnis entstand eine Taxonomie, die es dem Entwickler ermöglichen soll, gemäß seiner Informationsbedarfe Methoden auszuwählen und anzuwenden. Die Kategorien der Taxonomie ergaben sich aus den folgenden sieben Fragen, unter Berücksichtigung der Empfehlungen von Bovea & Pérez-Belis ([7], S. 61):

- Wozu wird die Methode angewandt?
- Welche Lebenszyklusphasen werden von der Methode angesprochen?
- Wann im PEP erfolgt die Anwendung der Methode?
- Welche Dimensionen der Nachhaltigkeit werden angesprochen?
- Welche Art der Daten werden verarbeitet?
- Wer ist der Anwender?
- Was wird betrachtet?

Die detaillierte Analyse und systematische Beschreibung der 48 Methoden sowie die daraus abgeleitete Taxonomie soll an dieser Stelle nicht dargestellt werden. Sie ist in [8] zu finden und an dieser Stelle lediglich Input für die im Folgenden dargelegte Fallstudie, welche im Mittelpunkt der Betrachtung steht.

2.2 Fallstudie zur kombinierten Methodenanwendung

Zur Validierung des Lösungsansatzes der informationsbasierten Methodenkombination und der Anwendbarkeit der entwickelten Taxonomie wurde eine Fallstudie anhand eines beispielhaften Redesign-Prozesses für einen Abgasturbolader durchgeführt. Erster Schritt war dabei die Auswahl einer Kombination von Methoden mit Hilfe der entwickelten Taxonomie, zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in den unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozess. Aus dem Auswahlprozess gingen die folgenden Methoden hervor:

- Simplified LCA [9]
- Ten Golden Rules [10]
- ECODESIGN Pilot [11]

wurden. Zudem erfolgte eine Vereinheitlichung der jeweiligen Bezeichnungen gleicher Informationen im Kontext verschiedener Methoden.

Der Abgleich der Informationsverarbeitung der Methoden wurde auf Basis der zuvor identifizierten und protokollierten Informationsinputs und -outputs durchgeführt. Die Informationen wurden zunächst zu Informationsobjekten zusammengefasst. Die Einteilung wurde hier hauptsächlich in Orientierung zu den Entwicklungsständen im PEP und bezüglich der Entstehung bestimmter Dokumente vorgenommen. Diese Zuordnung konnte die prozessorientierte Analyse von Informationen entlang des PEP erfolgreich unterstützen, da Veränderungen der verarbeiteten Informationen im Verlauf des PEP im methodenübergreifenden Vergleich transparent dargestellt werden konnten.

3 Ergebnisse und Erkenntnisse

Der Erkenntnisgewinn des Forschungsvorhabens deckt entsprechend der Zielsetzung vier Bereiche ab.

3.1 Methodenunterstützung im Verlauf des PEP

Um die Methodenunterstützung im Verlauf des PEP zu untersuchen, wurde die erstellte Taxonomie ausgewertet. Die Kategorisierung der Methoden an Hand der in Tabelle 1 gelisteten Kriterien mit ihren entsprechenden Ausprägungen ergab das folgende Bild zur Verfügbarkeit der Methoden:

Tabelle 1: Kategorien der Taxonomie und Verteilung der Methoden

Kriterium	Kategorie	Methoden
Zweck der Methode	Neuentwicklung	42
	Produktverbesserung	47
	Prozessverbesserung	35
Angesprochene Lebenszyklusphasen	Fertigung	39
	Vertrieb	40
	Nutzung	41
	End of Life	48
	Reparatur und Wartung	41
Zeitpunkt der Anwendung	Produktplanung	16
	Konzeptphase	37
	Entwurfsphase	40
	Ausarbeitungsphase	36
	Arbeitsvorbereitung	15

Nachhaltigkeitsdimensionen	ökologisch	45
	ökonomisch	22
	sozial	8

Art der verarbeiteten Daten	qualitativ	17
	quantitativ	22
	semi-quantitativ	25
Anwender der Methode	Produktverantwortlicher	29
	Konstrukteur	40
	Nachhaltigkeitsbewertung	34
	Fertigungsplaner	4
Abstraktionsebene	Produkt	46
	Prozess	37
	Anforderungen	14
	Komponenten	35
	Dienstleistungen	20

Aus dieser quantitativen Auswertung der Kategorisierung ergeben sich bereits einige bemerkenswerte Erkenntnisse:

- Nur 35 der betrachteten Methoden zielen auf die Verbesserung von Prozessen ab, während 47 eine Produktverbesserung und 42 eine Neuproduktentwicklung unterstützen können.
- Die große Mehrzahl der Methoden (39) nimmt eine Lebenszyklusperspektive ein. Für die EOL-Phase existieren zahlreiche spezifische Ansätze, so dass eine noch stärkere methodische Unterstützung gegeben ist (48).
- Deutlich weniger Methoden sind auf Produktplanung (15) und Arbeitsvorbereitung (16) ausgelegt als auf Konzept-, Entwurfs- und Ausarbeitungsphase (37, 40, 36). Eine Adressierung der Produktplanung erfolgt insbesondere durch Checklisten und Leitlinien.
- Die meisten Methoden setzen einen Fokus auf ökologische Aspekte. Ökonomische Kriterien werden noch von 22, soziale Kriterien lediglich von acht Methoden adressiert.
- Die Anteile qualitativer, semi-quantitativer und quantitativer Datenniveaus innerhalb der Methodenanwendung sind relativ ausgeglichen.

- Die Mehrzahl der Methoden ist für den Konstrukteur (40) und auf Nachhaltigkeitsbewertung (34) ausgelegt. Es ist auffällig, dass für den Fertigungsplaner lediglich vier Methoden geeignet erscheinen.
- Zahlreiche Methoden fokussieren das Produkt, Prozesse sowie Komponenten, während deutlich weniger Ansätze Anforderungen (14) und Dienstleistungen (20) betrachten.

Die identifizierten Lücken in der Methodenunterstützung deuten auf Forschungs- und Entwicklungsbedarf in den entsprechenden Bereichen hin.

3.2 Anwendungsbezug der Methoden

Die im Rahmen der Fallstudie kombiniert angewandten Methoden konnten die an sie zu den drei Meilensteinen gesetzten Anforderungen zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele nur bedingt erfüllen. Die Auswertung in Tabelle 2 zeigt zunächst die Eignung bzw. Schwachstellen der einzelnen Methoden. Die entstandene Matrix kann aber auch genutzt werden, um im Sinne eines morphologischen Kastens optimale Methodenkombinationen herzuleiten.

Tabelle 2: Erfüllung der Meilenstein-Anforderungen durch die Methoden

Meilenstein 1	Simplified LCA	Ten Golden Rules	ECODESIGN Pilot
Identifikation der im Sinne der Nachhaltigkeit relevantesten Phase des Produktlebenszyklus	Ja	Nein	Ja
Herausstellen von qualitativen Anforderungen zur Entwicklung eines nachhaltigen Turboladers	Nein	Ja	Ja
Herausstellen von quantitativen Anforderungen zur Entwicklung eines nachhaltigen Turboladers	Ja	Nein	Nein
Meilenstein 2	LiDS-Wheel	ERPA-Matrix	MECO-Matrix
Bewertung der Produktkonzepte	Ja	Ja	Nein
Meilenstein 3	Eco-Value Analysis	QFDE	Umwelt-FMEA
Validierung der Konzeptauswahl	Nein	Ja	Nein

Identifikation von Verbesserungspotenzialen des gesamten Produktkonzeptes	eingeschränkt	Ja	Ja
Identifikation von Verbesserungspotenzialen der einzelnen Komponenten	eingeschränkt	Ja	Ja

Auch zur Gesamtheit der methodischen Unterstützung konnten Erkenntnisse erzielt werden. Die größte Einschränkung bestand in der ökonomischen und sozialen Betrachtung der Zielobjekte. Die übrigen Kriterien konnten zum Teil nur durch die simultane Anwendung mehrerer Methoden erfüllt werden. Dieses parallele Vorgehen kann jedoch Doppelarbeit zur Folge haben. Zudem war eine Integration der Vorgehensweise einzelner Methoden in den Referenzprozess nach VDI 2221 nicht in allen Fällen unproblematisch möglich. Am Beispiel der Eco-Value Analyse konnte aufgezeigt werden, dass nicht alle Methoden für jede Produktart geeignet sind, sich dies Limitation jedoch erst im Laufe der Methodenanwendung ergeben kann.

3.3 Informationsinputs und -outputs der Methoden

Bei der Auswertung der In- und Outputs wurden zunächst die Unterschiede in ihren Bezugsobjekten zwischen Ausgangsprodukt und Redesign-Produktkonzepten deutlich. Die quantitative Analyse der Input-Informationen brachte hervor, dass Methoden, die das Ausgangsprodukt referenzieren, im Schnitt präzisere Informationen benötigen.

Bei qualitativer Betrachtung der Inputs konnten viele Überschneidungen zwischen den Methoden bei jenen Informationen erkannt werden, die sich direkt auf die spezifische Lebenszyklusphase beziehen. Auffällig war außerdem eine Vielzahl von Informationen, die über die technische Lösung des Betrachtungsgegenstandes hinausgingen. Diese Informationsbeschaffung zum Umfeld des Produkts in allen Lebenszyklusphasen stellt für den Methodenanwender einen hohen Aufwand dar. Gleichzeitig können viele Parameter von diesem nur begrenzt beeinflusst werden.

Bei der Analyse der Outputs konnten ebenfalls Unterschiede zwischen den Methoden beobachtet werden. Ein wesentlicher Faktor ist hier der Spielraum, der dem Anwender bei der Auswertung der Ergebnisse eingeräumt wird. So geben in der Planungsphase bestimmte Methoden quantitative ökologische Indikatoren aus (Solidworks Sustainability), während andere Methoden Handlungsempfehlungen bereitstellen, aus denen sich der Anwender jedoch selbstständig konkrete Maßnahmen ableiten muss (Ten Golden Rules, ECODESIGN

PILOT). In der Konzeptphase liefern die Methoden entweder eine Datengrundlage, die vom Nutzer interpretiert werden muss (MECO-Matrix), ein Diagramm, das die Konzepte miteinander vergleicht (LiDS-Wheel) oder einen Zahlenwert (ERP-Matrix), der direkten Einfluss auf die Entscheidungsfindung ausüben kann.

3.4 Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Informationsobjekten verschiedener Methoden im PEP

Es konnte beobachtet werden, dass auch parallel angewandte Methoden zwar auf gleiche Informationsobjekte, jedoch auf stark unterschiedliche Informationen, zurückgreifen. Eine Untersuchung der Synergieeffekte für die parallele Anwendung von Methoden innerhalb der jeweiligen Phasen des PEP ergab, dass insbesondere innerhalb der Produktplanung große Überschneidungen der abgefragten Informationsobjekte bestehen. Die absinkende Anzahl der Überschneidungen im Verlauf des PEP lässt darauf schließen, dass innerhalb der Produktplanung zunächst der Einsatz einer oder weniger Methoden genügt, während in späteren Phasen zunehmend von einem parallelen Methodenansatz profitiert werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammengefasst erbrachte das Forschungsvorhaben zwei wesentliche Ergebnisse.

4.1 Taxonomie für Methoden der Entscheidungsunterstützung in der nachhaltige Produktentwicklung

Die Entwicklung der Taxonomie stellt einen Grundstein zur Auswahl geeigneter Methoden zur Entstehung nachhaltiger Produkte dar. Hierbei wurde deutlich, dass das Fehlen prozeduraler Informationen die Anwendung zahlreicher Methoden verhindert. Durch die Betrachtung der Kategorien konnten Lücken in der methodischen Unterstützung der Entwicklung nachhaltiger Produkte bezüglich der sozialen und ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit, der Adressierung von Anforderungen und Dienstleistungen, der Eignung für Prozessverbesserungen und der Unterstützung für die Fertigungsplanung sowie den entsprechenden Phasen der Produktentstehung identifiziert werden.

4.2 Informationsflussanalyse bei der kombinierten Anwendung ausgewählter Methoden

Zudem wurde eine Forschungslücke geschlossen, indem auftretende Informationen und Informationsobjekte bei der Anwendung von Methoden zur nachhaltigen Produktentstehung anhand des Referenz-PEP vergleichend identifiziert und analysiert wurden. Durch diese geschaffene Übersicht wird die Möglichkeit eröffnet, die bisher verfügbare methodische Unterstützung der Entstehung nachhaltiger Produkte durchgängig über den PEP informationstechnisch abzubilden und damit dem Anwender ein universelles Hilfsmittel an die Hand zu geben. Die Kombination der Methoden wurde durch deren teilweise fehlende Zuordnung zu abgrenzbaren Phasen des PEPs erschwert. Die Integration von Methoden in bestehende PEPs ohne Anpassungen wurde ebenfalls als potenzielle Schwachstelle identifiziert. Durch ein Protokoll der während der Methodenanwendung abverlangten bzw. generierten Informationen konnte nachgewiesen werden, dass diese stark methodenspezifisch und damit heterogen vorliegen. Zudem erschweren wechselnde Bezugsobjekte und Präzision der In- und Outputs deren potenzielle informationstechnische Verarbeitung. Weiterhin wurde erkannt, dass verschiedene Methodenbündel voneinander abweichende Informationen verarbeiten und damit zu veränderten Entscheidungswegen führen. Generell überwiegen Informationen mit Bezug auf den Lebenszyklus des untersuchten Objektes. Die Übereinstimmungen der abgefragten Informationsobjekte nehmen im Laufe des PEP ab. Dies deutet darauf hin, dass eine parallele Kombination von Methoden in späteren Phasen zu Erkenntnisgewinn durch zusätzliche Perspektiven bei geringerer Doppelarbeit führen kann.

4.3 Ausblick

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse dienen der Betrachtung der Anwendung von Methoden zur Entstehung nachhaltiger Produkte aus einer informationstechnischen Perspektive. Dieser Schritt bildet die Grundlage zur späteren automatisierten Anwendung der Methoden mit Hilfe von IT-Systemen. Der Nutzer kann so auf effizientem Wege für eine nachhaltige Produktentstehung befähigt werden. Um diese Vision umzusetzen, bedarf es umfassender weiterer Forschungsaktivitäten.

Literatur

-
- [1] Seliger, Günther (2007): Sustainability in manufacturing. Recovery of resources in product and material cycles. Berlin: Springer.
- [2] Morbidoni, Alessandro (2012): The ecodesign issue: proposal for a new approach, methodology and tools. Dissertation. Università Politecnica delle Marche, Ancona. Online verfügbar unter <http://www.openarchive.univpm.it/jspui/bitstream/123456789/427/1/Tesi.Morbidoni.pdf>, zuletzt geprüft am 15.03.2013.
- [3] Nidumolu, Ram; Prahalad, C.K; Rangaswami, M.R (2009): Why Sustainability Is Now the Key Driver of Innovation. In: *Harvard Business Review* 2009, 2009, S. 1–10. Online verfügbar unter <http://www.businessandsociety.be/assets/ee902e549915b8586e8a8daa338e073e.pdf>, zuletzt geprüft am 24.06.2013.
- [4] Hahn, Tobias; Figge, Frank; Pinkse, Jonatan; Preuss, Lutz (2010): Trade-offs in corporate sustainability: you can't have your cake and eat it. In: *BUSINESS STRATEGY AND THE ENVIRONMENT* 19 (4), S. 217–229, zuletzt geprüft am 24.06.2013.
- [5] Byggeth, S.; Hochschorner, E. (2006): Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. In: *EcoDesign: What's happening?* 14 (15–16), S. 1420–1430. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.03.024.
- [6] Baumann, H.; Boons, F.; Bragd, A. (2002): Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. In: *Journal of Cleaner Production* 10 (5), S. 409–425.
- [7] Bovea, M. D.; Pérez-Belis, V. (2012): A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. In: *Journal of Cleaner Production* 20 (1), S. 61–71. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.012.
- [8] Buchert, T.; Halstenberg, F.; Kaluza, A. (2013): Identifikation und Analyse von Informationsobjekten bei der Anwendung von Methoden zur Entstehung von nachhaltigen Produkten. Masterarbeit an der Technischen Universität Berlin.
- [9] Bala, A.; Raugei, M.; Benveniste, G.; Gazulla, C.; Fullana, P. Pere A. (2010): Simplified tools for global warming potential evaluation: when

'good enough' is best. In: *Int J Life Cycle Assess* 15 (5), S. 489–498. DOI: 10.1007/s11367-010-0153-x.

- [10] Luttrupp, Conrad; Lagerstedt, Jessica (2006): EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. In: *EcoDesign: What's happening?* 14 (15–16), S. 1396–1408. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.11.022.
- [11] Wimmer, W.; Zust, R. (2003): ECODESIGN pilot. Product-investigation-, learning- and optimization-tool for sustainable product development. Dordrecht, London: Kluwer Academic.
- [12] University of Michigan (2006): LiDS Wheel Analyses. Online verfügbar unter <http://www.engin.umich.edu/labs/EAST/me589/ecodatabasefinal/intropage.html>, zuletzt geprüft am 04.06.2013.
- [13] GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. (2003): Industrial ecology. 2. Aufl. Upper Saddle River NJ u.a: Prentice Hall (Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering).
- [14] Pommer, K.; Bech, P. (2003): Handbook on Environmental Assessment of Products: Miljøstyrelsen (Environmental Project no. 813, 2003).
- [15] Oberender, C.; Birkhofer, H. (op. 2004): The Eco-Value Analysis – An Approach To Assigning Environmental Impacts And Costs To Customers' Demands. In: Dorian Marjanovic (Hg.): Proceedings of the 8th International Design Conference, May 17-20, 2004, Dubrovnik, Croatia. Zagreb, Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. University of Zagreb; The Design Society.
- [16] Großmann, J.; Hansen, S.; Melzer, L.; Günther, J. (2008): EuP-Implementierung. Teilprojekt C1. In: E. Abele, R. Anderl, H. Birkhofer und B. Rüttinger (Hg.): EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Berlin, New York: Springer, S. 13–46.
- [17] Masui, Keiji; Sakao, Tomohiko; Kobayashi, Mitsuru; Inaba, Atsushi (2003): Applying Quality Function Deployment to environmentally conscious design. In: *International Journal of Quality & Reliability Management* 20 (1), S. 90–106. DOI: 10.1108/02656710310453836.

Design for Friction Reduction – Durchgängige Unterstützung des Konstrukteurs durch den gezielten Einsatz von Wälzlagerreibungs-Berechnungswerkzeugen

Seiler, Katrin; Tremmel, Stephan; Wartzack, Sandro
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

Friction can be reduced by avoiding friction, by using frictionless designs or by optimizing the friction involving contacts. In rolling bearings, which run under extreme conditions, the hydrodynamic cage-contacts can have an immense influence on the friction torque of the bearing. In this paper tools for the calculation of friction in rolling bearings are presented and are classified into the design process and user groups. It can be differentiated between empiric, analytic and dynamic calculation approaches. At the end an example for advancement of the multi-body dynamic calculation of rolling bearings is given.

Keywords: rolling bearing, friction, contact, hydrodynamic, elasto-hydrodynamic

1 Motivation

Vor dem Hintergrund einer rasch wachsenden Weltbevölkerung, begleitet von zunehmender Industrialisierung und steigendem Wohlstand in bevölkerungsreichen Regionen, sowie gleichzeitig begrenzter Ressourcen, stellt die

verbesserte Energieeffizienz technischer Systeme heute eine der größten Herausforderungen an Entwicklungsingenieure dar. Deswegen werden in den Entwicklungsabteilungen erhebliche Anstrengungen unternommen, Energieverluste in Maschinen und Anlagen zu reduzieren. Im Bereich der mechanischen Komponenten konzentrieren sich diese Anstrengungen auf die Vermeidung oder Reduzierung von Reibung, da hierauf die wesentlichen Energieverluste zurückzuführen sind. Der Reibungsreduzierung kommt insofern eine besondere Bedeutung zu, da nahezu jede Maschine auf bewegten mechanischen Komponenten aufbaut. Je nach Ausprägung der Maschine können daneben weitere Bemühungen zur Steigerung der Energieeffizienz treten: Reduzierung thermodynamischer Verluste, Reduzierung von Strömungsverlusten, Reduzierung elektrischer Verluste usw.

Um Reibung zu reduzieren beziehungsweise den mechanischen Wirkungsgrad zu erhöhen stehen dem Entwickler drei fundamentale Ansätze auf unterschiedlichen Ebenen zur Verfügung:

- **Reibung vermeiden**, entweder durch verändertes mechanisches Wirkprinzip, beispielsweise Ersatz reibungsbehafteter Gleitkontakte durch elastische Strukturen, oder Nutzung von Wirkprinzipien anderer physikalischer Domänen, zum Beispiel Ersatz eines reibungsbehafteten Wälzkontakts durch reibungsfreies elektromagnetisches Schweben
- **Reibung durch konstruktive Maßnahmen reduzieren**, etwa Ersatz von Gleitkontakten durch reibungsärmere Wälzkontakte, in der Praxis meist gleichbedeutend mit dem Ersatz von Gleitlagern durch Wälzlager
- **Reibung durch die Optimierung von Kontaktstellen reduzieren**, beispielsweise durch Verwendung eines anderen Lagertyps bei gleichen Hauptabmessungen oder durch Anpassungen an der Feingeometrie, der Oberflächentopographie, durch Beschichtungen und dergleichen.

Diese Ansätze können als ein Drei-Stufen-Modell verstanden werden, welches vom Entwickler während der Konzept-, Entwurfs- und Ausarbeitungsphase zu durchlaufen ist. Unter dem DfX-Aspekt „Design for Friction Reduction“ kann dieses Modell als eine DfX-Methode aufgefasst werden.

In der Praxis ist dieses Drei-Stufen-Modell freilich nicht immer in Reinform umzusetzen, da bei Entwicklungsaufgaben stets mehrere miteinander widerstreitende Aspekte gegeneinander abgewogen werden müssen [1]. Bewertungskriterien können so neben der Energieeffizienz auch Fragen des Bau-

raums, der Lebensdauer oder der Kosten sein. Vergleichsweise einfach und mit vertretbaren Kosten lassen sich jedoch in der Regel Maßnahmen der dritten Stufe – also die Optimierung von Kontaktstellen – durchführen. Bei der Verwendung standardisierter Maschinenelemente als Grundbausteine komplexerer Maschinen obliegt diese anspruchsvolle Aufgabe typischerweise den Herstellern des jeweiligen Maschinenelements.

Eines der am häufigsten eingesetzten Maschinenelemente zur Führung und Abstützung von dreh- oder längsbeweglichen Teilen ist das Wälzlager in seinen unterschiedlichen Ausprägungen. Es stellt vielfach einen optimalen Kompromiss im Sinne des oben genannten Drei-Stufen-Modells dar. Wälzlager besitzen an sich ein niedriges Reibmoment, z. B. im Vergleich zu Gleitlagern, da sie im Hauptkraftfluss auf Rollkontakten basieren. Sie sind hierdurch für die Realisierung energieeffizienter technischer Systeme zunächst einmal prädestiniert. Physikalisch bedingt (Elastizitäten), teils auch bauartbedingt, können der Rollbewegung jedoch auch Gleitbewegungen überlagert sein (Differenzialschlupf). Zudem existieren im Wälzlager konstruktiv bedingt zahlreiche weitere Kontaktstellen, die zwar im Nebenkraftfluss liegen, jedoch bei bestimmten Betriebsbedingungen erheblich zum Reibmoment des gesamten Wälzlagers beitragen können.

Für die Optimierung der Kontaktstellen im Wälzlager ist es daher im Hinblick auf die Energieeffizienz erforderlich, über geeignete Werkzeuge für die Reibungsberechnung zu verfügen.

Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Kontakte im Wälzlager vorgestellt und neue Herausforderungen an die Wälzlagertechnik skizziert, die verdeutlichen, weshalb zukünftig im Hinblick auf Energieeffizienz das Augenmerk auch auf die außerhalb des Hauptkraftflusses liegenden Kontakte im Wälzlager zu richten ist. Anschließend werden die wichtigsten, heute verfügbaren Werkzeuge zur Reibungsberechnung von Wälzlagern aufgeführt. Die Wälzlagereibungsberechnungswerkzeuge unterstützen die Entwicklungstätigkeit durchgängig, angefangen von einer ersten Auswahl reibungsarmer Lager bis hin zur Konstruktion energieeffizienter, gegebenenfalls auf die Anwendung hin maßgeschneiderter Wälzlager. Dementsprechend werden die Berechnungswerkzeuge in den Produktentwicklungsprozess eingeordnet. Die Entwicklung dieser Berechnungswerkzeuge ist noch nicht abgeschlossen. Dies wird am Beispiel der Wälzlagermehrkörpersimulation kurz beispielhaft dargestellt.

2 Kontakte im Wälzlager und ihr Einfluss auf das Gesamtlagerreibmoment

Im elastohydrodynamischen (EHD) Hauptkontakt zwischen Wälzkörpern und Laufbahnen tritt überwiegend Roll- und Gleitreibung auf. Die Reibanteile des Wälzkörper/Laufbahn-Kontakts stellen unter üblichen Betriebsbedingungen den Hauptanteil am Gesamtlagerreibmoment dar. An den übrigen Kontakten zwischen Wälzkörpern und Käfig, sowie Wälzkörpern und Bord oder zwischen Käfig und Außenring bei bordgeführten Wälzlager tritt ausschließlich Gleitreibung auf. Im ausreichend geschmierten Wälzlager und unter stationären Betriebsbedingungen spielt die Gleitreibung in diesen Kontakten in der Regel eine untergeordnete Rolle und besitzt einen vernachlässigbaren Anteil am Gesamtlagerreibmoment.

Bei instationären oder extremen Betriebsbedingungen kann die Gleitreibung aufgrund erhöhter Kontaktkräfte jedoch stark ansteigen und einen deutlich größeren Anteil am Gesamtlagerreibmoment ausmachen. In diesen Fällen darf die Reibung in diesen Kontakten nicht mehr vernachlässigt werden. Dementsprechend dürfen sie bei Reibungsberechnungen nicht mehr nur stark vereinfacht berücksichtigt werden. Die Reibung muss dann – unter der Annahme, dass ausreichend Schmierstoff im Wälzlager zur Verfügung steht – durch geeignete Berechnungsansätze auf der Grundlage von Modellen zur Beschreibung der Hydrodynamik abgebildet werden.

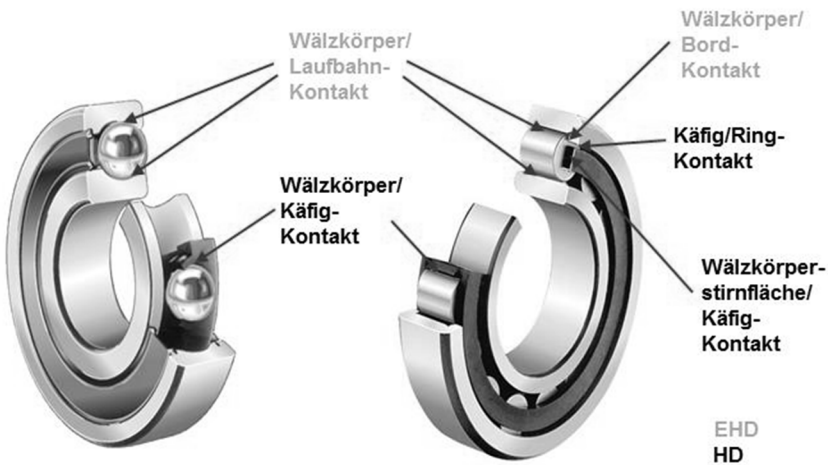


Bild 1: Übersicht zu den verschiedenen Kontakten im Wälzlager

Im folgenden Abschnitt werden beispielhaft solche instationären oder extremen Einsatzbereiche von Wälzlagern dargestellt, die die Weiterentwicklung der Reibungsberechnung erforderlich machen.

3 Neue Herausforderungen in der Wälzlagertechnik

Zum einen werden Wälzlager, wie zum Beispiel Pleuellager oder Planetenradlager, mit immer höheren Zentripetalbeschleunigungen (mehrere tausend g) beaufschlagt. Hierbei treten extreme Beanspruchungen im Lager auf, die an die Wälzlagerauslegung neue Anforderungen stellen. Solche Wälzlager besitzen in der Regel einen am Außenring bordgeführten Käfig, der unter Zentripetalbeschleunigung gegen den Außenring gedrückt wird, siehe Bild 2. Bei zunehmender Zentripetalbeschleunigung beginnt der Käfig sich zu verformen. Dies führt zu einer größeren Kontaktfläche zwischen Käfig und Außenring und die Reibung im Kontakt steigt an [2]. Des Weiteren nimmt der Verschleiß zu und diese Vorgänge beeinflussen wiederum die Kinematik des Wälzlagers.

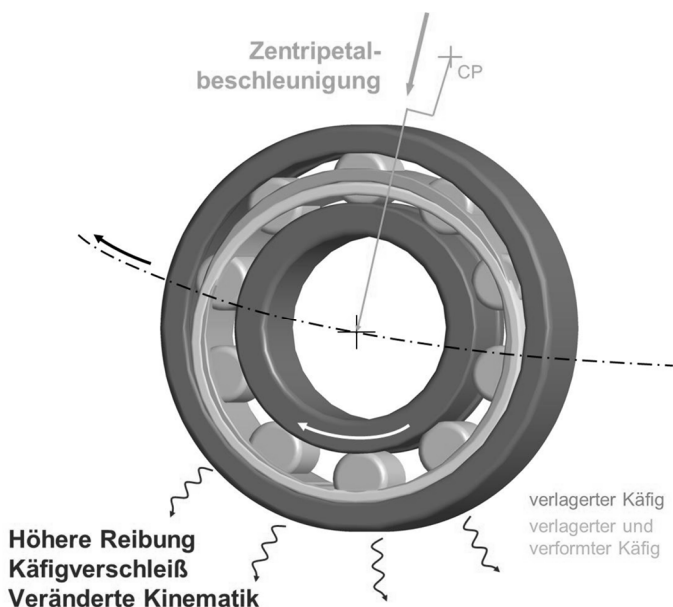


Bild 2: Anlegen und Verformen des Käfigs unter Fliehkraft

Zum anderen werden zum Beispiel in Windenergieanlagen immer größere Wälzlager (mehrere Meter Durchmesser) verbaut. Aufgrund des hohen Eigen-

gewichts und der großen Abmessungen kann es bereits zu einer Verformung der Ringe kommen, ohne dass das Lager belastet wird. Die Verformung der Ringe führt zu einer veränderten Lastzone (siehe Bild 3). Dadurch werden weniger Wälzkörper belastet und diese erfahren eine höhere Pressung. Die Verformung der Ringe beeinflusst somit die im Lager auftretenden Kontaktkräfte was wiederum zu einem Anstieg des Reibmoments führen kann.

Ein ähnlicher Effekt tritt auch bei elastischen Gehäusen auf. Im Zuge des Leichtbaugedankens werden die Wälzlagergehäuse immer leichter und elastischer ausgeführt. Die Gehäuse können so die Ringe des Wälzlagers nicht mehr ausreichend abstützen. Dadurch verformen sich die Ringe und wie bei sehr großen Lagern kann sich eine veränderte Lastzone einstellen, die wiederum die Reibung beeinflusst.

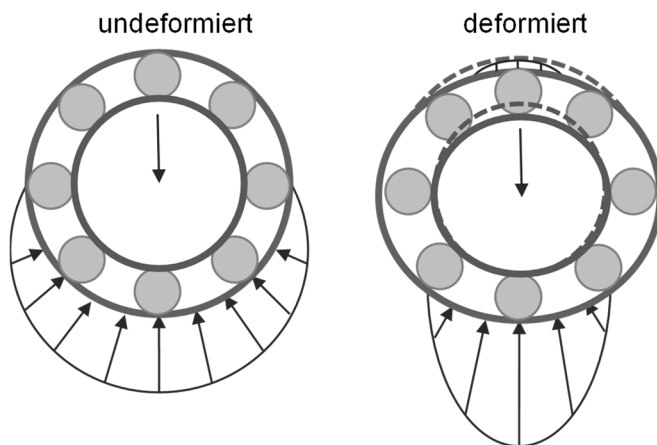


Bild 3: Kontaktzone bei undeformierten und deformierten Lagerringen

4 Berechnungswerkzeuge zur Wälzlagerreibungsberechnung

Die heute zur Verfügung stehenden Berechnungswerkzeuge unterstützen den Produktentwickler über den kompletten Produktentstehungsprozess hinweg und erleichtern somit den Konstruktionsalltag beim Konstruieren mit Maschinenelementen und beim Konstruieren von Maschinenelementen. Bild 4 stellt die dem Konstrukteur zur Verfügung stehenden Berechnungswerkzeuge, gestaffelt nach der Modellgüte der Berechnungsmethoden, dar.



Die einfachsten Berechnungswerkzeuge, die dem Konstrukteur zur Verfügung stehen, beruhen auf in zahlreichen Versuchen empirisch gewonnenen Gleichungen. Hier ist vor allem das bekannte Berechnungsmodell nach PALMGREN [3], das auch die Grundlage der Katalogberechnung der Lagerhersteller darstellt, zu nennen. Die Katalogberechnungen besitzen eine verhältnismäßig niedrige Modellgüte [4] und sind daher vor allem zur Lagervorauswahl und für eine erste Abschätzung der im Lager auftretenden Reibung geeignet. Zu den empirischen Berechnungswerkzeugen zählt auch ein am KTMfk entwickeltes Berechnungswerkzeug, der „Bearing Friction Calculator“ (BFC) [5]. Dessen Reibungsberechnung basiert im Grunde auf den Berechnungsgleichungen der Lagerhersteller, die jedoch um die Betrachtung der im Lager und der Anschlusskonstruktion auftretenden Wärmeströme erweitert wurde. Der BFC ermöglicht dadurch in den frühen Konstruktionsphasen die Berechnung der Wälzlagerreibung und der Betriebstemperatur unter dem Einfluss von Last- und Drehzahlkollektiven.

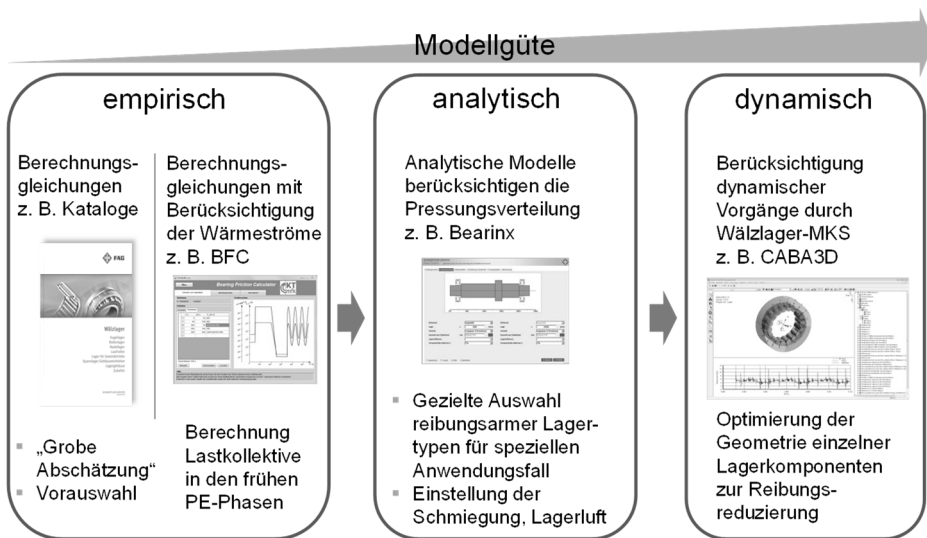


Bild 4: Reibungsberechnungswerkzeuge gestaffelt nach Modellgüte

Ein Programm zur Wälzlagerreibungsberechnung ist zum Beispiel BEARINX [4]. Dieses und ähnliche Berechnungswerkzeuge ermitteln in der Regel basierend auf analytischen Modellen die vorhandene Pressungsverteilung für jeden einzelnen Lagerkontakt, abhängig von der Innengeometrie des Lagers, sowie der Wellen- und Gehäuseelastizität. Aufbauend darauf kann beispielsweise in BEARINX unter Berücksichtigung eines geeigneten Rheologiemodells und der elastohydrodynamischen Theorie die Wälzlagerreibung genauer bestimmt

werden. Die Lagerreibung kann daher bereits mit einer relativ hohen Modellgüte ermittelt werden. Die analytischen Berechnungsmodelle zur Reibungsberechnung werden daher vor allem für eine gezielte Auswahl von reibungsarmen Lagertypen herangezogen. Mit Hilfe der Berechnungswerkzeuge lässt sich zum Beispiel eine für die Energieeffizienz optimale Schmiegunng oder vorhandene Lagerluft je nach Anwendungsfall einstellen [4].

Berechnungswerkzeuge, die die Lagerkinematik dynamisch abbilden, sogenannte Wälzlagermehrkörpersimulationsprogramme wie zum Beispiel CABA3D [6] oder ADORE, bieten die höchste Modellgüte. Gleichermaßen nehmen jedoch auch die zur Modellerstellung benötigte Arbeitszeit sowie die Rechenzeit zu. Aufgrund ihrer Komplexität werden diese Berechnungswerkzeuge vor allem bei den Lagerherstellern selbst eingesetzt. Durch den Einsatz der MKS kann der Einfluss dynamischer Vorgänge im Lagerinneren auf die Lagerreibung gezielt untersucht werden. Zudem kann die Detailkonstruktion der Wälzlager zur Reibungsreduzierung optimiert werden und der Einfluss der Änderung auf die Reibung direkt dargestellt werden. In der Produktentwicklung werden Wälzlagermehrkörpersimulationen daher beispielsweise bei der Entwicklung neuer Käfigvarianten eingesetzt. Die Wälzlagermehrkörpersimulation unterstützt hierbei, indem sie die komplizierten Vorgänge im Lagerinneren sichtbar und damit leichter begreifbar macht. Zum anderen können unterschiedliche Käfigformen virtuell, zum Beispiel im Hinblick auf eine Reibungsreduzierung in den Käfigkontakten, getestet werden. Es kann daher auf den Bau zahlreicher unterschiedlicher Prototypen verzichtet und Prüfkosten für erste Bauteilversuche reduziert werden.

5 Einordnung der Berechnungswerkzeuge in den Produktentwicklungsprozess

Abhängig von der Entwicklungsphase – frühe oder spätere Entwicklungsphase – und abhängig von der gewünschten Genauigkeit stehen dem Konstrukteur somit unterschiedliche Werkzeuge zur Reibungsberechnung von Wälzlagern zur Verfügung. Bild 5 ordnet die auf empirischen, analytischen und dynamischen Ansätzen basierenden Reibungsberechnungswerkzeuge in den Produktentwicklungsprozess nach PAHL/BEITZ [7] ein. Der Produktentwicklungsprozess wird zum einen unterschieden in den Produktentwicklungsprozess eines Wälzlageranwenders, z. B. Entwicklung einer energieeffizienten Maschine mit einer wälzgelagerten Welle. Zum anderen wird der Produktentwicklungsprozess des Wälzlagerherstellers, z. B. Entwicklung eines neuen Wälzlagers oder Optimierung der Kontakte eines bestehenden Wälzlagers, betrachtet. Die Wälzlageranwender sind wiederum zu unterscheiden in Anwender von Standardlagern, d. h. nach Katalog bestellte Wälzlager, und Kon-

struktur im Großserienbau (vgl. Bild 6). Aufgrund der hohen Stückzahlen arbeiten hier die Konstrukteure in der Regel eng mit der Anwendungstechnik des Wälzlagerherstellers zusammen und es können auf den jeweiligen Anwendungsfall hin optimierte Wälzlager eingesetzt werden.

Der Wälzlageranwender von Standardlagern möchte zu Beginn der Konzeptphase ein geeignetes Wälzlager auswählen und ggf. möglichst zügig einen ersten Anhaltswert für das zu erwartende Reibmoment des Wälzlagers erhalten. Hierzu kann auf die empirischen Berechnungsgleichungen, die zum Beispiel in den Lagerkatalogen der Hersteller zu finden sind, zurückgegriffen werden. Im weiteren Verlauf der Konzeptphase reift das zu entwickelnde Produkt und wird immer detaillierter. Der Wälzlageranwender kann in einem weiteren Schritt nun auch mit analytischen Modellen das Reibmoment wesentlich genauer bestimmen und zum Beispiel die Umgebungskonstruktion mit berücksichtigen. In dieser Phase der Konzeptfindung bietet sich die Nutzung der auf analytischen Gleichungen basierenden Berechnungswerkzeuge an. Die Nutzung erfolgt in der Praxis zum Beispiel über entsprechende Online-Portale, wie BEARINX®-online Easy Friction, oder indem der Konstrukteur von Großserienbauteilen sich an die Anwendungsberatung der Wälzlagerhersteller wendet. Dieser unterstützt den Konstrukteur bei der Anwendung der analytischen Berechnungswerkzeuge, ist in der Lage auch Sonderbauformen von Wälzlagern analytisch zu untersuchen und berät bei der Auswahl der idealen Lagerlösung. Setzt der Wälzlageranwender seine Lagerung in stationären oder extremen Beanspruchungen aus, so kann der Wälzlagerhersteller auch Dynamiksimulationen zur Reibungsberechnung anwenden. Diese stehen in der Regel aufgrund ihrer Komplexität und ihres hohen Entwicklungsaufwands den Wälzlageranwendern nicht zur Verfügung.

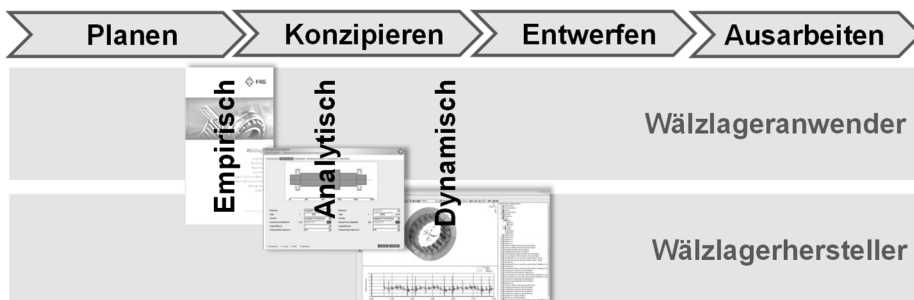


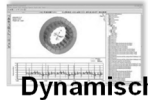


Bild 5: Einordnung in den Produktentwicklungsprozess nach PAHL/BEITZ

Im Produktentwicklungsprozess der Wälzlagerhersteller, zum Beispiel bei der Entwicklung einer neuen, reibungsarmen Käfiggeometrie, können zunächst erste Reibmomentabschätzungen mit analytischen Modellen durchgeführt werden. Um jedoch zum Beispiel den Einfluss der Käfigtaschengestaltung auf die Kinematik und die Reibung zu untersuchen, ist der Einsatz von Dynamiksimulationen unerlässlich.

Aus den beschriebenen Szenarien resultiert die in Bild 6 dargestellte Einteilung der Berechnungswerkzeuge nach dem Benutzerfokus. Die Benutzer teilen sich wiederum in Wälzlageranwender und Wälzlagerhersteller auf. Die Berechnungswerkzeuge können zudem vom Konstrukteur entweder selbst genutzt werden, oder durch die Vertriebsabteilung bzw. eine Berechnungsabteilung weitergegeben werden. Auch hier zeigt sich, dass Berechnungswerkzeuge mit einer sehr hohen Modellgüte hauptsächlich bei den Wälzlagerherstellern eingesetzt werden, während der Wälzlageranwender auf den Einsatz von Berechnungswerkzeugen auf Basis empirischer und analytischer Ansätze beschränkt ist.

	Wälzlageranwender „Konstruieren mit Maschinenelementen“		Wälzlagerhersteller „Konstruieren von Maschinenelementen“	
	Anwender Standardlager	Konstrukteur Großserie	Konstrukteur	Experte
 Empirisch	✗	✗		
 Analytisch	✗	✗ ✗	✗ ✗	✗
 Dynamisch			✗	✗ ✗

✗ Wendet selbst an

✗ Lässt berechnen (Vertrieb/Berechnungssupport)

Bild 6: Einteilung der Berechnungswerkzeuge nach Benutzern

Der durchgängige Einsatz von Reibungsberechnungswerkzeugen im Produktentwicklungsprozess trägt dazu bei, Entwicklungskosten sowohl für den Wälzlageranwender als auch für die Wälzlagerhersteller zu senken und ermöglicht eine frühzeitigere Markteinführung des jeweiligen Produkts.

6 Ausblick in aktuelle Forschung im Bereich der Wälzlagermehrkörpersimulation

Wie in Abschnitt 3 beschrieben muss die Reibungsberechnung für Wälzlager, die instationären oder extremen Betriebsbedingungen ausgesetzt sind, weiterentwickelt werden. Wie im Fall der Wälzlagermehrkörpersimulation diese Weiterentwicklung, speziell für Lager die hohen Zentripetalbeschleunigungen unterliegen, aussehen kann wird im Folgenden gezeigt.

Um die Gesamtlagerreibung sowie die Lagerkinematik für Anwendungen mit Käfigführung realitätsnah vorherzusagen zu können, müssen unter der Annahme, dass im Lager Vollschmierung vorliegt, auch die realen Schmierbedingungen genauer in der Reibungsberechnung berücksichtigt werden. So ist zum Beispiel die Hydrodynamik des Schmierstoffs in die Kontaktberechnung der im Wälzlager vorhandenen Kontakte zu integrieren. Der elastohydrodynamisch geschmierte Kontakt zwischen Wälzkörpern und Laufbahnen wird von bestehenden Simulationsprogrammen bereits hinreichend genau abgebildet. Während die hydrodynamischen Kontakte, wie zum Beispiel die Käfig/Ring- und Wälzkörper/Käfig-Kontakte (vgl. Bild 1), nur stark vereinfacht berücksichtigt werden. Diese Vereinfachung ist für Wälzlager die weitgehend stationär betrieben werden zulässig. Bei Wälzlagern die jedoch eine hohe Zentripetalbeschleunigung erfahren muss die Hydrodynamik des Schmierstoffs berücksichtigt werden.

Da die Kontaktberechnung in der Wälzlagermehrkörpersimulation zu jedem Zeitschritt mehrfach aufgerufen wird, werden vor allem analytische, hydrodynamische Modelle benötigt, die einen optimalen Kompromiss aus Genauigkeit und Recheneffizienz darstellen. Damit die Berechnungswerkzeuge in der Produktentwicklung akzeptiert und angewendet werden, muss die Rechenzeit in einem angemessenen Rahmen liegen. Im Folgenden wird am Beispiel des hydrodynamischen Kontakts zwischen Käfig und Außenring bei bordgeführten Käfigen die Integration der Hydrodynamik in die Wälzlagermehrkörpersimulation exemplarisch vorgestellt.

Bild 7 zeigt einen typischen bordgeführten Nadelkranz, wie er bei hohen Zentripetalbeschleunigungen eingesetzt wird. Neben den zwei schmalen, seit-

lichen Führungsflächen kommen auch die Käfigstege, die sich zwischen den Wälzkörpertaschen befinden, unter hoher Zentripetalbeschleunigung mit dem Außenring in Kontakt (vgl. Bild 2).

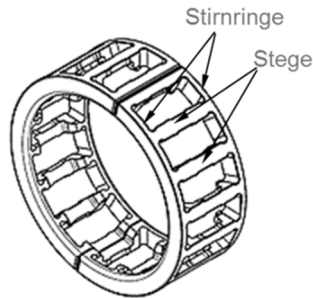


Bild 7: Nadelkranzkäfig mit Käfigstegen und seitlichen Käfigstirnringen

Der Käfig dreht sich relativ zum Außenring des Wälzlagers mit der Winkelgeschwindigkeit ω . Dadurch wird Schmierstoff in den sich in Bewegungsrichtung verengenden Spalt zwischen Käfig und Außenring gefördert und es baut sich ein tragfähiger Schmierfilm, der die beiden Kontaktpartner voneinander trennt, auf.

Die Berechnung der Hydrodynamik erfolgt auf Basis der Theorie des kurzen Gleitlagers. Diese Theorie ist für sehr kurze Gleitlager gültig, wenn das Breite/Durchmesser-Verhältnis b/d den Wert von $1/4$ nicht überschreitet. Auf Basis der Kurzgleitlagertheorie vereinfacht sich die REYNOLDSSche Differentialgleichung, welche allgemein nur numerisch lösbar ist, zu einer analytisch lösbaren Gleichung [8]. Darauf aufbauend kann ein für die Wälzlagerdynamiksimulation geeignetes hydrodynamisches Modell zur Berechnung der Normal-, Reib- und Dämpfungskraft sowohl in den seitlichen Käfigringen (vgl. Bild 8), als auch in den Käfigstegen entwickelt werden.

Die Kontaktgeometrie, die Positionen und somit die relative Verlagerung des Käfigs zum Außenring ε sowie die Geschwindigkeiten der Kontaktpartner sind für jeden Zeitschritt im Mehrkörpersimulationsprogramm bekannt. Dadurch kann für die Berechnung der Normal-, Reib- und Dämpfungskraft der Druckverlauf $P(\varphi, z)$ und darauf aufbauend die Reibkräfte berechnet werden. Die gesamte Berechnung des hydrodynamischen Modells der Käfigführung kann zum Beispiel in [9] nachgelesen werden.

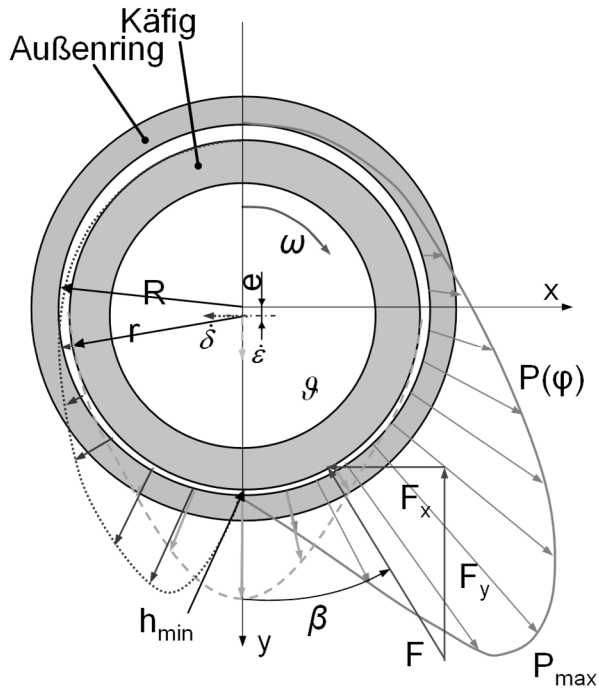


Bild 8: Hydrodynamisches Modell der seitlichen Stirnringe

7 Zusammenfassung

Um Reibung in technischen Systemen zu reduzieren ist es vielfach sinnvoll, einzelne Kontaktstellen, zum Beispiel durch eine Anpassung der Feingeometrie, durch glattere Oberflächen oder den Einsatz von Beschichtungen, zu optimieren. Bei Wälzlagern steigt die Reibung aufgrund neuer Anwendungsgebiete vor allem in den Gleitkontakten des Lagers sehr stark an. Eine Optimierung dieser Kontakte besitzt daher ein hohes Potential zur Reduzierung des Gesamtlagerreibmoments und damit zur Steigerung der Energieeffizienz von Wälzlagern. Die Grundzüge des „Design for Friction Reduction“ wurden somit definiert und für das Maschinenelement Wälzlager näher betrachtet.

Die wichtigsten Werkzeuge zur Reibungsberechnung von Wälzlagern wurden hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten vorgestellt und in den Produktentwicklungsprozess eingeordnet. Abhängig von ihrer Modellgüte unterstützen sie den Konstrukteur durchgängig von der frühen bis zur späten Phase des Produktentwicklungsprozesses. Sie leisten dadurch einen wichtigen Beitrag

zur Gestaltung energieeffizienter Lagerungen und helfen, in Zeiten der Ressourcenknappheit, die Energievorkommen zu schonen und den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Jedoch sind der zusätzliche Informationsgewinn und der größere zeitliche Aufwand durch den Einsatz höherwertiger Berechnungswerkzeuge gegeneinander abzuwägen. Der aufwändige Einsatz von Dynamiksimulationen ist vor allem bei instationären Einsatzbedingungen zu empfehlen.

Am Beispiel der Wälzlagermehrkörpersimulation wurden schließlich aktuelle Entwicklungen dargestellt, die zum Beispiel für Lageranwendungen, die einer hohen Zentripetalbeschleunigung ausgesetzt sind, unerlässlich sind.

Mit Hilfe dieser und zukünftiger Arbeiten, werden die Berechnungswerkzeuge zur Reibungsberechnung von Wälzlagern stetig verbessert. Die im Wälzlager real vorliegenden Schmier- und Kontaktbedingungen können genauer als bisher berücksichtigt werden. Dadurch ist der Konstrukteur in der Lage eine reibungseffiziente Wälzlagerung in kürzerer Zeit zu gestalten, mehrfache Iterationsschleifen bei der Entwicklung zu vermeiden und Entwicklungskosten einzusparen.

Literatur

- [1] Bauer, S.: Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 404. Düsseldorf 2009.
- [2] Binderszewsky, J.; Hahn, B.; Koch, O.; Kruhöffner, W.: Calculations for Rolling Bearing Cages. 6.-10.Mai 2012, St. Louis, Missouri (USA). STLE Annual Meeting & Exhibition 2012.
- [3] Palmgren, A.: Neue Untersuchungen über Energieverluste in Wälzlagern. VDI-Berichte 20. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1957, S. 117-121.
- [4] Koch, O.; et al.: Energieeffiziente Auslegung von Wälzlagerungen. In: Wissensforum (Hrsg.) Gleit- und Wälzlagerungen. VDI-Berichte 2147. 24.-25. Mai 2011, Schweinfurt. Düsseldorf: VDI Verlag, 2011, S. 205 - 217.
- [5] Stahl, T.; et al.: Berechnung und Analyse von Reibmoment- und Temperaturverlauf von Wälzlagern unter Drehzahl- und Lastkollektiven. In: Wissensforum (Hrsg.) Gleit- und Wälzlagerungen. VDI-Berichte 2147. 24.-25. Mai 2011, Schweinfurt. Düsseldorf: VDI Verlag, 2011, S. 193 - 204.

-
- [6] Koch, O.; et al.: Wälzlageroptimierung durch dreidimensionale dynamische Simulation. In: Wissensforum (Hrsg.) Gleit- und Wälzlagerungen. VDI-Berichte 2069. 9.-10. Juni 2009, Wiesloch. Düsseldorf: VDI Wissensforum, 2009, S. 43 - 51.
- [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] Lang, O.R.; Steinhilper, W.: Gleitlager. Konstruktionsbücher Bd. 31. Berlin: Springer, 1987.
- [9] Seiler, K.; Stadler, M.; Tremmel, S.; Hahn, B.; Wartzack, S.; Goller, O.: Modellierung der Käfigführung für Wälzlagerdynamiksimulationsprogramme – Ein Beitrag zur betriebssicheren Lagerauslegung. Tribologie & Schmierungstechnik Bd. 60. (2013) Nr. 6, S. 29 – 36.



Wissensbasierte Navigation für die lärmreduzierte Auslegung rotierender Maschinen in der Produktentwicklung

Christof Küstner und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

Today, product developer face the challenge taking not only the requirements for mechanical properties of a product into account, but also other requirements like the acoustical properties, for instance. The problem is that important product properties like the acoustical properties are only revealed in the later development phases. Normally product developers elicit knowledge from experts to fulfil these additional requirements. In this contribution, an approach for a knowledge-based navigation for the development of noise-reduced machines is presented. Therefore the knowledge identification, acquisition, formalization and the implementation in an assistant system are described. This approach contributes to the improvement of knowledge transfer from expert to product developer vice versa.

Keywords: knowledge-based navigation, assistant system, noise-reduced development, activities and decisions

1 Einleitung

In Deutschland sind die Kapazitäten der Windenergie in den letzten Jahren stark gewachsen, weshalb im November 2013 die Koalitionspartner der

großen Koalition das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) an die aktuelle Lage angepasst haben: Speziell windstarke Standorte, v. a. in Küstennähe, müssen mit einer Reduzierung der Förderungssätze rechnen [1]. Aufgrundessen werden Standorte von Windenergieanlagen (WEA) im Inland lukrativer. Geeignete onshore WEA-Standorte werden zunehmend rar, weshalb diese zwangsläufig näher an Wohngebiete heranreichen. Selbst bei sehr großem Abstand zu Wohngebieten (10H-Regelung) müssen die WEA besonders strenge Geräuschemissions und -immissionsvorschriften einhalten (vgl. [6, 7]). Produktentwickler stehen deshalb bei der Entwicklung von WEA heute der Herausforderung gegenüber, neben den mechanischen, bspw. auch die akustischen Eigenschaften eines Produktes zu berücksichtigen.

Aus diesem Grund wurde das BMBF geförderte Verbundprojekt EUREKA-ALARM ins Leben gerufen. Ziel ist die Unterstützung des Produktentwicklers (PE) durch kontextsensitive Bereitstellung von entwicklungsrelevantem Wissen, sodass Optimierungspotentiale im Hinblick auf das akustische Verhalten schon in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) erkannt werden (siehe Bild 1). Hierfür wird ein Assistenzsystem (AS) zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen (ALARM) am Beispiel einer Windenergieanlage entwickelt. [9]

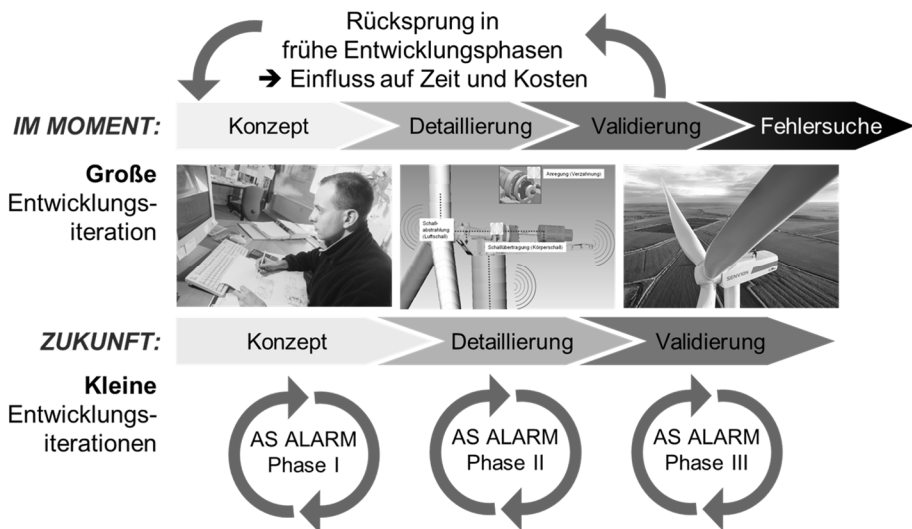


Bild 1: Der PEP heute und mit der Unterstützung des Assistenzsystems ALARM nach [2]

2 Allgemeine Herausforderungen und Stand der Entwicklungen

Im Themenbereich der Akustik gibt es die Herausforderung, dass die akustischen Produkteigenschaften erst nach der Fertigung und Montage des Produktes bekannt werden, wodurch meist zeit- und kostenintensive Iterationen am Ende des PEP notwendig sind. Normalerweise werden zum Offenlegen der Produkteigenschaften Simulationen in den frühen Phasen eingesetzt. Allerdings sind für Validierung von Akustiksimulationen gefertigte Bauteile notwendig, weshalb Akustiksimulationsergebnisse in sehr frühen Phasen oft nicht die akustischen Produkteigenschaften abbilden. In den späten Phasen des PEP stehen dem PE im besten Fall Messdaten von produzierten Komponenten und validierte Simulationsergebnisse zur Verfügung, die das Produktverhalten beschreiben. Hierzu zählen z. B. Schallemissionsmessungen, Messungen von Betriebsschwingungen oder validierte Mehrkörpersimulationsergebnisse. In der Regel kann die Ursache für eine unerwünschte akustische Produkteigenschaften durch genaue Analyse dieser Daten gefunden und durch Modifikation der Produktmerkmale eliminiert werden (z. B. durch gezieltes Versteifen von Strukturen zur Modifikation der Eigenfrequenzen). Ziel ist es, diese gewonnen Erkenntnisse für neue Produktgruppe bereits in den früheren Phasen des PEP gezielt zu nutzen, sodass bei der Serienfertigung des Produktes die spezifizierten akustischen Produkteigenschaften vorliegen.

3 Problemstellung

Eine WEA besteht aus sehr vielen Baugruppen (z. B. Getriebe, Generator, Elastomerlager der Drehmomentstütze). Je nach Komplexität der Baugruppe, beauftragt der Erstausrüster einen Zulieferer mit der Entwicklung und Herstellung der Baugruppe (siehe Bild 2). Zur Berücksichtigung des akustischen Verhaltens bei der Auslegung und Gestaltung der Baugruppe sind bereits in frühen Phasen des PEP Daten von anderen Baugruppen des Gesamtproduktes notwendig, die nicht durch das Pflichtenheft des Zulieferer erfasst werden können. Als Beispiel können hier die mechanischen Anregungen durch den Zahneingriff im Getriebe oder die Eigenfrequenzen des Maschinenträgers angeführt werden. Diese werden erst im Laufe der Konzeptphase analytisch oder simulativ ermittelt. Bei einem frühen Austausch kann der Erstausrüster den Entwicklungsprozess des gesamten Produktes, bzw. der einzelnen Baugruppen frühzeitig positiv beeinflussen. Die unerwünschten akustischen Eigenschaften des Produktes können durch eine geschickte Definition oder Kombination der Merkmale der einzelnen Bauteile oder Baugruppen kompensiert werden. Bspw. können die Anregungen durch die Zahngeometrie im Getriebe mittels einer passenden Wahl der Steifigkeit des Elastomerlagers der Drehmomentstütze ausgeglichen werden. Es ist zudem relevant, dass die

Entwicklungsingenieure der jeweiligen Baugruppen angehalten werden, die Informationen zeitnah auszutauschen, sodass erstens keine Verzögerungen im Gesamtentwicklungsprozess entstehen und zweitens keine entwicklungsrelevanten Daten unberücksichtigt bleiben. Dieser Austausch findet sehr häufig nicht oder nur unkoordiniert (informell) statt, wodurch Fehler erst nach dem Montieren der WEA in langen Stillstandszeiten beseitigt werden können, was gerade in der Energiebranche zu sehr hohen Kosten führt. [4]

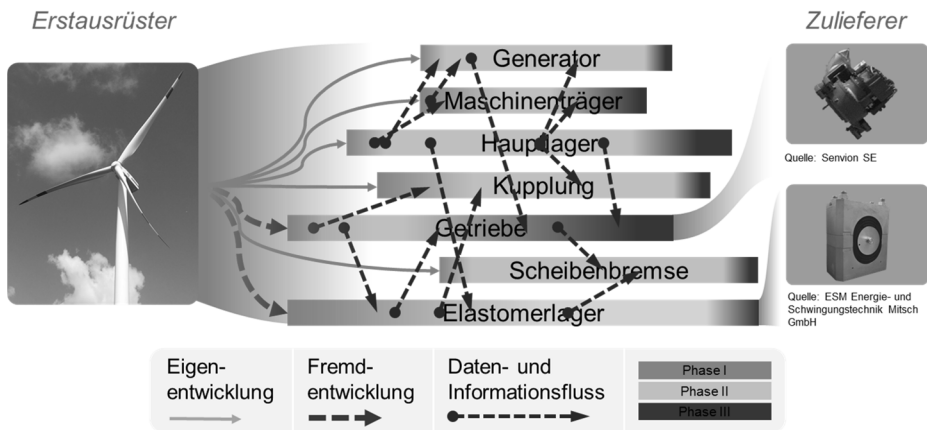


Bild 2: Daten- und Informationsfluss im PEP einer WEA nach [9]

Diese Beobachtung wird durch folgende Studien bekräftigt:

Im Jahr 2006 zeigt Voigt et al. [14] durch die ProWis-Studie die vielfältigen Herausforderungen und Probleme bei der Handhabung von Wissen im Unternehmen auf. Hierbei werden die beschleunigte Integration von neuen Mitarbeitern in bestehende Produktentwicklungsprozesse, die Verwendung von bereits vorhandenem Wissen für neue Projekte, die Nutzung von Wissen in Projekten und dessen Übertragung auf neue Projekte, sowie die Anwendung von Wissen für Produktoptimierung am häufigsten genannt.

Müller et al. [10] fasst in der Studie zur „Kollaborativen Produktentwicklung und digitale Werkzeuge 2013“ die heutige Arbeitsweise von Ingenieuren zusammen. Besonders interessant in diesem Kontext zeigen sich die Aussagen der PE zur Wahrnehmung der täglich durchgeführten Aufgaben und wie mühevoll diese wahrgenommen werden. Hier werden vor allem das Beschaffen und Auffinden von Daten und Informationen und Durchführen von Routinetätigkeiten als besonders belastende Aufgabe empfunden.

Turki et al. [13] führte 2014 eine Umfrage zur Identifikation der Hindernisse beim Transfer von Erfahrungswissen in Unternehmen durch. Hierbei zeigte sich, dass die Antwort des Befragten von deren Personalverantwortungssituation abhängt. Am häufigsten wurde der Mangel an Zeit, unflexible Organisationsstrukturen und die räumliche Distanz genannt.

Diese Studien zeigen im Allgemeinen den Bedarf der PE an Werkzeugen und Methoden zur Unterstützung beim Wissenstransfer und bei der kontextsensitiven Bereitstellung von entwicklungsrelevanten Daten. In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, der den PE bei der lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen durch eine wissensbasierte Navigation hierbei unterstützt.

4 Konzept für eine wissensbasierte Navigation

In diesem Kapitel wird genauer auf das entwicklungsrelevante Wissen zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen eingegangen und wie dieses Wissen akquiriert, repräsentiert, formalisiert und im Anschluss zur Verfügung gestellt wird.

4.1 Identifikation des Entwicklungswissens

Zur Identifikation des entwicklungsrelevanten Wissens wurde eine Methode aus dem Bereich der indirekten Wissensakquisition eingesetzt (siehe Abschnitt 4.2). Hierbei sind mehrere Gespräche von PE und Experten für die lärmreduzierte Auslegung rotierender Maschinen beobachtet und dokumentiert worden [3, 4, 5, 8]: Die PE und Experten arbeiteten meist kollaborativ an den Problemstellungen und nutzten dazu bestehende Daten (z. B. Messungen oder Simulationsergebnisse). Zur Gewinnung von Erkenntnissen erfolgten ausgewählte Analysen (z. B. eine interaktive Visualisierung und Gegenüberstellung der Daten). Die Abfolge der Datenverarbeitung war entscheidend, da Zwischenergebnisse erzeugt und für weitere Analysen genutzt wurden. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse konnten Entwicklungsentscheidungen fundiert getroffen werden. Die Handhabung der Daten und das Vorgehen bei den Analysen begründeten die PE mit Erfahrungen. Verzögerungen bei der Entscheidungsfindung zeigten sich vor allem dann, wenn die Daten nicht verfügbar waren. Dies hatte den Grund, dass keine einheitliche Datenbasis für die verschiedenen Datenformate zur Verfügung stand, die Daten in einem nicht-rechnerverarbeitbaren Format (z. B. PDF) vorlagen oder von Zulieferern noch nicht zur Verfügung gestellt wurden. Es wurde betont, dass die Vorgehensweisen flexibel angepasst werden, wenn sich neue Erkenntnisse ergeben.

Das Wissen zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen manifestiert sich somit bei den Experten (Erfahrungswissen) und deren Umgang mit den Daten und den Analysemöglichkeiten (Methodenwissen). Das Methodenwissen stellt in diesem Ansatz die Entwicklungsaufgaben dar, die ein Entwicklungsziel verfolgen (z. B. „Entwicklung eines neuen Elastomerlagers“). Diese Aufgaben werden durch das Ausführen von Arbeitsanweisungen (z. B. „Akquiriere!“, „Berechne!“, „Visualisiere!“, „Messe!“, „Simuliere!“), im folgenden Aktivität genannt, und das Treffen von Entscheidungen definiert (z. B. „Sind die Steifigkeiten aus akustischer Sicht in Ordnung?“). Ebenso wird definiert, in welcher Phase des PEPs eine Aktivität oder Entscheidung durchgeführt oder getroffen wird. Die Aktivitäten dienen in erster Linie dazu, Daten zu akquirieren, die als Grundlage für eine Entscheidung benötigt werden. Hierbei wird beschrieben, welche Daten durch Analysen akquiriert werden oder wo die Daten zu finden und wie Daten akquiriert werden können. Die Entscheidungen lenken den Prozess je nach Antwort in eine andere Richtung. Ein Rücksprung auf bereits durchgeführte Aktivitäten oder getroffene Entscheidungen ist ebenso vorgesehen, wodurch Iterationen möglich werden.

4.2 Wissensakquise

Nach Spur et al. [12] und Rude [11] bestehen wissensbasierte Systeme aus fünf Hauptkomponenten: die Wissensakquisitionskomponente, die Wissensbasis, die Inferenzkomponente, die Erklärungskomponente und die Dialogkomponente. Verfügbares Wissen kann über die Wissensakquisitionskomponente in die Wissensbasis überführt werden. Ebenso ist diese Komponente für die Administration der Wissensbasis zuständig. Es wird zwischen der direkten, indirekten und der automatischen Wissensakquisition differenziert. Bei der direkten Wissensakquisition kann der Experte sein Wissen über eine geeignete Dialogkomponente in das wissensbasierte System überführen. Die indirekte Wissensakquisition erfordert einen Wissensingenieur, der den Experten interviewt und darauffolgend das Wissen in eine strukturierte und abstrakte Form überführt und über die Wissensakquisitionskomponente in der Wissensbasis implementiert. Die automatische Wissensakquisition erweitert die Wissensbasis selbstständig ohne das Eingreifen des Menschen durch Literaturanalyse oder Methoden des maschinellen Lernens.

Das Wissen für die wissensbasierte Navigation kann einerseits durch direkte und indirekte Wissensakquisition in das Assistenzsystem vom Experten bzw. einem Wissensingenieur überführt werden. Hierfür wird eine intuitiv bedienbare, grafische Benutzeroberfläche als Dialogkomponente zur Verfügung gestellt. Eine automatische Wissensakquisition ist in diesem Fall nicht möglich, da das Entwicklungswissen nicht in geeigneter Form vorliegt.

4.3 Formalisierung des Entwicklungswissens

Den Kern eines wissensbasierten Systems stellt die Wissensbasis dar. Sie speichert das Wissen einer Domäne zur Wiederverwendung in einer rechnerverarbeitbaren Repräsentationsform ab. Spur et al. [12] teilt die wichtigsten Wissensrepräsentationsformen in vier Gruppen: logik-, regel-, constraint- und objektorientierte Repräsentation. In der logikorientierten Wissensrepräsentation werden Aussagen und Relationen verwendet, um Beziehungen und Objekte zu beschreiben. Die regelorientierte Repräsentation bildet das Wissen durch Regeln ab, die aus einer Prämisse und einer Konklusion und bestehen (WENN ... DANN ...). Die constraintbasierte Repräsentation stellt z. B. eine Beziehung zwischen zwei oder mehreren Variablen dar (z. B. $A = 1 * b$). Bei der objektorientierten Wissensrepräsentation wird das Wissen durch geordnete Objekte genutzt. Die bekanntesten Vertreter sind semantische Netze und Frames. Frames können als Beschreibung von Objekten in Karteikartenform verstanden werden. [12]

Das für die wissensbasierte Navigation benötigte Wissen manifestiert sich in Form von Aufgaben, Aktivitäten und Entscheidungen, sowie deren Abfolge und Abhängigkeiten. Die objektorientierte Wissensrepräsentationsform ermöglicht die Abbildung des Wissens. Der Vorteil dieser Repräsentationsform liegt darin, dass sie in den heute gängigen relationalen Datenbanken als Wissensbasis überführt werden kann, wodurch die sichere Verwaltung des Wissens gewährleistet wird.

4.4 Verwaltung und Bereitstellung des Wissens

Eine zentrale Wissensbasis zur Verwaltung und Bereitstellung des Entwicklungswissens ist für das kontinuierlich wachsende Wissen zur lärmreduzierten Auslegung nur bedingt geeignet. Eine Intention des hier vorgestellten wissensbasierten Systems ist u. a. das Experten- und Methodenwissen zu akquirieren, sodass der PE durch die Anwendung des Wissens Erkenntnisse hinzugewinnt und diese im besten Fall weiterentwickelt. Hierfür muss der PE die Möglichkeit haben, die hinterlegten Aufgaben, Aktivitäten und Entscheidungen sehr einfach zu modifizieren. Zuvor werden diese von einem Experten oder Wissensingenieur als sog. Projekte modelliert (Wissensakquisition) und dann dem PE als Vorlage zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund bietet sich eine verteilte Wissensbasis an, die die einzelnen Projekte für sich verwaltet (siehe Bild 4).

Der Vorteil einer verteilten Wissensbasis ist zudem, dass hierdurch das Assistenzsystem portabel bleibt, da keine (dauerhafte) Anbindung an eine

zentrale Wissensbasis benötigt wird. Zum anderen können PE Verbesserungen von einzelnen Projekten an die Experten zur Überprüfung verschicken und bei positiver Bewertung übernommen werden. Hierdurch profitieren beide Parteien gleichermaßen. Ebenso wird durch diese Flexibilität zum einen die Kreativität des PE zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Entwicklungsaufgaben gefördert. Zum anderen steigt die Akzeptanz dieses Assistenzsystems, da es nicht nur die vom Experten vorgegebenen Analysen der Daten diktiert, sondern dem PE größtmöglichen Freiraum in seiner Entscheidungsfindung lässt. Für die verteilte Wissensbasis eignen sich in diesem Fall relationale, dateibasierte Datenbanken.

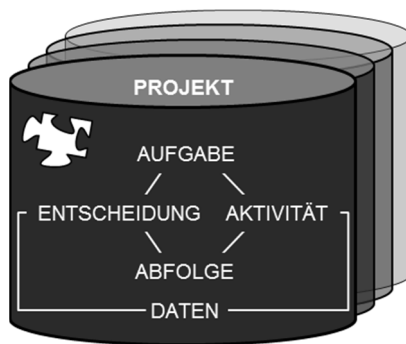


Bild 4: Aufbau der verteilten Wissensbasis

5 Implementierung im Assistenzsystem ALARM

Die Implementierung der wissensbasierten Navigation setzt sich aus einem Administrations- und einem Navigationsteil zusammen. Zuerst muss der Experte oder Wissensingenieur ein neues Entwicklungsprojekt anlegen. Hierdurch wird eine auftragsneutrale Wissensbasis (Template) als relationale, dateibasierte Datenbank angelegt und in einem vordefinierten Ordner für die Projekte lokal abgespeichert (siehe Bild 5).

Im ersten Wissensakquisitionsschritt muss der Experte oder Wissensingenieur die notwendigen Entwicklungsaufgaben, -aktivitäten und -entscheidungen im Administrationsteil des erzeugten Projektes modellieren (vgl. Bild 6). Die Aktivitäten und Entscheidungen sind einer bestimmten Phase des PEP zugeordnet, sodass der Entwicklungsnavigator zum richtigen Zeitpunkt auf die anstehende Aktivität oder Entscheidung hinweisen kann. Es ist ebenso wichtig, dass eine ausführliche Beschreibung in Prosaform hinzugefügt wird, die den Umgang mit den Daten im Detail beschreibt.

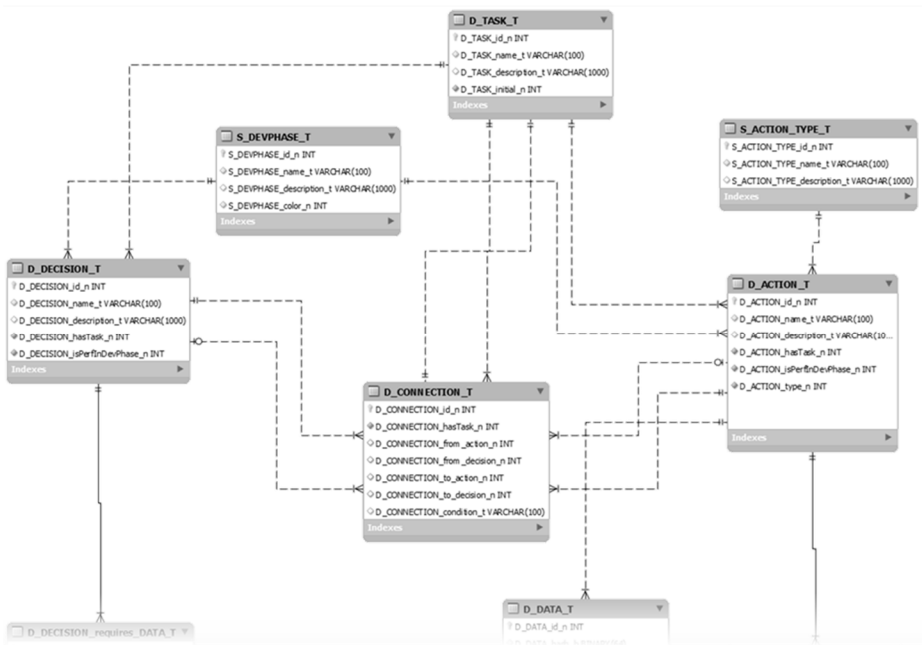


Bild 5: Ein Ausschnitt des ER-Diagramms der Wissensbasis als relationale, dateibasierte Datenbank

Im zweiten Schritt werden die Abfolgen zwischen den Aktivitäten und Entscheidungen modelliert. Hierbei folgt auf jede Aktivität entweder eine andere Aktivität oder eine Entscheidung. Eine Entscheidung kann auf mehrere Aktivitäten oder andere Entscheidungen zeigen, wobei jeder Pfad durch eine Bedingung beschrieben wird (z. B. „Steifigkeit > 50 N/mm“ oder „Steifigkeit ≤ 50 N/mm“). Im letzten Schritt werden die Datenarten definiert, die in den Aktivitäten und Entscheidungen zu analysieren bzw. zu bewerten sind.

Während der Navigation werden die definierten Aktivitäten und Entscheidungen aller Entwicklungsaufgaben je nach Phase im PEP ausgeführt. Zum Durchführen der Aktivitäten werden zum Teil Daten vorausgesetzt. Das Resultat einer Aktivität stellen wiederum Daten dar, die durch einen beschriebenen Vorgang akquiriert werden. Bspw. werden für die Aktivität „Führe eine MK-Simulation aus“ zum einen alle Axial- und Vertikalsteifigkeiten benötigt, zum anderen erzeugt diese Aktivität z. B. das Schallübertragungsverhalten, das zurück in das Assistenzsystem geführt wird. Entscheidungen basieren immer auf bereits akquirierten Daten des Assistenzsystems. Die Daten definieren mit

den hinterlegten Bedingungen, welche Aktivität oder Entscheidung als nächstes folgt.

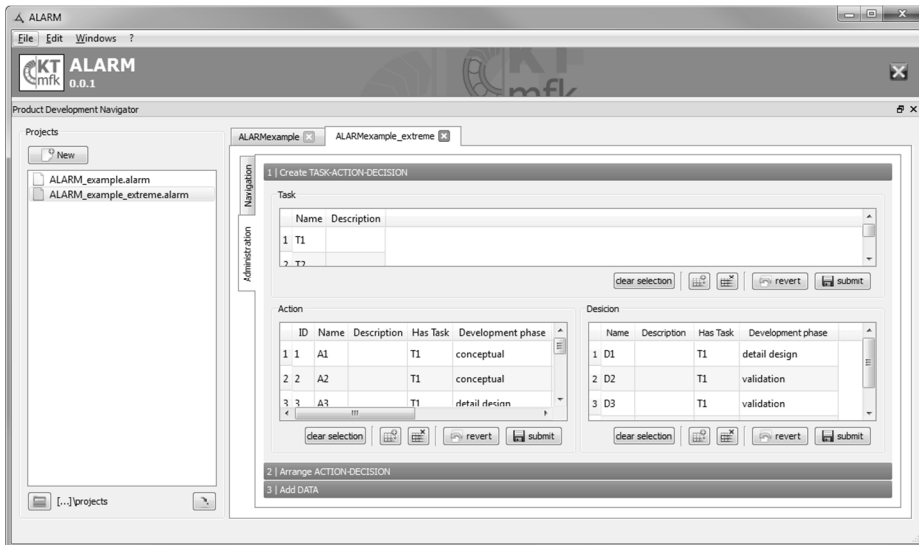


Bild 6: Dialogkomponente zur Wissensakquisition des Assistenzsystems ALARM

Die eigentliche Datenakquise wird in zwei Arten differenziert: intern und extern. Die interne Datenakquise findet nach dem Ausführen einer Analyse statt, die im Assistenzsystem direkt implementiert sind (z. B. die interaktive Visualisierung). Die externe Datenakquise bietet die Möglichkeit, in externen Werkzeugen Analysen mithilfe vom Assistenzsystem bereitgestellter Daten durchzuführen und die Analyseergebnisse über standardisierte Austauschformate wieder in das Assistenzsystem zurückzuspeichern. Hierdurch wird auch der rechtzeitige Austausch von Daten im PEP unterstützt, da z. B. eine Aktivität lauten kann: „Fordere Prüfstandprotokoll von Zulieferer Musterfirma GmbH an“. Ebenso kann dadurch das Assistenzsystem sehr einfach durch weitere Analysemöglichkeiten erweitert werden.

6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Zu Beginn des Beitrags wurde gezeigt, dass aufgrund der komplexen Thematik der Akustik und die daraus resultierenden Schwierigkeiten ein Bedarf besteht, Produktentwickler in diesem Kontext wissensbasiert zu unterstützen. Hierfür wurde der Ansatz einer wissensbasierten Navigation vorge-

stellt, wobei insbesondere auf die Wissensidentifikation, die Wissensakquise, die Formalisierung, sowie der Verwaltung und Bereitstellung des Entwicklungswissen für die Domäne der lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen eingegangen wurde. Die Implementierung in das Assistenzsystem ALARM war Fokus des sich anschließenden Kapitels/ein weiterer Fokus. Der hier präsentierte Ansatz stellt eine Möglichkeit dar, den Produktentwickler bei der lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen zu unterstützen. Hierbei wird Experten- und Methodenwissen für die Verarbeitung und Analyse von Daten von akustischen Produkteigenschaften akquiriert und den Produktentwicklern zur Verfügung gestellt. Ebenso wird durch diesen Ansatz eine Plattform geschaffen, um Expertenwissen in eine strukturierte Form zu überführen, wodurch der Wissenstransfer begünstigt wird. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten wird die wissensbasierte Navigation durch eine mehrdimensionale Datenbasis erweitert, um den Zugriff auf bereits akquirierte Daten und deren Austausch zwischen den Produktentwicklern zu unterstützen. Ebenso wird ein Augenmerk auf den Möglichkeiten zur Datenanalyse liegen, die einerseits weiterentwickelt und andererseits erweitert werden.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

- [1] ARD-aktuell (Hrsg.): "Bei der Windkraft wird gekürzt: Union und SPD beschließen radikalen Umbau", URL <http://www.tagesschau.de/wirtschaft/windkraft124.html>. Stand: 09.11.2013, Abruf: 23.07.2014.
- [2] EUREKA-ALARM: "Rahmenplan des Verbundprojekts EUREKA-ALARM", Karlsruhe, 2011.
- [3] EUREKA-ALARM: "Unveröffentlichtes Gesprächsprotokoll von C. Küstner", Rimbach-Mitlechtern, 10.05.2013.
- [4] EUREKA-ALARM: "Unveröffentlichtes Gesprächsprotokoll von C. Küstner", Osterrönnfeld, 24.02.2013.

-
- [5] EUREKA-ALARM: "Unveröffentlichtes Gesprächsprotokoll von C. Küstner", Kontich (Belgien), 03.03.2014.
- [6] FGW e.V. (Hrsg.): "Technische Richtlinie für Windenergieanlagen", 2008.
- [7] IEC 61400-11 (2.1): "Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques", 2006.
- [8] Karbach, W.: "Methoden und Techniken des Knowledge Engineering", 1988.
- [9] Küstner, C. et al.: "Design for noise reduction – The architecture of an engineering assistance system for the development of noise-reduced rotating systems", In: ICED 13 – 19th International Conference on Engineering Design, Seoul, 2013.
- [10] Müller, P. et al.: "Kollaborative Produktentwicklung und digitale Werkzeuge: Defizite heute – Potenziale morgen; eine Studie der CONTACT Software GmbH, des Fraunhofer IPK und des VDI", Fraunhofer IPK, Berlin, 2013.
- [11] Rude, S.: "Wissensbasiertes Konstruieren", Habilitationsschrift, Shaker, Aachen, 1998.
- [12] Spur, G. et al.: "Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik", Hanser, München, 1997.
- [13] Turki, T. et al.: "Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung", Konstruktion, Vol. 3, S. 85–90, 2014.
- [14] Voigt, S. et al.: "Wissensmanagement in produzierenden KMU: Bedeutung und Herausforderungen – ProWis-Studie", Fraunhofer IPK, Magdeburg, Berlin, 2006.

Potenziale für die Schaffung altersgerechter Unterstützungssysteme durch die Nutzung von Cyber-Physical Systems

Olga Gottfried, Sandra Eilmus, Dieter Krause
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik;
Technische Universität Hamburg-Harburg*

Abstract

Due to the demographic shift, there is a growing need for products, which can improve and maintain the autonomy and mobility of elderly people. The group of elderly people is highly heterogeneous and has a high number of variant and variable, i.e. changing over the time of use, requirements on products. The embedding of cyber-physical systems in products for maintaining and improving the mobility of elderly offers great opportunities for new and automatic functions on the one hand and the realization of a holistic support system on the other hand. A few examples and advantages due to cyber-physical systems are given below. However, there is a huge need for the development of methods that can handle the high complexity of cyber-physical systems.

Keywords: Altersgerechte Produktentwicklung, Variabilität, Mobilitätserhaltung, Cyber-Physical Systems

1 Erhaltung der Selbständigkeit älterer Menschen

Die zunehmende Alterung der Bevölkerung stellt alle Bereiche der Gesellschaft vor große Herausforderungen, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht voll-

ständig überblickt werden können. Die Bevölkerungsalterung wirkt sich dabei auf zahlreiche Bereiche des gesellschaftlichen Lebens aus. Darunter zum Beispiel Krankenhausbelegungen, Pflegeversorgung und Arbeitsmarkt [1]. Der Mangel an jungen Menschen, die die zunehmende ältere Bevölkerung versorgen können, macht es notwendig, dass ältere Menschen möglichst lange selbstständig, selbstbestimmt und selbstversorgend bleiben. Ältere Menschen hierbei zu unterstützen, rückt daher zunehmend in den Fokus der Gesellschaft.

Um möglichst lange selbstständig und unabhängig zu bleiben, bieten sich technische Systeme an, die ältere Menschen im Alltag unterstützen. Hierbei sind vor allem Systeme gefragt, die der persönlichen und häuslichen Sicherheit dienen, den Komfort und die Kommunikation mit anderen verbessern sowie die eigene Mobilität erhalten [2]. Dabei spielt vor allem die Mobilität eine große Rolle, da sie neben der Bewegung von Dingen und Personen auch die Interaktion mit der Umwelt und die Kommunikation mit anderen Personen beinhaltet bzw. erst ermöglicht. Die Aufrechterhaltung der Mobilität bietet somit die Grundvoraussetzung für die Aufrechterhaltung der Unabhängigkeit und Selbständigkeit einer Person [3]. Hierbei sollte nach Möglichkeit eine ganzheitliche Mobilitätsunterstützung das Ziel sein, die ebenso wie die Mobilität selbst, mehr umfasst als die bloße Bewegungsunterstützung [3]. Je nach Art der Anwendung des Produkts können für diesen Zweck Funktionen vorgesehen werden, die der Sicherheit, dem Komfort und/ oder der Kommunikation dienen. Die Erfüllung des gesellschaftlichen Ziels bietet dabei auch aus unternehmerischer Sicht Vorteile. So verbessert die Berücksichtigung der spezifischen Bedürfnisse älterer Menschen die Akzeptanz des Produkts und damit auch dessen Marktstellung.

2 Berücksichtigung der individuellen Bedürfnisse

Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung von Produkten für ältere Menschen ist die Tatsache, dass es sich hierbei um eine sehr heterogene Gruppe handelt, in der die Fähigkeiten, das Leistungsvermögen und nicht zuletzt auch die Wünsche und Bedürfnisse der einzelnen Individuen sehr unterschiedlich sein können. Bestimmte Untergruppen zu definieren, in denen die Einzelpersonen ähnliche Bedürfnisse und Anforderungen an Produkte stellen, die somit mit einer definierten Produktvariante abgedeckt werden können, fällt schwer. Eine mögliche Einteilung über verschiedene Altersgruppen erweist sich dabei als unzulänglich, da der Fortschritt des Alterungsprozesses eines Menschen aufgrund des biographischen Alters (der Zeitspanne seit der Geburt) weder bestimmt, noch vorhergesagt werden kann. Begründen lässt sich das durch den Alterungsprozess an sich. Dieser besteht nicht nur aus

dem normalen Alterungsprozess, der sich in einem kontinuierlichen und stetigen Abbau von geistigen und körperlichen Fähigkeiten äußert, sondern wird auch durch den pathologischen Alterungsprozess bestimmt. Dieser ist, bedingt durch schwere und/oder chronische Krankheiten sowie den jeweiligen Lebenswandel, spontan und kann nicht vorhergesagt werden [4]. Ebenso nicht betrachtet bei der Einteilung in Altersgruppen ist der soziale und individuelle Hintergrund eines Menschen. So spielen auch Erfahrung, Gewohnheit und Geschmack eine wichtige Rolle bei der Auswahl eines Produkts. Aus der Sicht der Produktentwicklung ergibt sich bei der Entwicklung für ältere Menschen eine hohe Varianz an verschiedenen Anforderungen an das Produkt und somit auch eine hohe Varianz des Produkts selbst. Dieser Faktor kommt vor allem bei Produkten zum Tragen, die in einem engen Kontakt und enger Interaktion mit dem Menschen stehen, wie es zum Beispiel bei aktiven Unterstützungssystemen der Fall ist.

Hinzu kommt, dass sich die körperliche und geistige Leistungsfähigkeit, die Sinneswahrnehmung sowie auch die Körpermaße älterer Menschen und damit auch ihre Bedürfnisse und Anforderungen an Produkte in einem viel höherem Tempo ändern als es bei jungen Erwachsenen der Fall ist [5]. Diese Veränderungen können dabei über mehrere Jahre, wie zum Beispiel bei einer stetig nachlassenden Sehkraft, über mehrere Monate und Wochen, wie zum Beispiel bei einer schrittweisen Regeneration nach einer Operation, oder auch über wenige Stunden hinweg stattfinden. Letzteres ist zum Beispiel dann der Fall, wenn nach einem langen Spaziergang die Leistungsfähigkeit der Beine nachlässt oder diese nach langem Stehen anschwellen. Diese Veränderungen können dabei durchaus noch während der Nutzungszeit des Produkts von statten gehen und dadurch dessen Funktionsfähigkeit beeinflussen.

Ein Modell nach Lawton und Nahemow [6] stellt die Nutzerkompetenz den technischen Anforderungen gegenüber (Bild 1). Es besagt, dass nur die optimale Passung eines Produktes die optimale Unterstützung und damit Lebensqualität bietet, zu hohe Anforderungen an den Nutzer können ihn dagegen schnell überfordern und damit zur Ablehnung des Produkts führen. Auf der anderen Seite wirken zu geringe Anforderungen ebenfalls der Akzeptanz eines Produkts entgegen, da hier eine Unterforderung droht [6]. Übertragen auf ein altersgerechtes Unterstützungssystem, das die Mobilität und Selbstständigkeit einer Person erhalten soll, bedeutet das, dass optimale Unterstützungs- und falls vorhanden auch Trainingseffekte nur dann erzielt werden können, wenn die vorhandene Nutzerkompetenz zu jedem Zeitpunkt genau angesprochen wird. Der Grat zwischen einer optimalen Unterstützung einerseits und einer Überforderung durch zu geringe Unterstützung bzw. einer Verkümmern der noch vorhandenen Fähigkeiten durch Nicht-Beanspruchung bei zu hoher Un-

terstützung andererseits ist vor allem bei Produkten, die mit zunehmendem Alter nachlassende Fähigkeiten und Fertigkeiten unterstützen sollen, besonders schmal. Ein Ansprechen der jeweils zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhandenen Nutzerkompetenz ist somit für die Akzeptanz des Produkts entscheidend.

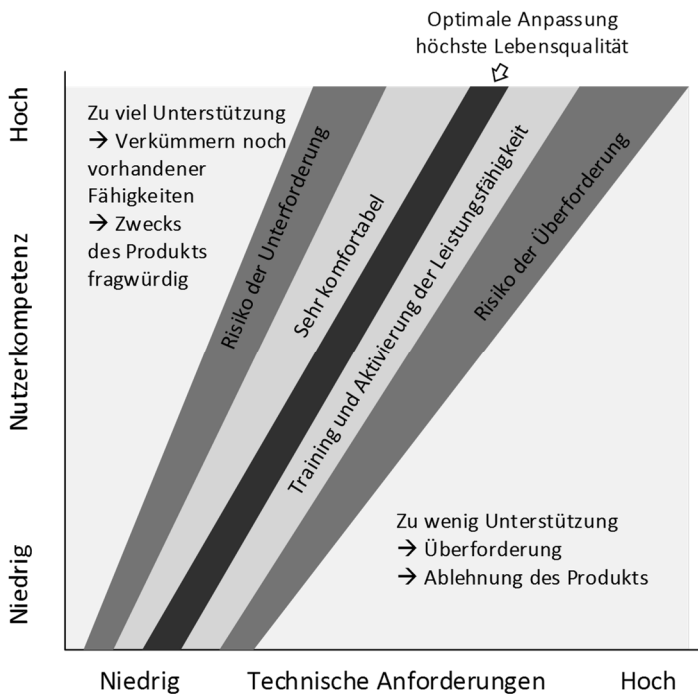


Bild 1: Nutzerkompetenz und technische Anforderungen nach Lawton [6]

Um diese Varianz von Nutzeranforderungen über die Nutzungszeit besser abzugrenzen und deutlicher in den Vordergrund zu rücken, wird der Begriff der Variabilität verwendet [7]. Während die Variabilität von Produkten die gesamte Vielfalt aller Nutzer und damit ihrer Anforderungen und Bedürfnisse abbildet, verdeutlicht die Variabilität die Vielfalt der Anforderungen über die Nutzungszeit einer einzelnen Produktvariante. Für die Akzeptanz der Produkte müssen sowohl variante als auch variable Anforderungen bereits bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Bild 2 verdeutlicht diesen Unterschied anhand eines generischen Beispiels. Um eine große Variabilität von Anforderungen technisch realisieren zu können, können verschiedene Mechanismen wie die Einstellbarkeit oder die Neukonfiguration von Komponenten sowie ein

Up- oder Downgrade von Varianten vorgesehen werden. Das Umsetzen einer modularen Gestalt bzw. das Nutzen modularer Eigenschaften, wie Schnittstellenstandardisierung, kommunale Verwendung von Modulen, Funktionsbindung sowie Kombinierbarkeit und Entkopplung von Modulen [8], erweist sich dabei als hilfreich.

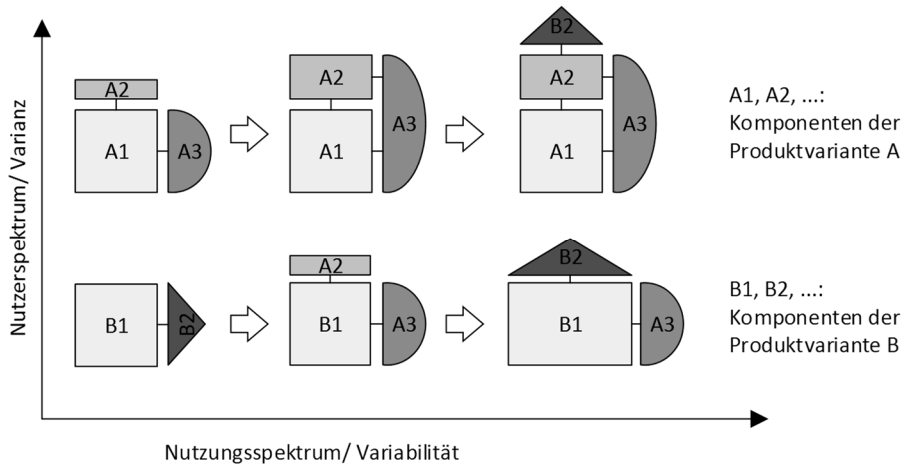


Bild 2: generisches Beispiel für variante und variable Komponenten

Neben der beschriebenen Varianz und Variabilität von Eigenschaften und Fähigkeiten älterer Menschen muss vor allem bei der Entwicklung von mobilitätserhaltenden Unterstützungssystemen eine weitere Ursache für variable Eigenschaften berücksichtigt werden, nämlich die Mobilität selbst. So ändern sich während der Nutzungszeit die Mobilitätssituationen, d.h. die Bedingungen, unter denen das Produkt eingesetzt werden soll. Zu diesem Zweck lassen sich verschiedene Mobilitätsebenen unterscheiden wie die eigene Wohnung oder das nähere Umfeld, in denen verschiedene technische, soziale und individuelle Randbedingungen herrschen (Bild 3) [9], [10].

Um das Ziel einer ganzheitlichen Mobilitätsunterstützung unter Berücksichtigung verschiedenster varianter und variabler Anforderungen von Nutzern und ihrer Umgebung erreichen zu können, bietet sich die Nutzung und Einbettung von cyber-physischen Systemen, kurz CPS, an. Diese ermöglichen neue Potenziale für die Entwicklung verschiedenster Unterstützungssysteme und damit auch eine Möglichkeit varianter und variabler Anforderungen abdecken zu können. Sie können aber auch unter Umständen eine höhere Komplexität des Systems durch die hohe Zahl verschiedener Interaktuere mit sich führen.

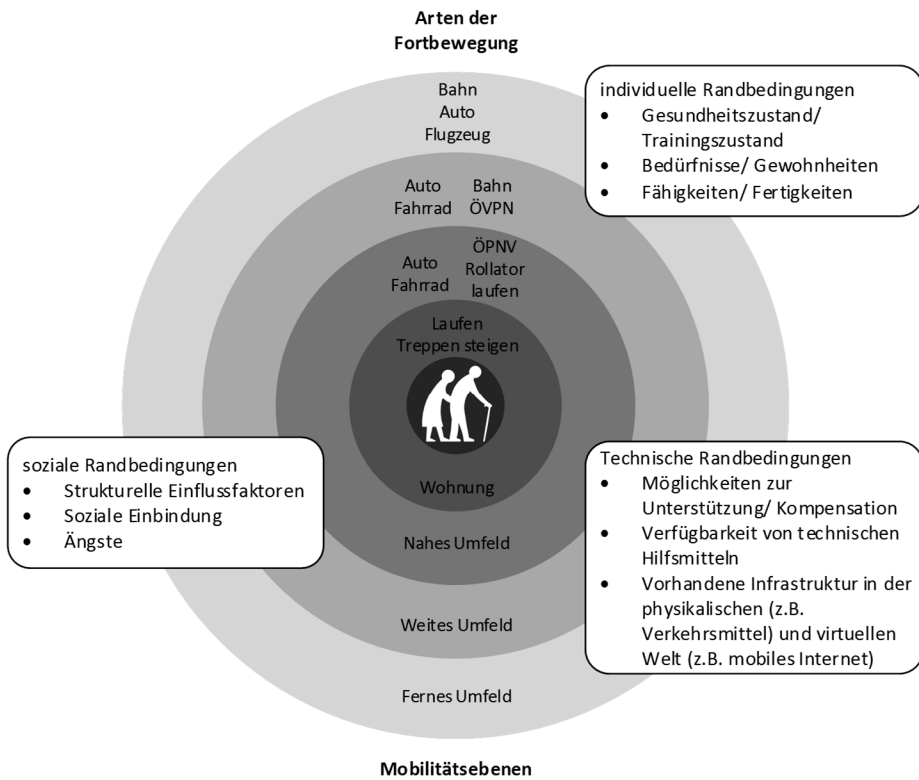


Bild 3: Mobilitätsebenen nach Lueth, et al. [9], [10]

3 Potenziale durch die Nutzung von CPS

Unter CPS wird allgemein die Verknüpfung der physikalischen Welt, d.h. von Sensoren, Aktoren, etc., mit der virtuellen Welt, d.h. dem Internet und internetbasierten Diensten verstanden. Die Realisierung von CPS bietet eine Vielzahl von neuen Anwendungsmöglichkeiten und Potenzialen. Ihre Nutzung ermöglicht dabei die Erhöhung des Komforts, der Sicherheit und der Energieeffizienz von Produkten. Aber auch die Bedienerfreundlichkeit kann trotz erhöhter Komplexität des Systems durch die Vielzahl an autonomen und für den Anwender unsichtbar arbeitenden, eingebetteten Systeme verbessert werden. Voraussetzung hierfür ist eine flächendeckende Abdeckung mit mobilem Internet, zum Beispiel über WLAN oder UMTS. Für die Vernetzung können darüber hinaus verschiedene technische Systeme genutzt werden, wie zum Beispiel Cloud Computing und RFID Chips. [11]

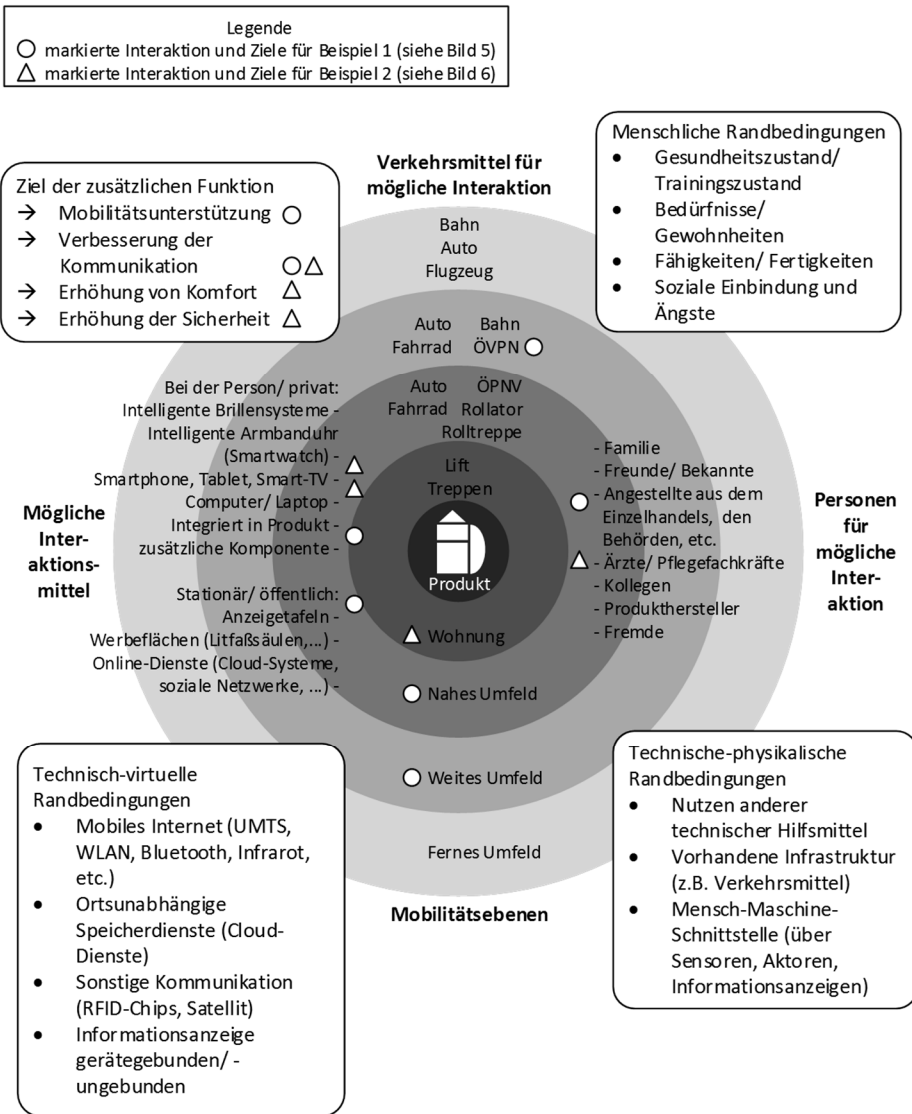


Bild 4: Mobilitätsebenen aus der Sicht des cyber-physischen Produkts

Welche Funktionen tatsächlich wie realisiert werden können, welche Interakteure dafür berücksichtigt werden müssen und welche Mensch-Maschine-Schnittstelle dafür genutzt wird, hängt nicht so sehr vom Produkt selbst, wie vom späteren Nutzer und seinen Bedürfnissen sowie den Mobili-

tätssituationen ab, in denen es genutzt werden soll. Zur besseren Veranschaulichung kann das Mobilitätsebenenmodell von Lueth, et al. auf das unterstützende cyber-physischen Produkt übertragen werden (Bild 4). Aus Sicht des Produkts lassen sich ebenfalls Randbedingungen, mögliche Interakteure und Interaktionsmittel aufstellen, die teilweise bestimmten Mobilitätsebenen zugeordnet werden können. Diese Veranschaulichung und Sammlung von Informationen hilft bei der Definition der möglichen Funktionen. Das Ziel, das die zusätzliche Funktion erfüllt, ist daher ebenfalls eingetragen. Am Beispiel eines mobilitätserhaltenden Unterstützungssystems in Form eines partiellen Knie-Exoskeletts lassen sich zum Beispiel zwei verschiedene zusätzliche Funktionen in Bild 4 kennzeichnen (Markierung über die Symbole Kreis (Beispiel 1, Bild 5) und Dreieck (Beispiel 2, Bild 6)).



Bild 5: Die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern wird ermöglicht

Neben der Hauptfunktion - der Unterstützung der Kniebewegung - kann das Knie-Exoskelett durch Nutzung von CPS, eine Kommunikation zu anderen

Verkehrsteilnehmern, wie zum Beispiel den Bussen des öffentlichen Nahverkehrs, aufbauen (Bild 4, Kreise). Falls die mobilitätseingeschränkte Person den bereits wartenden Bus noch erreichen will, kann das Gerät darum bitten, zu warten sowie, entsprechend den Fähigkeiten der Person, das Fahrwerk des Busses abzusenken oder die Unterstützung des Busfahrers anfordern (Bild 5). Hinzu kommt, dass die individuelle Tagesform der Person, ihr Trainingsfortschritt und der Grad der Ermüdung mithilfe von verschiedenen Sensoren erfasst und der Unterstützungsgrad und die Bewegungswinkel angepasst werden können, ohne dass aufwendige Einstellungs- und Programmiervorgänge vom Nutzer durchgeführt werden müssen. Um diese Aufgaben automatisch und richtig ausführen zu können, benötigt das Gerät neben den Echtzeitdaten über Ermüdung und Kraft einer Person auch Informationen über dessen Gewohnheiten und Bedürfnisse.



Bild 6: Medizinische Ferndiagnose durch verbesserte Kommunikation zum Arzt möglich

Eine weitere Funktion, die ergänzend oder alternativ zum vorherigen Beispiel in das Beispielprodukt eingebettet werden kann, ist die Verbesserung der Kommunikation zum Arzt (Bild 6; Bild 4, Dreiecke). Dies ist dann eine sinnvolle Zusatzfunktion, wenn das Gerät als Rehabilitationshilfe genutzt werden soll. In diesem Fall würden die Kräfte, Bewegungswinkel sowie Trainingsfortschritte erneut vom Gerät automatisch gemessen werden, nur dass die Daten in diesem Fall aufgezeichnet und an den behandelnden Arzt weitergeleitet werden. Dieser kann nun auf Basis der ausführlichen Datengrundlage neue Trainingsziele setzen oder mögliche Probleme frühzeitig erkennen und diesen entgegenwirken. Zusätzlich könnten die Parameter und Daten über Trainingsfortschritte und häufige Probleme für andere Patienten mit ähnlicher Indikation genutzt werden, sodass diese effektiver und schneller Fortschritte machen können. Für den behandelnden Arzt bietet diese Funktion die Möglichkeit gezielt Diagnosen erstellen zu können, ohne in direkten körperlichen Kontakt mit dem Patienten zu treten. Dadurch wird die medizinische Ferndiagnose ermöglicht, die Kommunikation zwischen Arzt und Patient durch Digitalisierung und vordefinierte Prozesse verbessert und vereinfacht.

Unabhängig vom genannten Beispiel des Knie-Exoskeletts können noch andere zusätzliche Funktionen zur vielfältigen Unterstützung älterer Menschen vorgesehen werden, die wiederum zusammen mit den schon genannten Funktionen in einem Gerät oder separat in verschiedenen Geräten umgesetzt werden können. So kann zur Verbesserung der persönlichen Sicherheit ein vorhandenes Produkt, wie zum Beispiel eine Smartwatch, um verschiedene Sensoren erweitert werden, die die Vitaldaten und/ oder Beschleunigungen einer Person aufzeichnen. Der Nutzen hierbei liegt in der Erfassung und Meldung von Stürzen, rapiden Verschlechterungen der Gesundheit bzw. Unfällen jeglicher Art. Die Messung der Vitaldaten, kann je nach Ausführung der Sensoren, auch Informationen über die Art und Schwere des Notfalles geben. Falls gewünscht, kann dieses System durch Kommunikation mit Satelliten, auch den Standort der betroffenen Person automatisch an die Meldestelle weiterleiten, sodass die Rettungskräfte alle nötigen Informationen über ein System erhalten. Eine solche Kompletterfassung ist vor allem für durch Stürze oder Krankheiten gefährdete Personen sinnvoll, die trotzdem auf ihre Bewegungsfreiheit nicht verzichten wollen.

In einem weiteren Beispiel könnte im Sinne einer Virtual Reality über Einblenden oder Projizieren von Informationen in die physikalische Welt die individuelle Navigation und Orientierung verbessert werden. Dies kann zum Beispiel für die Orientierung in großen Gebäudekomplexen, wie Flughäfen, hilfreich sein. Hier ist es die Aufgabe, das gewünschte Gate oder die nächste Informationsstelle zu finden und dadurch auch möglichen Hemmnissen vor

dem Fliegen entgegenzuwirken. Welche Plattform - Smartphone, Smartwatch, intelligente Brillensysteme, separates Gerät, etc. - hier sowie bei den anderen Beispielen für die Einbettung des cyber-physischen Systems am besten genutzt werden sollte, hängt nicht so sehr vom System selbst, sondern vom späteren Nutzer ab. Um die Hemmnisse vor der Anschaffung eines neuen, unbekanntes Produkts zu reduzieren, kann es sinnvoll sein das cyber-physische System in die vom Nutzer üblicherweise genutzten und bevorzugten Systeme bzw. Designs zu überführen.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Einbettung von cyber-physischen Systemen in vorhandene oder neue Produkte zur Mobilitäts-erhaltung und -steigerung bietet viele neue Potenziale für eine individuelle, automatische und umfassende Unterstützung älterer Menschen. Die interne Komplexität der Systeme steigt dabei zwangsläufig, da für die Realisierung von CPS eine enge Zusammenarbeit der Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik nötig ist [11]. Dabei müssen verschiedene Konfigurationen unterschiedlicher physikalischer und virtueller Systeme möglich sein, die beim Erwerb des Produkts unter Umständen nicht artikuliert wurden, aber während der Nutzungszeit aufgrund sich ändernder Lebensumstände und Bedürfnisse durchführbar sein müssen. Wird diese Konfigurationsmöglichkeit gewährleistet, bietet es die Chance nicht nur die varianten Anforderungen von Nutzern und Umgebung, sondern auch die über die Nutzungszeit variablen Anforderungen abzudecken.

Die im Vorfeld nicht vollständig vorhersehbaren gewünschten Konfigurationen, die große Anzahl an möglichen Interakteuren und möglichen Interaktionsmitteln sowie das notwendige Zusammenspiel mehrerer Disziplinen führen dazu, dass die Entwicklung von CPS zurzeit keine methodische Unterstützung hat. Neben der Entwicklung von cyber-physischen Systemen an sich, der Aufdeckung weiterer Potenziale und der Erhöhung der Datensicherheit gehört die methodische Handhabung dieser Systeme zu den größten Herausforderungen in diesem Bereich in den nächsten Jahren [11]. Um die Potenziale dabei voll ausschöpfen zu können, ist es wichtig, dass die methodische Unterstützung nicht nur die Handhabung der internen großen Komplexität erleichtert, sondern auch aus Gründen der Bedienbarkeit die Komplexität für den Nutzer gering hält.

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt: „Demografischer Wandel in Deutschland“, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Wiesbaden, 2011.

-
- [2] Meyer, S.; Mollenkopf, H.; Schulze, E.: „Die Senioren“, in: *sentha – seniorengerechte Technik im häuslichen Alltag*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [3] Mollenkopf, H.; Flaschenträger, P.: „Erhaltung von Mobilität im Alter“, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2001.
- [4] Faller, H.; Lang, H.: „Medizinische Psychologie und Soziologie“, Springer-Verlag, Berlin, 2010.
- [5] Huppert, F.: „Designing for older users“, in: *Inclusive design*. Springer-Verlag, London, New York. 2003.
- [6] Lawton, M. P.; Nahemow, L.: Ecology and the aging process. In (Eisdorfer, C.; Lawton, M. P. Hrsg.): *The psychology of adult development and aging*. American Psychological Association, Washington, DC, US, 1973; S. 619–674.
- [7] Krüger, D. et al.: Methodische Entwicklung mobilitätserhaltender Produkte am Beispiel einer Aufstehhilfe. In (N.n. Hrsg.): *SSP 2013*. Noch nicht veröffentlicht, 2013.
- [8] Salvador, F.: *Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization*, 2007.
- [9] Lueth, T. C.; D’Angelo, L. T.; Czabke, A.: TUM-AgeTech. A New Framework for Pervasive Medical Devices. In (Coronato, A.; Pietro, G. de Hrsg.): *Pervasive and smart technologies for healthcare. Ubiquitous methodologies and tools*. Medical Information Science Reference, Hershey, Pa, 2010; S. 295–321.
- [10] Krüger, D.; Eilmus, S.; Schmidt, J.; Wartzack Sandro; Krause, D.; Paetzold, K.: „Notwendigkeit für eine Methodenplattform zur Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse“, In: *Design for X*, Hamburg: TuTech Verl, 2011.
- [11] Broy, M.: „Cyber-Physical Systems“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.

Abbildung von Baugruppen mit Hilfe des CPM-Ansatzes in einem PDM-System

M.Sc. Johannes Köbler, Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold
*Institut für Technische Produktentwicklung;
Universität der Bundeswehr München*

Abstract

In this paper, the realization of the characteristic-property-modelling (CPM) approach within a PDM-System has been shown. It has also been demonstrated, how parts and assemblies can be integrated into a database including their characteristics and properties. In addition, a method has been implemented that shows how this information can be extracted out of CAD-files. These files have also been used to identify interfaces between different parts. Currently we are working on the assignment of characteristics and properties to these interfaces. This will help us to identify the importance and sensitivity of interfaces regarding to design changes. Furthermore this will support the planning of simulations.

Keywords: CPM-approach, pdm-system, data processing, interfaces

1 Einleitung

Produkte müssen heute vielfältige Anforderungen erfüllen. Diese vielfältigen Anforderungen erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit unterschiedlicher Domänen, um die geforderten Funktionalitäten bzw. Teilaufgaben zu erfüllen. Darunter fallen bspw. der Maschinenbau, die Elektrotechnik oder die Informatik. Daraus resultiert eine steigende Komplexität der Produkte aber auch der Entwicklungsprozesse. Dem gegenüber steht eine immer grö-

ber werdende heterogene Systemlandschaft, da jede Domäne eigene IT-Systeme zur Unterstützung der jeweiligen Entwicklungstätigkeit verwendet. Dadurch wird die Komplexität des Entwicklungsprozesses zusätzlich erhöht.

Aus diesem Grund müssen Methoden und Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden, damit eine konsistente Datenbasis und effiziente Daten- und Informationsflüsse gewährleistet werden können. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Ansatz vorgestellt, der aufzeigt, wie eine konsistente Datenbasis bereitgestellt werden kann. Die Grundlage dieser Datenbasis stellt ein bereits existierendes Datenmodell nach dem Merkmal-Eigenschafts-Ansatz von Weber [1] dar. Dieses Datenmodell wurde als relationale Datenbankstruktur in einem PDM-System umgesetzt und ermöglicht es dadurch eine zentrale Datenbasis abzubilden. Mit der Verwendung einer parametrisierten CAD-Konstruktion wird aufgezeigt, wie diese Datenbasis mit Informationen befüllt werden kann.

Mit der Umsetzung des Datenmodells in einem PDM-System und der Befüllung mit Daten sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden.

- Wie kann der Merkmal-Eigenschafts-Ansatz zur Abbildung von Baugruppen in einem PDM-System verwendet werden?
- Kann das Datenmodell nach Weber automatisiert mit Daten aus parametrisierten CAD-Baugruppen-Dateien befüllt werden?

2 Forschungshintergrund

Eine kontinuierliche Absicherung der Produkteigenschaften muss während des gesamten Produktentwicklungsprozesses sichergestellt werden [4]. Mit Blick auf Zeit- und Kostendruck wird eine Absicherung der Produktfunktionalität vermehrt mittels Simulationen durchgeführt. Eine Vielzahl leistungsfähiger Werkzeuge ist heutzutage verfügbar, offen ist bislang jedoch die Frage, wann virtuelle Produktabsicherungen anzustoßen sind: die Sinnhaftigkeit bzw. Aussagequalität einer Simulation ist hierbei stets vom Prozessschritt und dem damit zusammenhängenden Bedarf an Daten sowie den zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Daten und Informationen abhängig [5]. In frühen Phasen sind oftmals grobe Konzeptbewertungen ausreichend, in späteren Phasen werden z.B. genaue Festigkeitsanalysen benötigt, die erst mit belastbaren Referenzwerten möglich sind. Grundsätzlich gilt: je höher die Eingangsdatenqualität und je genauer das Modell, desto sinnhafter und genauer ist das Simulationsergebnis. Ziel ist es daher, einen ganzheitlichen Ansatz zur Simulationsplanung zu erarbeiten, um Analyseschritte effizient anzustoßen und letztendlich Entwicklungszeiten zu verkürzen. Der Fokus liegt dabei auf Simulationen, die die Absicherung der Produkteigenschaften unterstützen.

3 Methodische Vorgehensweise

Der Ausgangspunkt eines Entwicklungsprojektes sind die Anforderungen, welche nach [1] als Eigenschaften verstanden werden können, die durch das technische System zu erfüllen sind. Der Produktentwicklungsprozess selbst zeigt zwei wechselseitige Schritte auf: Synthese und Analyse (Bild 1). Die Merkmale (Characteristics) sind das Ergebnis von Syntheseschritten und dienen für virtuelle Eigenschaftsabsicherungen (Analyseschritt) als Eingangswerte, in denen erreichte Eigenschaften (Properties) als Ergebnisse identifiziert werden.

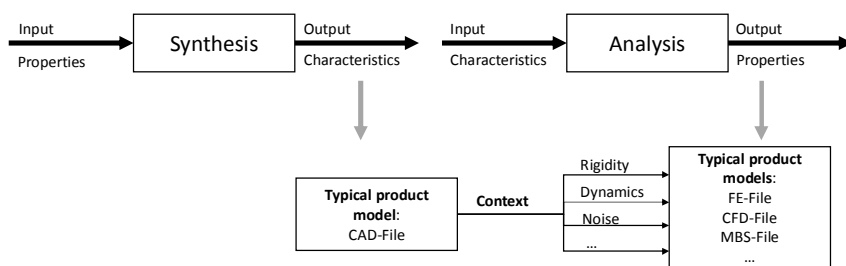


Bild 1: Datenfluss zwischen den Prozessschritten Synthese und Analyse

Die Produktentwickler müssen daher mit zwei unterschiedlichen Arten von Daten umgehen. Diese sind Merkmale und Eigenschaften. Nach [1] beschreiben Merkmale ein Produkt hinsichtlich Struktur, Form, Material und Beschaffenheit. Eigenschaften ergeben sich als die logische Konsequenz der vorher getroffenen Entscheidungen.

Auf Basis dieser Unterscheidung von Produktentwicklungsdaten wurde ein Ansatz zur Simulationsplanung entwickelt. Dabei muss zuerst der Zusammenhang zwischen den Merkmalen und Eigenschaften ermittelt werden. Dabei zeigt sich eine netzwerkartige Verbindung von Merkmalen und Eigenschaften (miteinander und untereinander). Diese Informationen können mithilfe von Matrizen dargestellt werden und dienen als Eingangsdaten für Simulationen.

Die Sinnhaftigkeit einer Simulation ist von der Verfügbarkeit und Qualität der benötigten Eingangsdaten und folglich vom Prozessschritt abhängig. Dies erfordert einen situationspezifischen Ansatz, um Entscheidungen abhängig vom Entwicklungskontext zu treffen. In der Literatur sind vielfältige Ansätze hinsichtlich einer Situationsbeschreibung verfügbar, allerdings gibt es keinen allgemeingültigen Ansatz zur Beschreibung einer Entwicklungssituation [6], der den Kontext für Analyseentscheidungen näher beschreibt. Im Rahmen

dieses Beitrags werden Entwicklungssituationen mittels definierter Kontextfaktoren beschrieben und mit den Merkmals-Eigenschafts-Matrizen verknüpft (Bild 2) [2].

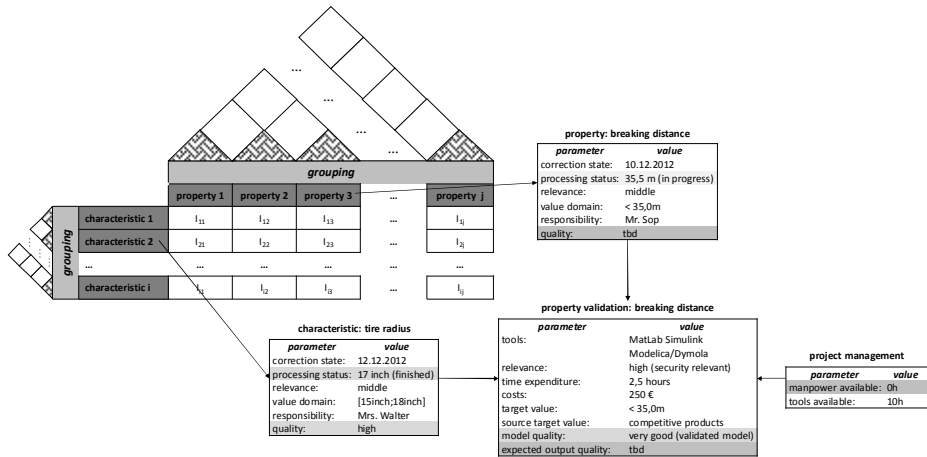


Bild 2: Verknüpfung von Kontextfaktoren und matrix-basierter Produktbeschreibung [2]

Diese Faktoren beschreiben eine Entwicklungssituation hinsichtlich der Ausführung von Simulationen und berücksichtigen wichtige Aspekte zur Entscheidungsfindung bezüglich der Durchführung einer virtuellen Eigenschaftsabsicherung. Die genannten Aspekte fließen in das Datenmodell ein und dienen als Grundlage für eine Vorgehensweise zur Simulationsplanung (Bild 3). Hierbei werden zwei essentielle Aspekte berücksichtigt: die Bewertung der Sinnhaftigkeit einer Simulation als erster Schritt zeigt auf, ob aufgrund der verfügbaren Datenbasis eine akzeptable Ergebnisqualität erreicht werden kann [5]. Neben der Qualitätsbewertung werden auch der Ressourcenbedarf und deren Verfügbarkeit beachtet. Nach Durchführung der Simulation werden die Daten im Datenmodell ergänzt. Neben den aktuell erreichten Ist-Eigenschaften können auch neu identifizierte Eigenschaften ergänzt werden. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen können modifizierte Beziehungsgewichte ermittelt oder, bei potentiellen Soll-Ist-Abweichungen, geeignete Stellschrauben identifiziert werden, um die ausgearbeitete Lösung zu verbessern.

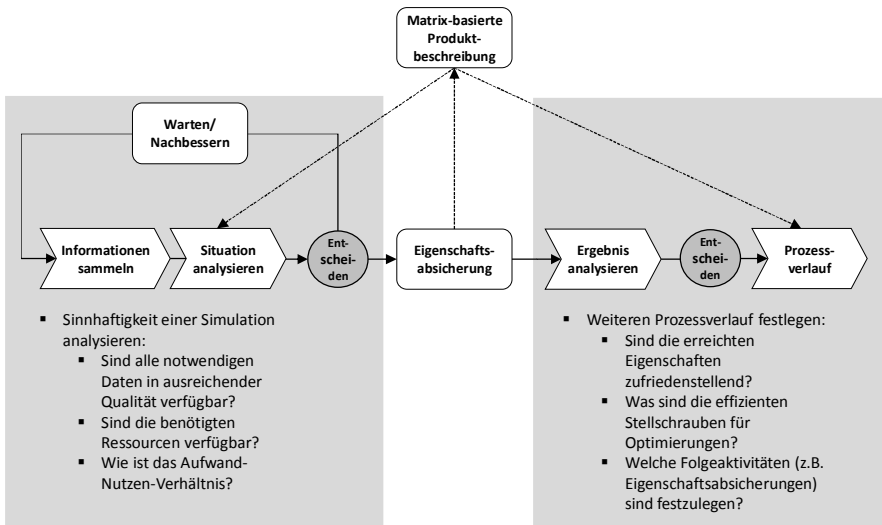


Bild 3: Vorgehensweise zur Simulationsplanung, in Anlehnung an [2]

Damit das beschriebene Datenmodell anwendbar ist, muss es in die bestehende Systemlandschaft integriert werden können. Eines der wesentlichen Elemente im Rahmen der Produktentwicklung stellen dabei PDM-Systeme dar. Diese Systeme dienen zur Verwaltung der Entwicklungsdaten. Da moderne PDM-Systeme eine Workflow-Funktionalität bereitstellen, unterstützen diese nicht nur die Datenbereitstellung, sondern auch die Entwicklungs- und Entscheidungsprozesse. Damit können Daten- und Informationsflüsse gesteuert und strukturiert werden. Der Fokus des vorliegenden Beitrags liegt in der Abbildung des aufgezeigten Datenmodells in einem PDM-System und dessen Befüllung durch Konstruktionsdaten.

4 Umsetzung des Datenmodells

Mit der Überführung des Datenmodells in eine Datenbankstruktur soll eine konkrete Implementierung aufgezeigt werden. Dazu erfolgt zunächst die Festlegung, welches Datenbanksystem angewendet werden soll. Dabei stehen verschiedene Systeme zur Verfügung. Diese sind u.a. relationale-, objektorientierte-, semantische oder Graphdatenbanken. Aufgrund der vorgegebenen Struktur des Datenmodells und da im industriellen Umfeld relationale Datenbanken den Standard darstellen, eignet sich dieses System sehr gut und wird im Folgenden verwendet. Eine relationale Datenbankstruktur besteht aus einzelnen Relationen, die als Tabellen verstanden werden können. Diese Ta-

bellen werden mit Attributen versehen, die einzelne Informationen speichern können. Diese Attribute können als Spalten einer Tabelle verstanden werden. Zusätzlich werden zwischen den einzelnen Relationen Beziehungen abgebildet. Diese Beziehungen bilden bspw. einen Zusammenhang zwischen Merkmalen und einer Eigenschaft ab. In den Relationen sind einzelne Datensätze abgelegt. Diese Datensätze (auch Tupel genannt) können als Zeilen der bereits erwähnten Tabellen verstanden werden.

Nach der Festlegung des Datenbanksystems wird im nächsten Schritt das Datenmodell (Bild 2) in eine relationale Datenbankstruktur überführt. Diese Datenbankstruktur soll dann in einem weiteren Schritt in einem PDM-System umgesetzt werden und dadurch die Abbildung von Merkmalen, Eigenschaften und Kontextfaktoren für Bauteile und Baugruppen im PDM-System ermöglichen. Die Datenbankstruktur wurde allgemeingültig gehalten, damit sie auch in anderen Systemen zum Einsatz kommen kann und nicht an ein einzelnes PDM-System gebunden ist.

Die Grundlage der Umsetzung bilden die Relationen „Property“ (Eigenschaft), „Characteristic“ (Merkmal) und „Part/Assembly“ (Bauteil/Baugruppe). Diese Relationen dienen zur Beschreibung eines einzelnen Bauteils unter der Verwendung von Merkmalen und Eigenschaften. Die Relation „Part/Assembly“ besteht dabei im Wesentlichen aus den Informationen „ID“, „Title“ und „CAD-File“. Mit Hilfe dieser Informationen kann ein Bauteil eindeutig identifiziert werden. Dabei dient die ID zur Identifikation mithilfe einer automatisch generierten Zahl und das Feld „Title“ zur Identifikation mithilfe eines Textes. Das Feld „CADFile“ kann den Verweis auf die zu Grunde liegende Konstruktionsdatei enthalten. Die Relationen „Property“ und „Characteristic“ beinhalten die Merkmale und Eigenschaften des jeweiligen Bauteils. Dabei kann es sich um manuell definierte Parameter handeln oder um Parameter, die direkt aus einer CAD-Datei übernommen wurden [3]. Mit diesen Relationen kann die Abbildung eines Bauteils mit seinen Merkmalen und Eigenschaften erfolgen. Allerdings fehlen noch die Darstellungen der Beziehungen zwischen den einzelnen Merkmalen und Eigenschaften eines Bauteils. Dazu werden die zusätzlichen Relationen „Property2Property“, „Characteristic2Property“ und „Characteristic2Characteristic“ benötigt. Hierin können die Zusammenhänge abgebildet werden. Mit diesen Relationen kann sichergestellt werden, dass ein Merkmal oder eine Eigenschaft einen Einfluss auf mehrere andere Merkmale oder Eigenschaften haben kann. Die Information, wie diese Verbindungen in einem konkreten Fall aussehen, kann anhand von technischen Zeichnungen, Simulationen oder aus anderen Systemen ermittelt werden. Damit können dann die Einträge in den Verbindungsrelationen erstellt werden.

Bis zu diesem Punkt können Bauteile und ihre Eigenschaften und Merkmale abgebildet werden. Allerdings fehlt noch eine Möglichkeit, um Baugruppen abbilden zu können. Damit sie in die Datenstruktur eingefügt werden können, wird noch eine weitere Relation benötigt. Sie wird durch die Tabelle „Interface“ dargestellt und dient zur Definition, welche Bauteile miteinander in einer Beziehung stehen (Bild 4). Diese Relation erlaubt nur eine grundsätzliche Definition, ob eine Beziehung besteht oder nicht. Wie die Beziehung (Schnittstelle) konkret definiert ist, wird über die zuvor bereits definierten Relationen („Property2Property“, „Characteristic2Property“ und „Characteristic2Characteristic“) abgebildet. Zur Unterscheidung, ob bspw. eine Merkmals-Eigenschafts-Beziehung eine Schnittstelle betrifft, wird in dieser Relation die betroffene Schnittstelle eingetragen.

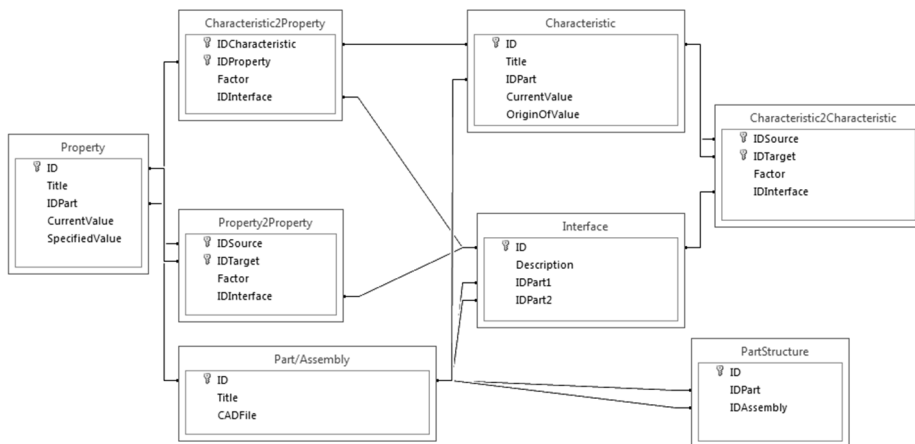


Bild 4: Erstellte Datenbankstruktur

Mit diesen Relationen ist die einfache Abbildung des Datenmodells in einer relationalen Datenbankstruktur abgeschlossen. Im Folgenden wird die Umsetzung der Datenstruktur in einem PDM-System vorgestellt. Zusätzlich wird aufgezeigt, wie die Struktur mit Hilfe von parametrisierten CAD-Dateien befüllt werden kann.

5 Prototypische Implementierung in einem PDM-System

Als Systembasis wird im Rahmen einer Industriekooperation die PDM/PLM-Plattform CIM DATABASE der Firma Contact® eingesetzt. Sie unterstützt sowohl das Produktdatenmanagement (PDM) als auch das Product Lifecycle Management (PLM). Aufgrund der flexiblen und offenen Struktur

kann sie an spezifische Bedürfnisse mittels Konfiguration angepasst werden. Zudem basiert das System auf der Programmiersprache Python, so dass es frei manipulierbar ist und folglich um zusätzliche Funktionalitäten erweitert werden kann [7].

Der erste Schritt der Implementierung besteht in der Einbindung des entworfenen Datenmodells in das PDM-System. Dabei werden die einzelnen Tabellen und deren Beziehungen untereinander angelegt. Die Datenbankstruktur wird dabei um Standardfunktionalitäten erweitert, die durch das PDM-System bereitgestellt werden. Dazu zählt beispielsweise die Protokollierung von Änderungen (mit Änderungsdatum und Bearbeiter), aber auch das Hinzufügen von verantwortlichen Personen. Neben der Erstellung der Datenbankstruktur erfolgt in diesem Schritt auch die Einbindung der neuen Struktur in der Oberfläche des PDM-Systems. Dazu werden Masken generiert, die es einem Anwender ermöglichen, neue Daten zu erstellen oder bestehende Daten anzuzeigen und zu ändern. Über die Historienfunktionalitäten kann dabei bereits kontrolliert werden, ob eine Änderung vorliegt, die noch freigegeben werden muss. Diese Statusinformationen werden in der Oberfläche (Bild 5) über eine farbliche Markierung (rot, gelb oder grün) dargestellt.

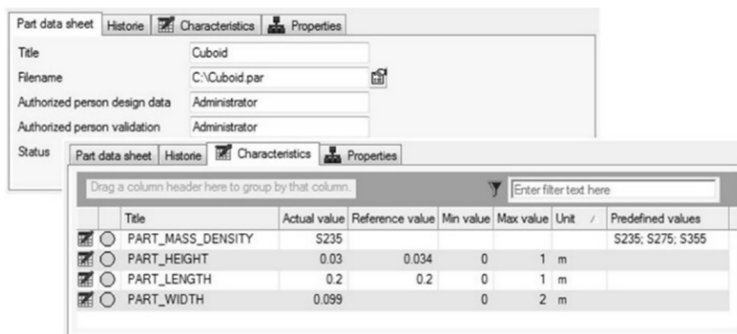


Bild 5: Oberfläche im PDM-System [3]

Aufgrund der komplexen Datenstruktur von einer Baugruppe, Bauteilen, Merkmalen, Eigenschaften und deren Beziehungen ist eine manuelle Datenpflege nicht sinnvoll. Daher muss eine Möglichkeit gefunden werden, damit diese Daten möglichst automatisch in das PDM-System übernommen werden können. Das Vorgehen dieser automatisierten Datenübernahme ist im folgenden Bild 6 dargestellt.

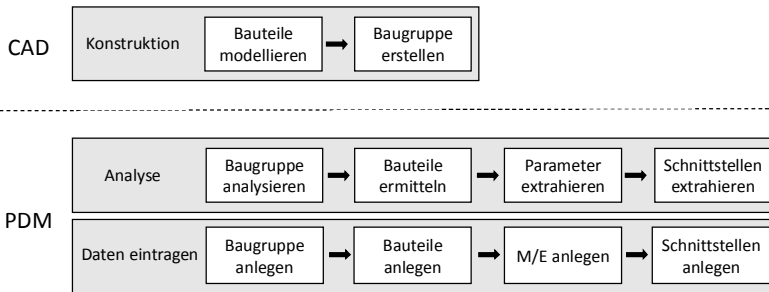


Bild 6: Automatisierte Datenübernahme

Den Ausgangspunkt der Datenübernahme bilden parametrisierte CAD-Konstruktionsdateien. Diese bestehen aus einer Assembly-Datei und mehreren Part-Dateien. In einem ersten Übernahmeschritt wird die Assembly-Datei analysiert und die verwendeten Part-Dateien ermittelt. Anhand dieser Informationen können bereits die Inhalte für die Tabelle Part/Assembly angelegt werden.

In einem weiteren Schritt werden die einzelnen Part-Dateien analysiert und die verwendeten Parameter der einzelnen Bauteile extrahiert. Diese Parameter werden dann entweder als Merkmal oder als Eigenschaft des jeweiligen Bauteils übernommen. Zur Unterscheidung, ob es sich um ein Merkmal oder eine Eigenschaft handelt, wird die Einheit des Parameters sowie eine evtl. vorhandene Formel zur Berechnung des Parameters berücksichtigt [3].

In einem letzten Übernahmeschritt wird nochmals die Assembly-Datei analysiert. Dabei werden die Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilen betrachtet. Zu jeder Verbindung kann dabei ermittelt werden, welche Bauteile betroffen sind. Diese Verbindungen werden in der Datenstruktur in der Tabelle Interface übernommen und bilden die Schnittstellen zwischen Bauteilen ab. Anhand dieser Informationen kann eine Matrix erstellt werden, die die einzelnen Verbindungen zwischen Bauteilen wiedergibt. Ein Beispiel dieser Übernahme ist in Bild 7 dargestellt. Es zeigt, wie die Schnittstellen einer Baugruppe in das PDM-System übernommen werden können. Zusätzlich wird aufgezeigt, wie die Verknüpfung einer Schnittstelle mit zugrunde liegenden Merkmalen aussieht. Allerdings ist dieser zweite Schritt derzeit noch eine manuelle Tätigkeit. Eine noch offene Fragestellung ist, wie die Merkmale erkannt werden können, die für eine spezielle Schnittstelle relevant sind.

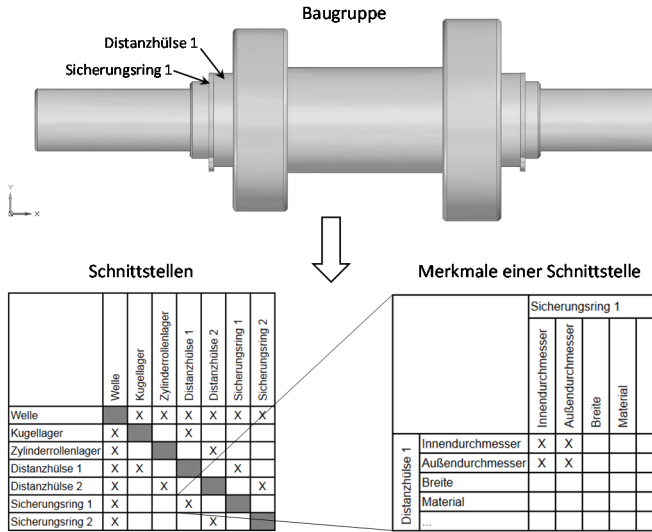


Bild 7: Ergebnis der Datenübernahme

Mithilfe der gespeicherten Verknüpfung zur CAD-Datei können die übernommenen Daten jederzeit aktualisiert, sowie die bestehenden Daten erweitert werden. Aufgrund der Erfahrungen aus der Praxis, dass der visuellen Aufbereitung eine hohe Bedeutung zugemessen wird, wurde u.a. mit farblichen Markierungen (Ampelskala) gearbeitet, um einen Bauteilstatus zu visualisieren, welcher an die Freigabe von CAD-Geometrien, der Zuweisung eines Materials, einer Qualitätsbewertung spezifischer Merkmale ([5]), etc. geknüpft ist.

Neben der Verknüpfung von Merkmalen zur Beschreibung einer Schnittstelle existieren allerdings auch Verknüpfungen von Eigenschaften. Diese Verknüpfungen sind in der Datenstruktur bereits vorgesehen und umgesetzt, allerdings fehlt noch eine Einbindung im Rahmen der Übernahme. Im Bereich der Eigenschaften muss komplexer unterschieden werden, wie Eigenschaften verknüpft werden können. In einem einfachen Fall können die Eigenschaften addiert werden. Das ist bspw. bei der Masse der Fall. Um die Eigenschaft „Masse“ einer Baugruppe zu bestimmen, können die „Massen“ der einzelnen Bauteile addiert werden. Soll allerdings die Eigenschaft „Steifigkeit“ einer Baugruppe bestimmt werden, müssen ein FEM-Modell erstellt und eine Berechnung durchgeführt werden. Die Analyse der möglichen Verbindungen und eine Einbindung in eine Simulationsplanung sind derzeit in Arbeit. Im Rahmen dieser Tätigkeiten wird auch an einem Workflow gearbeitet, der die Simulati-

onsplanung unterstützen wird. Zusätzlich wird an Kontextfaktoren gearbeitet, die die Schnittstellen beschreiben und eine bessere automatisierte Datenverarbeitung erlauben sollen.

6 Diskussion

Mit Hilfe der Überführung des Datenmodells des C-P-Ansatzes in eine relationale Datenbankstruktur konnte die Abbildung von Baugruppen und Bauteilen in einem PDM-System gezeigt werden. Zusätzlich können die Merkmale und Eigenschaften der Bauteile in dieser Datenstruktur abgelegt werden. Mit der Einbindung von CAD-Assembly-Dateien konnte gezeigt werden, wie diese Struktur automatisiert mit Daten befüllt werden kann. Zusätzlich können aus diesen Dateien Informationen zu den Schnittstellen in einer Baugruppe ermittelt und ebenfalls in der Struktur abgelegt werden.

Mit Hilfe der erkannten Schnittstellen kann, anhand der Merkmale und Eigenschaften der betroffenen Bauteile, eine genauere Definition der Schnittstellen erfolgen. Offen ist hier allerdings noch eine automatisierte Zuweisung der Merkmale und Eigenschaften zu den jeweiligen Schnittstellen. Da derzeit noch keine Möglichkeit besteht, Kontextinformationen in der CAD-Datei zu erfassen, müssen diese Zuweisungen noch manuell durchgeführt werden. Ebenfalls offen ist die Kombination der Merkmale und Eigenschaften der einzelnen Bauteile zu Eigenschaften, die die gesamte Baugruppe betreffen. Hier wird derzeit eine Systematik entworfen, wie diese Kombinationen strukturiert werden können. Das Ziel dabei ist ein möglichst hoher Grad der Automatisierung, um zu erkennen, welche Baugruppeneigenschaften im Rahmen einer Simulation abgesichert werden müssen.

Eine Einschränkung besteht derzeit in der ausschließlichen Betrachtung der Baugruppen bzw. Bauteile als Datenquelle. An dieser Stelle ist auch eine Rückführung von Informationen aus dem PDM-System in die CAD-Konstruktionsdateien denkbar. Damit könnten Rahmenbedingungen, die sich aufgrund von Simulationen ergeben, direkt in die Konstruktion einfließen und den Konstruktionsprozess unterstützen.

7 Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die grundlegenden Elemente des CPM-Ansatzes in einem PDM-System implementiert. Mit Hilfe dieser Umsetzung können Baugruppen und Bauteile mit ihren Merkmalen und Eigenschaften in einem PDM-System abgelegt werden. Mit Hilfe einer automatisierten Datenübernahme wurde aufgezeigt, wie diese Strukturen mit Hilfe von CAD-Dateien befüllt

werden können. Zusätzlich wurden Schnittstellen zwischen einzelnen Bauteilen erkannt und diese ebenfalls in das PDM-System übernommen. Derzeit wird daran gearbeitet, wie die Zuweisung von Merkmalen und Eigenschaften zu Schnittstellen erfolgen kann. Zusätzlich wird über Möglichkeiten nachgedacht, um neue Informationen aus dem PDM-System in die CAD-Konstruktionen zu integrieren.

Literatur

- [1] Weber, C., "CPM/PDD - An extended theoretical approach to modelling products and product development processes", Proceedings of the German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes, Bley, H., Jansen, H., Krause, F.-L., Shpitalni, M. (Eds.), Fraunhofer Stuttgart, 2005.
- [2] Reitmeier, J., Paetzold, K. "Process-integrated analysis of the development situation for an efficient simulation planning", Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design – ICED 2013, Lindemann, U., Venkataraman, S., Kim, Y.S., Ion, W., Malqvist, Y., (Eds.), Seoul, 2013a.
- [3] Köbler, J.; Reitmeier, J.; Paetzold, K. "Umsetzung einer eigenschaftsbasierten Simulationsplanung in einem PDM-System", Konferenz „Entwerfen Entwickeln Erleben“, eee2014, Dresden, 2014.
- [4] Paetzold, K.; Reitmeier, J. "Approaches for process attendant property validation of products", 1st International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP 2010, Cambridge 2010
- [5] Reitmeier, J., Paetzold, K. "Evaluation of data quality in the context of continuous product validation throughout the development process", Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design 2011 (ICED´11). 15.-18. August 2011, Kopenhagen, Denmark, Vol. 9, 2011, pp. 143-152.
- [6] Roelofsen, J. „Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen“, Dissertation, München: Dr. Hut Verlag, 2011
- [7] N.N. "CIM DATABASE Release 10 What's new booklet", user manual, Contact Software GmbH, 2013

Vorgehensweise zur Gestaltung robuster Produktionssysteme am Beispiel der Automobilindustrie

Florian Schöttl, Daniel März, Udo Lindemann
*Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München*

Abstract

Volatile influences from global markets force companies to be more flexible, sustainable and efficient. The product portfolio grows while sales per product variant decrease and product lifecycles get shorter. That means frequent changes in the production processes and resources, which cause high investments and rapid growth in system complexity. Hence, robust production systems are needed, which are well prepared to operate in a volatile environment. Designing robust production systems often fails because of the deficient basis of decision-making about flexibility or standardization strategies. We present a method to design robust production systems, using demand-oriented flexibilities. Particular emphasis is on the ability to directly integrate the method in a production planner's daily work.

Keywords: Robustness, Changes, Flexibility, Production System

1 Einleitung

Im Zeitalter des globalen Wettbewerbs müssen sich produzierende Unternehmen stärker an Kundenwünschen orientieren, um sich nachhaltig am Markt behaupten zu können. Aus der Verkürzung der Produktlebenszyklen

und einer Diversifizierung des Produktangebots resultiert ein erhöhter Änderungsaufwand [1]. Dieser Änderungsaufwand wirkt sich besonders in den Gewerken der Produktion aus [2]. Um die dort entstehenden hohen Investitionskosten und starken Komplexitätsanstiege beschränken zu können, sind robuste Systeme notwendig, die optimal auf das volatile Umfeld des globalen Marktes angepasst sind [3].

In der Praxis scheidet die Gestaltung robuster Produktionssysteme zu meist an der ungenügenden Entscheidungsgrundlage für Flexibilisierungs- oder Standardisierungsmaßnahmen und der mangelnden Operationalisierung theoretischer Gestaltungsprinzipien. In Kapitel 3 wird diese Problemstellung mit Hilfe wissenschaftlicher Grundlagen zum Umgang mit Änderungen im Umfeld der Produktion und Flexibilität als veränderungsbefähigende Eigenschaft in Produktionssystemen näher begründet. Darauf aufbauend wird die Methode zur Planung veränderungsrobuster Produktionssysteme (Kapitel 4) vorgestellt. Die Anwendung der Methode wird am Beispiel der Automobilproduktion in Kapitel 5 beschrieben und in einer Fallstudie aus der Aggregatmontage validiert (Kapitel 6).

2 Forschungsmethodik

Zur wissenschaftlichen Aufarbeitung der beschriebenen Problemstellung und Entwicklung eines Lösungsansatzes wurde folgendes Vorgehen angewandt. Zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs wurde eine Literaturrecherche in den Feldern des Änderungsmanagements und der Produktionsgestaltung/Fabrikplanung durchgeführt. Die Entwicklung der Methode gestaltete sich als iterativer Prozess mit regelmäßigem Industriekontakt. In Workshops und Interviews mit Produktionsplanern aus der Automobilindustrie wurden Entwicklungsstände diskutiert und mit realen Änderungsdaten plausibilisiert. Die Validierung der Methode selbst und deren Ergebnisse erfolgte abschließend an Hand einer Fallstudie.

3 Umgang mit Änderungen am Beispiel der Automobilproduktion

Ein effizienter Umgang mit Änderungen erfordert deren eindeutige Beschreibung, sowie die Kenntnis über änderungsbefähigende Eigenschaften. Eine disziplinübergreifende Literaturrecherche zur Darstellung und Beschreibung von Änderungen in Systemen konnte aufzeigen, dass Änderungen durch 3 allgemeine Aspekte umfänglich beschrieben werden können. Tabelle 1 stellt den Kern des Rechercheergebnisses einschließlich der zugehörigen Literatur dar.

Tabelle 1: Übersicht charakterisierender Aspekte von Änderungen

	[4]	[5]	[6]*, [7]**	[8]
Änderungs-ursachen	<ul style="list-style-type: none"> • Cause of change • Source of change 	Change agent	Change driver*	Ursache von Änderungen
Änderungs-auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Consequences of change • Effect of change 	<ul style="list-style-type: none"> • Change mechanism • Change effect 	Change profile**	<ul style="list-style-type: none"> • Auswirkungen von Änderungen • Nutzen von Änderungen
Änderungs-gegenstand		Change object		

Deutlich zeigt sich, dass unterschiedliche Begrifflichkeiten existiert, die alle auf drei Änderungsaspekte - Ursache, Auswirkung und Gegenstand - zurückzuführen sind.

Um Änderungen zu ermöglichen sind änderungsbefähigende Eigenschaften nötig. Ein solcher Befähiger ist Flexibilität, der in diesem Beitrag hauptsächlich betrachtet wird. [9], [10], [11] und [12] definieren Flexibilität übereinstimmend als Systemeigenschaft, die es ermöglicht Änderungen am System oder an seinen Teilen vorzunehmen ohne dabei Änderungsaufwand zu verursachen. [11] konkretisiert dies und beschreibt Flexibilität als einen vorgedachten Korridor innerhalb dem Änderungen ohne Änderungsauswirkungen (zusätzliche Kosten oder Zeit) vorgenommen werden können. Für den Rahmen dieses Beitrags wurde in Bezug auf die genannten Quellen folgende Definition gefasst.

Flexibilität ist eine initial geplante und somit vorgedachte Eigenschaft eines Systems, veränderte Anforderungen ohne strukturelle Änderungen umsetzen zu können. Je höher die strukturellen Änderungsaufwände zur Umsetzung der veränderten Anforderungen sind, desto höher ist das **Flexibilitätsdefizit**.

Um Defizite bestehender Ansätzen zum Umgang mit Änderungen im Umfeld der Produktion konkretisieren und den entwickelten Ansatz abgrenzen zu können, werden allgemein bekannte Strategien zum pro-aktiven Umgang mit Änderungen und bekannte Gestaltungsansätze für Produktionssysteme gegenübergestellt (Tabelle 2). Nach [13] bietet [14] einen umfassenden Überblick über allgemeine Prinzipien zum pro-aktiven Umgang mit Änderungen.

[14] nennt fünf Strategien, die in den Zeilen dargestellt sind. In den Spalten finden sich die 5 gängigsten Gestaltungsansätze für Produktionssysteme.

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Strategien zum Umgang mit Änderungen und Gestaltungsansätzen im Umfeld der Produktion

	DMS Dedicated Man. Sys.	FMS Flexible Man. Sys	RMS Reconfigurable Man. Sys.	RAS Reconfig. Assem. Sys.	FFMS Focused Flex. Man. Sys.
Vermeidung		✓			✓
Vorverlagerung & Früherkennung		✓			✓
Effektive Auswahl					
Effiziente Implementierung			✓	✓	✓
Kontinuierliches Lernen					

Es wird deutlich, dass die Gestaltungsansätze gezielt einzelne Strategien zum pro-aktiven Umgang mit Änderungen verfolgen, wobei zwei wesentliche Richtungen erkennbar sind. Gestaltungsansätze, wie beispielsweise „Flexible Manufacturing Systems“ (FMS) zielen auf eine initiale Gestaltung der Flexibilitätskorridore ab. Diese werden großzügig gestaltet um zukünftige, unvorhersehbare Anforderungsänderungen auffangen zu können. „Reconfigurable Manufacturing Systems“ (RMS) hingegen bieten die Fähigkeit zur bedarfsgerechten Nachrüstung von Flexibilität, sobald der entsprechende Bedarf entsteht.

Für einen erfolgreichen Umgang mit Änderungen ist es aus Sicht des Änderungsmanagements notwendig, alle 5 Strategien anzuwenden. Damit ergibt sich der Bedarf zur Entwicklung eines Gestaltungsansatzes, der dies leistet und zusätzlich Änderungsursachen, Änderungsauswirkungen, den Änderungsgegenstand und deren Zusammenhänge miteinbezieht.

4 Methode zur Planung veränderungsrobuster Produktionssysteme

Flexible Produktionssysteme können veränderte Anforderungen ohne strukturelle Änderungen umsetzen. Die Gestaltung von Flexibilität ermöglicht daher ein änderungsrobustes Verhalten des jeweiligen Produktionssystems.

Da ungenutzte Flexibilitätskorridore die Produktivität von Produktionssystem herabsetzen, ist eine bedarfsgerechte Gestaltung der notwendigen Flexibilitätskorridore nötig [15]. Änderungen sind dort notwendig, wo die vorgehaltenen Flexibilitäten nicht ausreichend dimensioniert waren [10]. Folglich können auftretende Flexibilitätsdefizite durch die Notwendigkeit zu Änderungen identifiziert und beschrieben werden. Änderungen sind in Produktionssystemen meist gut dokumentiert, sodass eine ausreichende Datenbasis gegeben ist. Die entwickelte Methode nutzt vorhandene Informationen über geschehene strukturelle Änderungen um Flexibilitätsdefizite beschreiben und bewerten zu können. Die somit gewonnenen Informationen über Art und Ausmaß der existierenden Flexibilitätsdefizite im System ermöglichen die Formulierung von Handlungsempfehlungen zur zielgerichteten Flexibilisierung des Produktionssystems.

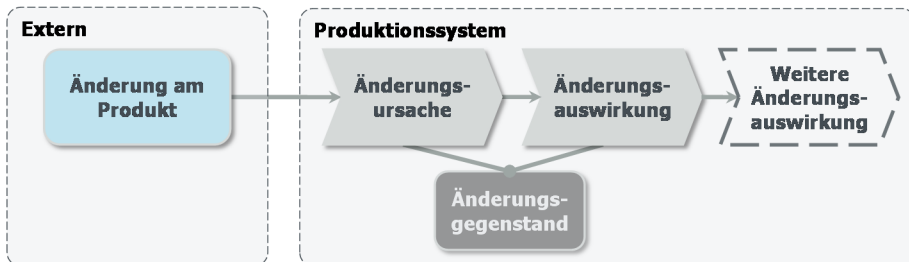


Bild 1: Wirkmodell von Änderungen

Bild 1 zeigt schematisch das verwendete Wirkmodell von Änderungen aus systemtheoretischer Sicht. Externe Änderungen (bspw. am zu produzierenden Produkt) verursachen Änderungen im Produktionssystem. Gemäß des Ergebnisses der Literaturrecherche werden Änderungen durch die drei genannten Änderungsaspekte dargestellt. Änderungen können weitere Änderungen verursachen, die in gleicher Weise beschrieben werden, wobei die Änderungsursache der Folgeänderung die Änderungsauswirkung der Vorgängeränderung ist. Die Änderungsaspekte Ursache und Auswirkung können jeweils einem Änderungsgegenstand zugeordnet werden. Änderungsgegenstand kann jedes Element des Produktionssystems sein (z.B. techn. Ressource, Prozess, etc.).



Bild 2: Grundschrte der Methode

Bild 2 stellt die grundsätzliche Vorgehensweise des entwickelten Gestaltungsansatzes dar. Zunächst werden die Änderungsketten entsprechend des Wirkmodells aufgenommen. Anschließend werden die aufgenommenen Änderungen charakterisiert. Aus den Änderungsinformationen werden Art und Ausmaß der jeweiligen Flexibilitätsdefizite ermittelt und in weiterer Folge Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Die Beschreibung der Änderungsursache charakterisiert den limitierenden Faktor des Produktionssystems (sprich das Flexibilitätsdefizit) der eine aufwandslose Umsetzung einer gegebenen externen Anforderung verhindert. Die Beschreibung der Änderungsauswirkung ermöglicht eine Quantifizierung des Ausmaßes des Flexibilitätsdefizits. Je aufwendiger eine Änderung ist, desto geringer ist die Flexibilität des Systems bezüglich der verursachenden Anforderung an das Produktionssystem [10]. Zur Charakterisierung des Ausmaßes sind die Änderungsauswirkungen der identifizierten Änderungen mittels folgender Merkmale qualitativ zu bewerten:

- **Eintrittshäufigkeit:**
Es wird die zeitliche Häufung einer gegebenen Änderung im betrachteten Zeitintervall bewertet.
- **Änderungsaufwand:**
Es wird der Aufwand bewertet, der notwendig war, eine betrachtete Änderung umzusetzen. Als Bewertungsgröße bieten sich die entstandenen Kosten als gut dokumentierte Größe an.
- **Änderungsreichweite:**
Es wird die Fortpflanzungswirkung einer Änderung innerhalb des Produktionssystems bewertet. Je länger eine Änderungskette ist, desto höher ist ihr Gesamtaufwand. Je verzweigter eine Änderungskette und je später die Verzweigungen stattfinden, desto komplexer und aufwendiger ist eine Änderungskette.
- **Flexibilitätsgrad:**
Es wird der Änderungsaufwand relativ zum Umfang des (Teil-) Systems bewertet. Als maximaler Änderungswand ist eine Neukonstruktion eines (Teil-) Systems zu bewerten, wobei der betrachtete Änderungsgegenstand dann ein Flexibilitätsgrad von Null aufweisen würde. Ist lediglich eine Anpassung des Systems zur Umsetzung derselben Anforderung nötig, so kann von einem höheren Flexibilitätsgrad ausgegangen werden.

Bei der Auswahl von qualitativen Bewertungsgrößen wurde sichergestellt, dass alle notwendigen Informationen in der Produktionsplanung verfügbar und mit vertretbarem Aufwand zu erheben sind.

5 Anwendung der Methode zur Planung veränderungsrobuster Produktionssysteme

Die Methode wurde für einen Einsatz in der industriellen Praxis entwickelt. Auf Basis von in der Praxis verfügbaren Informationen wurden vier Schritte definiert, die mit vertretbarem Zeitaufwand die Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine bedarfsgerechte Flexibilisierung von Produktionssystemen erlauben.

Schritt 1 definiert den Betrachtungsrahmen. Das zu analysierende (Teil-) System wird abgegrenzt und Schnittstellen zur Systemumwelt beschrieben. Dabei werden die für die Analyse zu betrachteten externen Einflussfaktoren bestimmt und den Schnittstellen zugeordnet (siehe Bild 1). Die Betrachtung beschränkt sich auf externe Änderungen, welche die zu untersuchenden Änderungen im Produktionssystem verursachen.

Schritt 2 dient der Aufnahme der Änderungsinformationen entlang der Änderungskette. Der Zeitpunkt der Informationsaufnahme ist zu prüfen, da nur die Aufnahme von vollständig abgeschlossenen Änderungen sinnvoll ist. Zudem sind geeignete Quellen für die Informationsaufnahme zu bestimmen, da korrekte, aktuelle, vollständige und zum Zeitpunkt der Aufnahme verfügbare Informationen notwendig sind. Als geeignete Quellen sind u.a. Datenbanken zur Verwaltung von Produktionsprozessen, Dokumente über die Bestellung von Betriebsmitteln aber auch Daten aus dem produktseitigen Änderungsmanagement anzusehen.

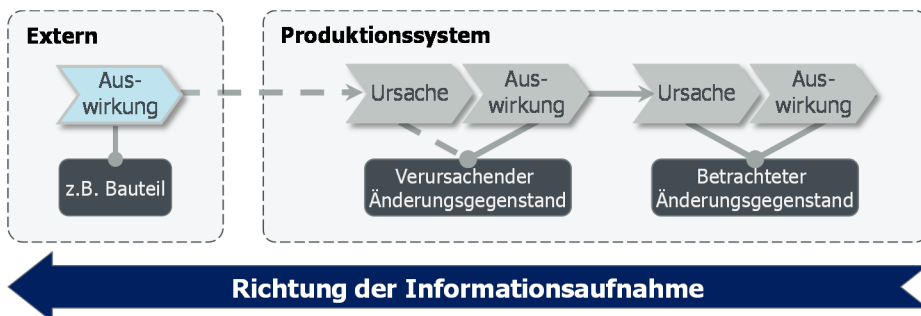


Bild 3: Vorgehensweise bei der Informationsaufnahme

Zur Informationsaufnahme empfiehlt sich ein Vorgehen entgegengesetzt zur Wirkrichtung von Änderungen, da die Änderungsauswirkungen als Endglied der Änderungsbetrachtung gemäß dem Wirkmodell direkt sichtbar und somit leicht ermittelbar sind. Bild 3 veranschaulicht das Vorgehen. Alle Elemente der dargestellten Änderungskette sind aus den genannten Informationsquellen aufzunehmen und in ein einheitliches Formblatt zu dokumentieren.

Schritt 3 umfasst die Analyse der aufgenommenen Informationsbasis. Die aufgenommenen Änderungen werden mittels der in Kapitel 4 definierten Bewertungskriterien charakterisiert um das Ausmaß der Änderungen und somit der zugehörigen Flexibilitätsdefizite zu bewerten. Um die Vergleichbarkeit der Daten und die Aussagekraft des Ergebnisses sicherzustellen, sind qualitative Bewertungsstufen zu den in Kapitel 4 definierten Bewertungsgrößen festzulegen. Die konkrete Abstufung der Skalen ist vom jeweiligen Betrachtungsrahmen abhängig und im Vorfeld der Analyse zu definieren. In Bild 4 sind Bewertungsstufen dargestellt, die sich im Kontext dieser Forschungsarbeit in der Automobilindustrie als praktikabel erwiesen haben. Mittels der aufgenommenen Informationen zur Änderungsursache ist der limitierende Faktor des jeweiligen Änderungsgegenstands zu ermitteln, welcher die Art des Flexibilitätsdefizits spezifiziert. Alle Analyseergebnisse werden zur weiteren Auswertung in einem Formblatt dokumentiert.

In **Schritt 4** wird die ermittelte Datenbasis ausgewertet. Jede Änderung wird durch eine Änderungsklasse beschrieben, die sich aus den 4 Bewertungsgrößen zusammensetzt, um eine einfache Auswertung zu ermöglichen.

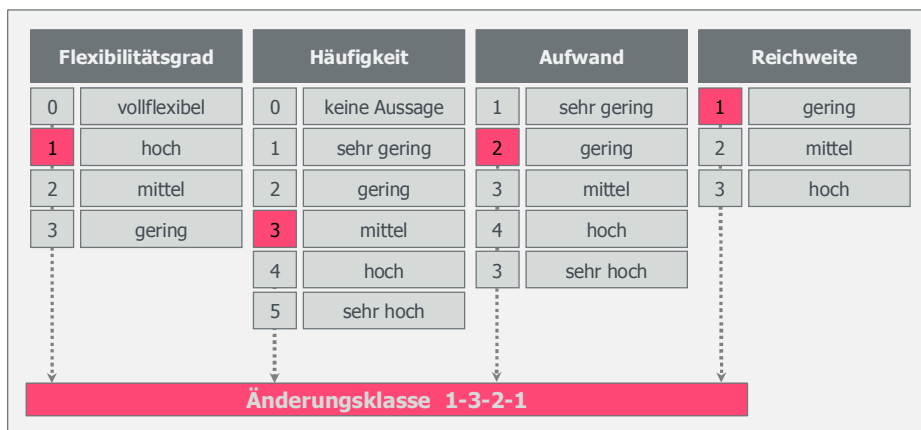


Bild 4: Exemplarische Einordnung einer Änderung in eine Änderungsklasse

Die Zuweisung zu Änderungsklassen erfolgt an Hand der einzelnen Bewertungsstufen. Bild 4 zeigt exemplarisch die Einordnung einer Änderung in eine Änderungsklasse. Anschließend lassen sich die Änderungen in einem Portfolio mit den Dimensionen „Änderungsklasse“ und „Aufretenshäufigkeit der Änderungsklassen“ visualisieren (vgl. Bild 5). Diese Darstellung bietet eine Grundlage zur Priorisierung des Handlungsbedarfs und zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für das Produktionssystem. Grundsätzlich ist der Handlungsbedarf umso größer, je kritischer die Änderungen bewertet worden sind. Auf Basis des identifizierten Handlungsbedarfs können technische Gestaltungsempfehlungen für Betriebsmittel/Anlagen oder Prozesse der Produktion entwickelt werden, die nicht mehr Gegenstand dieses Beitrags sind.

6 Fallstudie in der automobilen Motorenmontage

In der durchgeführten Fallstudie wurde ein repräsentativer Teil einer Produktionslinie für die Endmontage in der automobilen Aggregateproduktion untersucht. In der hybriden Montagelinie traten strukturelle Änderungen sowohl an automatisierten Vorrichtungen wie auch an manuellen Arbeitsplätzen auf, deren Berücksichtigung die breite Einsetzbarkeit der Methode belegt. Manuelle Arbeitsplätze und Anlagen werden im Weiteren unter dem Überbegriff „Ressourcen“ zusammengefasst. Von den eingangs genannten fünf Prinzipien zum pro-aktiven Umgang mit Änderungen konnten vier Prinzipien berücksichtigt werden. Das Prinzip der Effizienten Implementierung wurde auf Grund der hohen benötigten Informationsmenge auf Detailebene in dieser Studie nicht angewandt, da die Anwendbarkeit mit vertretbarem Aufwand im Vordergrund stand.

6.1 Ergebnisse

Nachfolgend abgebildet sind die Änderungsschwerpunkte über die Änderungsklassen je Flexibilitätsart (Bild 5). Das überblendete Portfolio mit vier Bereichen, dient zur Ableitung von Handlungsempfehlungen, wobei der Handlungsbedarf von A bis D ansteigt. Die Änderungen wurden gemäß der vorgestellten Einordnungssystematik (vgl. Schritt 4) den Änderungsklassen zugeordnet. Die aufgetretenen Änderungsklassen sind auf der Abszisse aufgetragen. An der Ordinate ist die Auftretenshäufigkeit der jeweiligen Änderungsklasse dargestellt. Die farbliche Markierung der Säulen stellt die Zuordnung zu den Flexibilitätsarten dar. Im Fallbeispiel traten Defizite der Aufgabenflexibilität von Ressourcen, der Parameterflexibilität von Anlagen und der Geometrieflexibilität von Anlagen auf. Deutlich zu erkennen ist eine Dominanz von Geometrieflexibilitätsdefiziten mit mittlerer Eintrittshäufigkeit (3-4), sehr geringem Änderungsaufwand (1-2) und geringer Reichweite (1). Auf Grund des

häufigen Auftretens sind diese Änderungsfälle dringend zu prüfen, ob eine Flexibilisierung möglich ist und im Hinblick auf den anfallenden Aufwand lohnenswert erscheint.

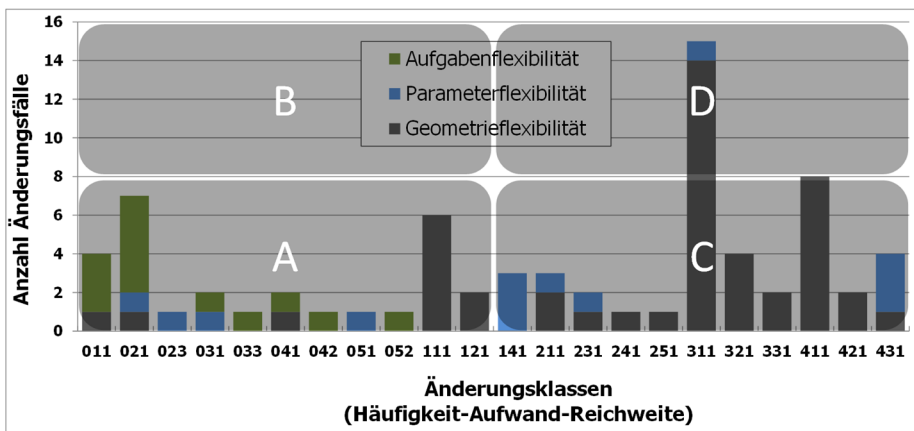


Bild 5: Analyseergebnis der Präsenz von relevanten Änderungsklassen

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Die Analyse des betrachteten Produktionssystems zeigte nahezu keine Änderungen mit hohem Aufwand und hoher Eintrittshäufigkeit. Folglich wurden aufwendige Änderungen nach einmaligem Auftreten ausreichend flexibilisiert. Es fand sich jedoch eine große Zahl Änderungen mit geringem bis mittleren Aufwands und hoher Eintrittshäufigkeit. Hier besteht ein bisher noch unerkanntes Potenzial zur Optimierung des Produktionssystems. Eine bedarfsgerechte Flexibilisierung würde in diesen Fällen nachhaltig die Effizienz des Systems steigern.

7 Kritische Diskussion

Es konnte eine praktikable Systematik zur bedarfsgerechten Flexibilisierung von Produktionssystemen entwickelt werden. Die Durchführung der Vorgehensweise ist aufwandsarm und somit geeignet für den alltäglichen Gebrauch in der Produktionsplanung. Die Nutzung des Zusammenhangs von strukturellen Änderungen und Flexibilitätsdefiziten eignet sich gut für die Gestaltung der veränderungsrobusten Produktionsarchitekturen, da Änderungen eine gut dokumentierte Größe in vielen Unternehmen ist. Die beschriebene Methode verwendet derzeit nur Informationen über vergangene Änderungen.

Nicht vorhersehbare Anforderungen können daher bei der Gestaltung der Flexibilitäten bislang nicht berücksichtigt werden.

Die strukturierte Analyse von Änderungen am Produktionssystem konnte gezielt Bereiche aufdecken die hinsichtlich der Kriterien Ausmaß und Häufigkeit der Flexibilitätsdefizite als kritisch eingestuft wurden, in den bisherigen Produktionsplanungsaktivitäten aber kaum Beachtung fanden. Die hierzu entwickelten Gestaltungsempfehlungen trugen daher zu einer veränderungsrobusten Gestaltung der Produktionsarchitektur bei, die zukünftige Investition maßgeblich reduziert oder gänzlich vermeidet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt eine systematische Vorgehensweise, die den Produktionsplaner bei der proaktiven Gestaltung von veränderungsrobusten Produktionssystemen unterstützt. Mittels einer Analyse vergangener Änderungen bezüglich ihrer Änderungsklassen und der Anzahl von Änderungsfällen werden Bereiche zur bedarfsgerechten Flexibilisierung und Standardisierung identifiziert. Durch die gezielte Erweiterung der Flexibilitätskorridore an den notwendigen Stellen wird der Produktionsplaner unterstützt ein Optimum zwischen Flexibilität und Produktivität zu finden.

Sinnvoll erscheint eine Erweiterung der Systematik auf weitere Bereiche innerhalb der Produktion wie beispielsweise der Logistik oder des Personaleinsatzes. Ein flächendeckender Einsatz der Systematik könnte den Nutzen durch Lerneffekte weiter steigern.

Literatur

- [1] Nyhuis, P. et al.: „Wandlungsfähigkeit - ein systemischer Ansatz“, In: Nyhuis, P. (Hrsg.): „Schriftreihe der Hochschulgruppe für die Arbeits- und Betriebsorganisation e.V.“, GITO, Berlin, 2010.
- [2] Westkämper, E.: „Digital Manufacturing in the global Era“, Fraunhofer Institut IPA, Stuttgart, 2006.
- [3] Löffler, C. et al.: „Model of a factory structure under changeability aspects in automotive manufacturing“, Journal of Machine Engineering 11 (2011) 1-2, S. 35-45.
- [4] Eckert, C.: „Change and customisation in complex engineering domains“, Research in Engineering Design 15 (2004) 1, S. 1-21.

-
- [5] Ross, A. M. et al.: "Defining Changeability: Reconciling Flexibility, Adaptability, Scalability, Modifiability, and Robustness for Maintaining System Lifecycle Value", *Systems Engineering* 11 (2008) 3, S. 246-262.
- [6] Wiendahl, H.-P. et al.: "Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation", *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 783-809.
- [7] Schuh, G. et al.: "Design for Changeability", In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): "Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems", Springer, London, 2009.
- [8] Fricke, E.: „Der Änderungsprozess als Grundlage einer nutzerzentrierten Systementwicklung“, Herbert Utz, München, 2006.
- [9] Upton, D. M.: "The Management of Manufacturing Flexibility", *California Management Review* 36 (1994) 2, p. 72-89.
- [10] Chryssolouris, G.: "Flexibility and Its Measurements", *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 45 (1996) 2, S. 581-587.
- [11] Westkämper, E. et al.: „Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen: Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld“, *wt Werkstattstechnik online* 90 (2000) 1/2, S. 22-26.
- [12] Nyhuis, P. et al.: „Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten“, PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008.
- [13] Jarratt, T. A. W. et al.: "Engineering change: an overview and perspective on the literature", *Research in Engineering Design* 22 (2011) 2, S. 103-124.
- [14] Fricke, E. et al.: "Coping with changes: causes, findings and strategies", *Systems Engineering* 3 (2000) 4, S. 169-179.
- [15] Terkaj, W. et al.: "Focused Flexibility in Production Systems", In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): "Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems", Springer, London, 2009.

Entwicklung innovativer Produkte durch Verknüpfung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration

Christian Wagner, Sebastian Gramlich, Hermann Kloberdanz
*Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente;
Technische Universität Darmstadt*

Abstract

A systematic combination of functional integration and integration of production processes holds - particularly within a continuous flow production - diverse potentials for product innovation, e.g. in terms of weight, reliability, assembly costs or a cost-effective production. The newly introduced F²-degree of integration is accompanied by new design strategies the foundation for a catalog of concrete and practically applicable design guidelines and references. Applying these design guidelines leads to a gradually increased F²-degree of integration and hereby to a broader utilization of the aforementioned potentials.

Keywords: Functional Integration, Integration of Production Processes, Design Guidelines, Continuous Flow Production

Zusammenfassung

Die gezielte Verknüpfung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration birgt insbesondere in einer kontinuierlichen Fließfertigung vielfältige Potentiale für Produktinnovationen, beispielsweise hinsichtlich Leichtbau, Zuverlässigkeit, Montageaufwand oder einer kosteneffizienten

Fertigung. Der hierfür eingeführte F²-Integrationsgrad stellt mithilfe von zusätzlich erarbeiteten Konstruktionsstrategien die Grundlage für einen Katalog mit konkreten und praktisch anwendbaren Konstruktions- und Gestaltungshinweisen dar. Durch ihre Anwendung lässt sich der F²-Integrationsgrad schrittweise steigern, wodurch die erläuterten Potentiale umfassend ausgeschöpft werden.

Stichworte: Funktionsintegration, Fertigungsprozessintegration, Konstruktions- und Gestaltungshinweise, Fließfertigung

1 Motivation und Zielsetzung

Bei der Entwicklung innovativer Produkte steht vor allem deren Funktionserfüllung im Vordergrund. Eine gezielte Integration der gewünschten Funktionen in wenige Bauteile bietet vielfältige Potentiale, u. a. hinsichtlich Leichtbau, Zuverlässigkeit, Produktkomplexität und Montageaufwand [1]. Produktinnovationen können zudem auch technologiegetrieben initiiert sein. Mithilfe der Spaltprofilieretechnologie können in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess (vgl. Bild 1) mehrfach verzweigte Blechprofile hergestellt werden [2]. In Kombination mit weiteren Fertigungsverfahren, wie dem Walzprofilieren und einer HSC-Bearbeitung, und der Möglichkeit, die einzelnen Verfahren im Rahmen einer kontinuierlichen Fließfertigungsprozesskette flexibel und auch mehrfach anzuordnen, kann ein sehr variantenreiches Spektrum an mehrfach verzweigten Blechprofilen realisiert werden [3]. Die gezielte Integration zusätzlicher Fertigungsprozesse in eine solche Fließfertigung ermöglicht eine kosteneffiziente, integrale Fertigung mittlerer und hoher Stückzahlen. Eine kombinierte Umsetzung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration vereint die Vorteile und Möglichkeiten beider Integrationsformen und verspricht somit ein großes Potential für die Entwicklung innovativer Produkte.



Bild 1: Fließfertigung zur Herstellung integraler Bauteile

In der Konstruktionsmethodik sind zur Berücksichtigung spezifischer Zielsetzungen bzw. Aspekte beispielsweise im Rahmen des Design for X verschiedenartige Gestaltungsprinzipien und Gestaltungsrichtlinien etabliert. Richtlinien, wie beispielsweise „Fertigungsgerecht“, zeichnen sich durch ihre

praktische Anwendbarkeit aus [4, 5] und sollen die Herstellbarkeit der entwickelten Produkte gewährleisten. Vergleichbare Hilfsmittel zur kombinierten Betrachtung von Funktions- und Fertigungsprozessintegration stehen derzeit nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund soll ein in der Praxis leicht anwendbares Werkzeug geschaffen werden, mit dessen Hilfe die Potentiale einer verknüpften Funktions- und Fertigungsprozessintegration systematisch nutzbar gemacht werden.

2 Verknüpfung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration

2.1 Begriffsverständnis

Nach einem auf der Definition von [1] aufbauenden Verständnis der Autoren handelt es sich bei Funktionsintegration um einen konstruktiven Vorgang, bei dem ein technisches System mit gegebener Funktion so verändert wird, dass sich dadurch drei verschiedene Auswirkungen ergeben können:

- Mithilfe einer unveränderten Anzahl an Funktionsträgern werden zusätzliche Funktionen realisiert.
- Eine unveränderte Anzahl an Funktionen wird bei gleichbleibender Funktionszuverlässigkeit mithilfe einer geringeren Anzahl an Funktionsträgern realisiert.
- Die Anzahl der Einzelteile bzw. Werkstücke, die zur stofflichen, geometrischen und fertigungstechnischen Realisierung der Funktionsträger notwendig sind, wird reduziert.

Funktionsintegration kann eine oder mehrere der genannten Auswirkungen bei dem zu entwickelnden Produkt bewirken. Der Grad an Funktionsintegration lässt sich also anhand zweier Dimensionen festmachen: Einerseits hinsichtlich der Baustruktur des Funktionsträgers, die sich zwischen einer vollständigen Integral- und vollständigen Differentialbauweise bewegen kann; andererseits hinsichtlich der Anzahl der Funktionen, die mithilfe des betrachteten Funktionsträgers realisiert werden. Mit steigendem Funktionsintegrationsgrad steigt damit der Kundennutzen, sofern die Realisierung des Produkts gleichzeitig auch den Ansprüchen der Wirtschaftlichkeit genügt. In Produkten mit einem hohen Funktionsintegrationsgrad liegt also auch ein großes Innovationspotential.

Neben der Funktionsintegration spielt die Fertigungsprozessintegration eine große Rolle bei der kostengünstigen Herstellung innovativer Produkte. Ein hoher Grad an Fertigungsprozessintegration kann erreicht werden, indem die Eigenschaften der durch das gewählte Fertigungsverfahren ermöglichten fertigungsverfahrensinduzierten [6] Gestaltelemente gezielt ausgenutzt und zweckmäßig miteinander kombiniert werden, um die Fertigung soweit wie möglich in einen Fließprozess zu integrieren, ohne weitere vor- oder nachgelagerte Fertigungsschritte notwendig zu machen. Dies birgt ungeachtet des Grads an Funktionsintegration Vorteile hinsichtlich Kosten, Stückzahlen und Produktivität. Vor allem die Verknüpfung eines hohen Grads an Funktionsintegration und gleichzeitig eines hohen Grads an Fertigungsprozessintegration verspricht ein großes Potential für Produktinnovationen, da dadurch die Vorzüge beider Integrationsformen vereint werden können.

2.2 F²-Integrationsgrad als Maß der Verknüpfung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration

Inwieweit im Rahmen der Produktentwicklung die Möglichkeiten der Funktionsintegration bei gleichzeitiger Fertigungsprozessintegration genutzt werden, lässt sich mittels des hierzu eingeführten F²-Integrationsgrads bemessen. Produkte, in die eine große Anzahl gewünschter Funktionen sinnvoll integriert sind und die beispielsweise im Rahmen einer Fließfertigung integral gefertigt werden können, weisen einen hohen F²-Integrationsgrad auf und besitzen somit ein entsprechend großes Innovationspotential. Mithilfe des F²-Integrationsgrads wird dem Konstrukteur vor Augen geführt, dass sowohl die Fertigungsprozessintegration als auch die Funktionsintegration enorme Potentiale aufweisen, die es möglichst gleichzeitig und gleichermaßen auszunutzen gilt.

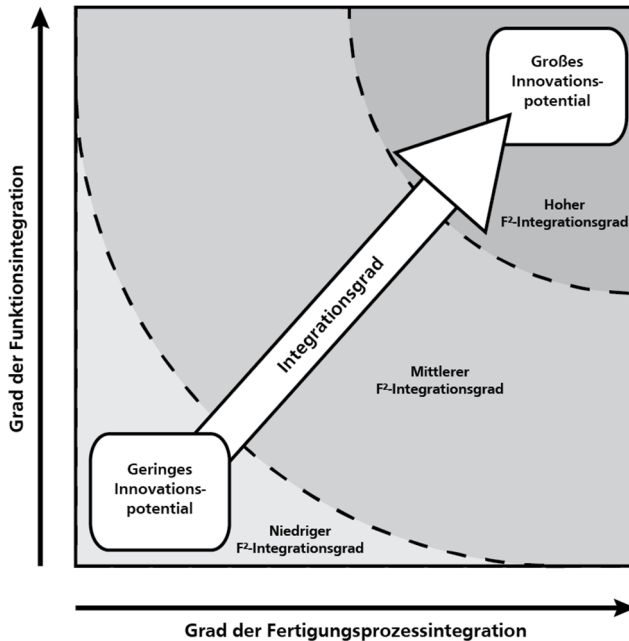


Bild 2: F²-Integrationsgrad und Innovationspotential

Die Abszisse in Bild 2 zeigt den Grad der Fertigungsprozessintegration an, während die Ordinate den Grad der Funktionsintegration widerspiegelt. Der Grad der Fertigungsprozessintegration ist umso stärker ausgeprägt, je weniger zusätzliche vor- oder nachgelagerte Fertigungs-, Füge- und Montageprozesse bzw. -schritte nötig sind, um das Produkt im Rahmen einer kontinuierlichen Fließfertigung zu fertigen. Produkte am rechten Ende der Abszisse könnten im Rahmen einer kontinuierlichen Fließfertigung ohne vor- oder nachgelagerte Fertigungsoperationen vollständig gefertigt werden.

Sind auf einem einzigen Werkstück bzw. Funktionsträger alle Funktionen, die das Produkt erfüllen soll, vereint, so befindet es sich am oberen Ende der Ordinate. Produkte, die in Differentialbauweise ausgelegt sind, befinden sich auf der Ordinate entsprechend darunter. Kann durch eine geschickte Gestaltung eines Funktionsträgers dieser also eine größere Anzahl an Funktionen erfüllen oder lässt er sich durch eine geringere Anzahl an Einzelteilen realisieren, so steigt der Grad der Funktionsintegration an.

Je weiter man sich in Bild 2 nach rechts oben bewegt, desto integrierter sind die Lösungen hinsichtlich ihrer Baustruktur und gleichzeitig in ihrer Mög-

lichkeit, sie im Rahmen einer Fließfertigung integral herzustellen. Im Extremen („Vollintegration“) befände sich ein in Integralbauweise ausgeführtes Produkt, welches sich ohne zusätzliche vor- oder nachgelagerte Fertigungsoperationen im Rahmen eines Fließfertigungsprozesses vollständig fertigen ließe. Lösungen, die in Differentialbauweise ausgelegt und deren notwendigen Herstellungsschritte sich nicht in einen kontinuierlichen Fertigungsprozess integrieren lassen, zeichnen sich durch einen niedrigen F^2 -Integrationsgrad aus. Natürlich gibt es auch in diesem sehr gute und erfolgreiche Produkte. Denkbar sind zum Beispiel Produkte, die in geringer Stückzahl gefertigt werden und austauschbare Verschleißteile beinhalten. Aufgrund der genannten Potentiale von Produkten mit einem hohen Integrationsgrad ist es vor allem in Verbindung mit einer kontinuierlichen Fließfertigungsanlage zweckmäßig, Hilfsmittel zur gezielten Entwicklung von Produkten mit einem hohen F^2 -Integrationsgrad bereitzustellen.

3 Hilfsmittel und Werkzeuge zur Steigerung des F^2 -Integrationsgrads

3.1 Konstruktionsstrategien

Zur schrittweisen Erhöhung des F^2 -Integrationsgrads im Entwicklungsprozess existieren zwei grundsätzliche Konstruktionsstrategien:

- Steigerung des Funktionsintegrationsgrads durch gezielte Nutzung der (fertigungs-) verfahrensinduzierten Gestaltelemente zur Realisierung der funktionsrelevanten Wirkelemente.
- Steigerung des Fertigungsprozessintegrationsgrads durch gezielte Integration konzeptbedingter (d. h. zur Realisierung der funktionsrelevanten Wirkelemente notwendigen) Fertigungsschritte in die Fertigungsprozesskette.

Die Auswirkungen der beiden Strategien auf den F^2 -Integrationsgrad bewegen sich auf unterschiedlichen Achsen: Wird der Ansatz gewählt, die Fertigung des zu gestaltenden Produkts bestmöglich im Rahmen eines kontinuierlichen Fertigungsprozesses zu realisieren, so erhöht sich durch Befolgen dieser Strategie der Grad an Fertigungsprozessintegration. Analog verhält es sich mit dem Ansatz, eine möglichst integrale Baustruktur für das Produkt zu schaffen. Beide Konstruktionsstrategien sollten nicht losgelöst voneinander betrachtet werden, sondern gleichzeitig verwirklicht werden.

Um die verfahrensinduzierten Gestaltelemente zur Realisierung funktionsrelevanter Wirkelemente gezielt nutzen zu können, ist zunächst die Kenntnis

der verfahrensinduzierten Gestaltelemente des betrachteten Fertigungsverfahrens und ihrer zugehörigen verfahrensinduzierten Eigenschaften notwendig. In Bild 3 sind beispielhaft einige verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften aufgeführt, die in einer Fließfertigung zur Herstellung mehrfachverzweigter Blechbauteile realisiert werden können und gezielt für die Herstellung einer im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 666 entwickelten integralen Linearführung genutzt worden sind. Die in der kontinuierlichen Fließfertigung hergestellten verfahrensinduzierten Gestaltelemente stellen eine Aggregation der verfahrensinduzierten Gestaltelemente mit entsprechenden verfahrensinduzierten Eigenschaften der einzelnen durchgeführten Prozessschritte dar [6]. Im vorliegenden Beispiel wurden diese gezielt genutzt, um mithilfe sequenzieller Prozessschritte zwei gegenüberliegende geschlossene dünnwandige Kammern zu erzeugen. Durch Druckbeaufschlagung dieser Kammern kann ein auf der Linearführung fahrender Schlitten zwischen diesen geklemmt und somit eine Klemmfunktion integral realisiert werden [7]. Die dargestellte Lösung weist somit einen hohen F²-Integrationsgrad auf, da sowohl eine integrale Baustruktur vorliegt, als auch eine große Zahl notwendiger Fertigungsschritte in den Fließprozess integriert werden konnte.

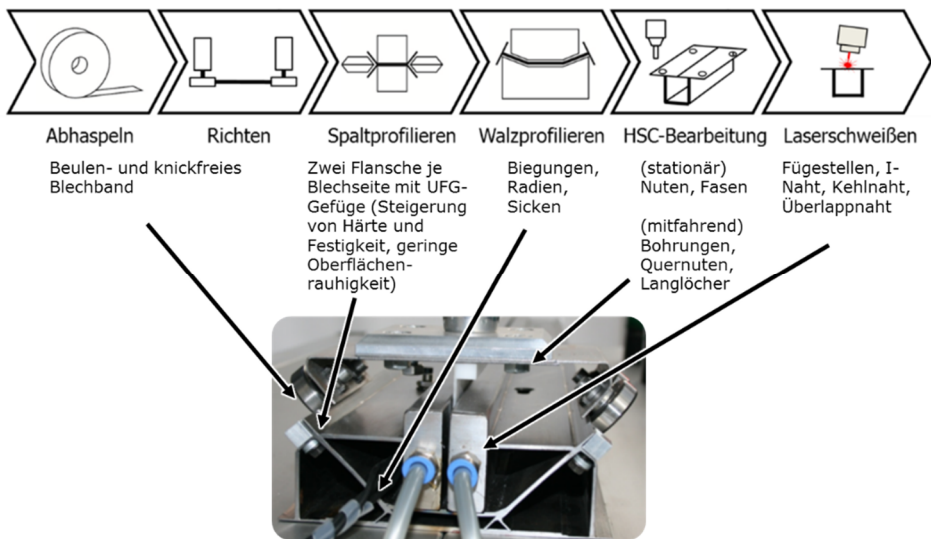


Bild 3: Fertigungsverfahren und zugehörige fertigungsverfahrensinduzierte Gestaltelemente in einer Fließfertigung zur Herstellung mehrfachverzweigter Blechbauteile

3.2 Konstruktions- und Gestaltungshinweise

Zur Umsetzung der genannten Konstruktionsstrategien eignen sich Konstruktions- und Gestaltungshinweise (vgl. Bild 4). Diese lehnen sich an die Struktur existierender Gestaltungsprinzipien und -richtlinien an und gewährleisten in Verbindung mit konkreten Gestaltungsvorbildern ihre praktische Anwendbarkeit.

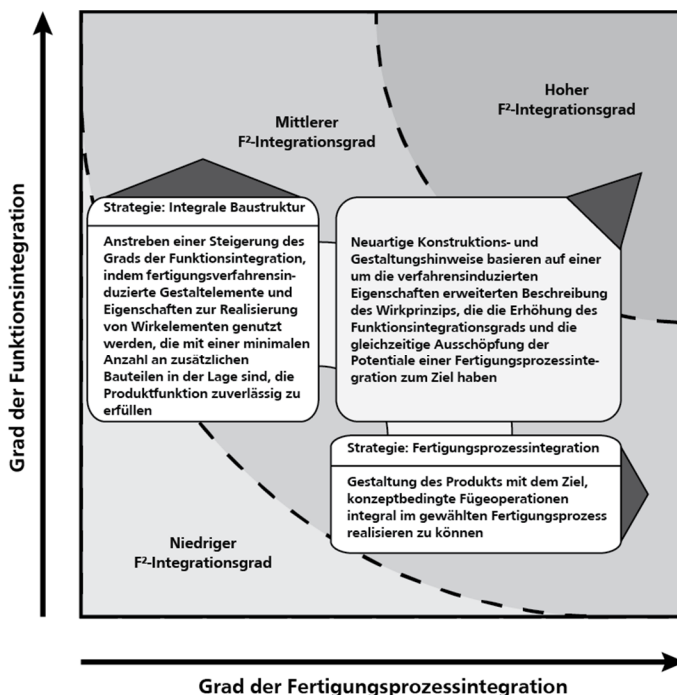
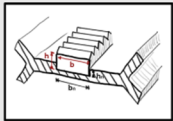
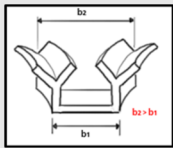


Bild 4: Konstruktionsstrategien zur Steigerung des F²-Integrationsgrads als Grundlage für Konstruktions- und Gestaltungshinweise

Die entwickelten Konstruktions- und Gestaltungshinweise basieren auf einer durch die verfahrensinduzierten Eigenschaften erweiterten Beschreibung des Wirkprinzips. Sie bieten Konstrukteuren konkrete Anhaltspunkte, wie die fertigungsverfahrensinduzierten Gestaltelemente und Eigenschaften der in der Fertigungsprozesskette integrierten Verfahren gezielt zur stofflichen Umsetzung der funktionsrelevanten Wirkelemente und damit zur integralen Realisierung der geforderten Funktionen genutzt werden können. Durch den Fokus auf die Nutzung verfahrensinduzierter Gestaltelemente, die im Rahmen einer

kontinuierlichen Fließfertigung realisiert werden können, wird zugleich die Realisierung eines hohen Fertigungsprozessintegrationsgrads begünstigt. Die verfahrensinduzierten Eigenschaften können zum einen Fertigungsrestriktionen abbilden, um die Herstellbarkeit zu gewährleisten; zugleich werden durch sie aber auch die fertigungsverfahrensspezifischen Gestaltungsmöglichkeiten offenbart. Im Gestaltungsvorbild, der graphischen Repräsentation des Konstruktions- und Gestaltungshinweises, wird der Zusammenhang zwischen den einzelnen wirkprinziprelevanten Eigenschaften und verfahrensinduzierten Eigenschaften des entsprechenden verfahrensinduzierten Gestaltelements deutlich gemacht. Bild 5 zeigt beispielhaft einen Auszug aus einem Katalog von erarbeiteten Konstruktions- und Gestaltungshinweisen für spaltprofilierte Linearführungen und Linearsysteme.

Antriebsfunktion: Energie wandeln	
Konstruktions- und Gestaltungshinweis	Gestaltungsvorbild
<p>„Nutze zur Realisierung einer Antriebsfunktion in Linearsystemen die <i>Geometrie der Nut</i> eines <i>spaltprofilierten Stegs</i> mit <i>zuvor eingefräster Nut</i>, in die eine <u>Zahnstange</u> mit <u>passender Geometrie</u> eingesetzt werden kann.“</p>	

Systemfunktion: Position halten	
Konstruktions- und Gestaltungshinweis	Gestaltungsvorbild
<p>„Nutze zur Realisierung einer Stoppfunktion einer Linearführung eine <i>auseinanderlaufende Geometrie</i> eines durch <i>flexibles Spalt- und Walzprofilieren</i> gefertigten <i>Blechprofils</i>, um den <u>Abstand zwischen den Laufbahnen</u> zu vergrößern.“</p>	

Verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften
Wirkelemente und wirkprinziprelevante Eigenschaften

Bild 5: Beispielhafte Konstruktions- und Gestaltungshinweise mit Gestaltungsvorbildern zur gezielten Steigerung des F²-Integrationsgrads

Der in Bild 5 oben dargestellte Konstruktions- und Gestaltungshinweis stellt ein Hilfsmittel zur Umsetzung der Konstruktionsstrategie zur Steigerung des Grads der Fertigungsprozessintegration dar. Die kursiv dargestellten verfahrensinduzierten Gestaltelemente und Eigenschaften, in diesem Fall die Geometrie der Nut eines spaltprofilierten Stegs mit zuvor eingefräster Nut, sollen dazu genutzt werden, Fügeprozesse der für die Funktionserfüllung notwendigen Wirkelemente im Rahmen einer kontinuierlichen Fließfertigung zu ermöglichen. Diese Wirkelemente mit zugehörigen wirkprinziprelevanten Eigenschaften, in diesem Fall eine Zahnstange mit zur Nut passenden Geometrie, sind

unterstrichen dargestellt. Durch die gezielte Nutzung der Möglichkeit, die das betrachtete Fertigungsverfahren hinsichtlich der Integration von Fügeprozessen aufweist, trägt die Umsetzung des Konstruktions- und Gestaltungshinweises zu einer Verringerung des Montageaufwands bei. Damit erhöht sich ebenso der Grad an Fertigungsprozessintegration, was zu einer schrittweisen Steigerung des F^2 -Integrationsgrads führt.

Beide Konstruktionsstrategien zugleich können mittels des in Bild 5 unten dargestellten Konstruktions- und Gestaltungshinweises umgesetzt werden. Mithilfe der Geometrie eines durch flexible Spalt- und Walzprofilierprozesse gefertigten Blechprofils [8] können die für die Funktionserfüllung notwendigen Wirkelemente und wirkprinziprelevanten Eigenschaften, in diesem Fall Laufbahnen mit veränderlichem Abstand zueinander, realisiert werden. In diesem Konstruktions- und Gestaltungshinweis werden damit gezielt die spezifischen Gestaltungsmöglichkeiten, die das gewählte Fertigungsverfahren bietet, genutzt, um eine integrale Funktionserfüllung zu gewährleisten. Dadurch weist die Lösung eine integrale Baustruktur auf und kann zugleich vollständig im Rahmen der kontinuierlichen Fließfertigung hergestellt werden, wodurch Vorteile unter anderem hinsichtlich Leichtbau und Montageaufwand ermöglicht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die gezielte Verknüpfung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration birgt insbesondere in einer kontinuierlichen Fließfertigung vielfältige Potentiale für Produktinnovationen. Der F^2 -Integrationsgrad schafft ein Bewusstsein für dieses Potential und stellt mithilfe der erarbeiteten Konstruktionsstrategien zugleich die Grundlage für konkrete und praktisch anwendbare Konstruktions- und Gestaltungshinweise dar. Durch ihre Anwendung lässt sich der F^2 -Integrationsgrad schrittweise steigern, wodurch die erläuterten Potentiale umfassend ausgeschöpft werden.

Die entwickelten Konstruktions- und Gestaltungshinweise zur Steigerung des F^2 -Integrationsgrads wurden bislang für Linearsysteme aus mehrfachverzweigten Blechprofilen entwickelt. Durch eine umfassende experimentelle und numerische Bewertung eines Linearsystems mit einer aus mehrfachverzweigten Blechbauteilen bestehenden Linearführung, die unter Berücksichtigung der neu entwickelten Konstruktions- und Gestaltungshinweise gestaltet worden ist, sollen zukünftig die Anwendbarkeit und der Nutzen des Konstruktions- und Gestaltungshinweiskatalogs nachgewiesen werden.

Durch den bewussten Verzicht auf eine spezifische Festlegung der konkreten Gestalt und die Fokussierung auf Wirkprinzipien lässt sich die formalisierte Struktur der entwickelten Konstruktions- und Gestaltungshinweise auch in andere Produktbereiche übertragen und dort anwenden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 666.

Literatur

- [1] Ziebart, J.: „Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration“, Verlag Dr. Hut, München, 2012. Dissertation.
- [2] Müller, C. et al.: „Linear Flow Splitting – Profile Properties and their Implementations in Product Development“. In: „Proceedings ICTP 2008“, 2008.
- [3] Ludwig et al.: „Integration von Fräs- und Spaltprofilierprozessen in Walzprofilieranlagen“. In: Peter Groche (Hrsg.): „Tagungsband 3. Zwischenkolloquium SFB 666. Sonderforschungsbereich 666, Integrale Blechbauweisen Höherer Verzweigungsordnung, Entwicklung, Fertigung, Bewertung“, Meisenbach, Bamberg, 2010.
- [4] Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): „Pahl/Beitz Konstruktionslehre“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- [5] Meerkamm, H. et al.: „Design for X (DFX)“. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): „Handbuch Konstruktion“, Carl Hanser, München Wien, 2012.
- [6] Gramlich, S.: „Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln. Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus.“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2013. Dissertation.
- [7] Lommatzsch, N.; Gramlich, S.; Birkhofer, H.; Bohn, A.: „Linear flow-split linear guides: inflating chambers to generate breaking force“. In: Culley, S. J.; Hicks, B. J.; McAloone, T. C.; Howard, T. J.; Lindemann, U. (Hrsg.): „Proceedings of the 18th International

Conference on Engineering Design (ICED11), Vol 4", Kopenhagen, 2011.

- [8] Schmitt, Wolfram; Groche, Peter: „Verfahrensentwicklung zum Flexiblen Spaltprofilieren“. In: Peter Groche (Hrsg.): „Tagungsband 3. Zwischenkolloquium SFB 666. Sonderforschungsbereich 666, Integrale Blechbauweisen Höherer Verzweigungsordnung, Entwicklung, Fertigung, Bewertung“ Meisenbach, Bamberg, 2010.