



Design for X

Beiträge zum 23. DfX-Symposium
Oktober 2012

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://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Impressum

TuTech Verlag
TuTech Innovation GmbH
Harburger Schloßstr. 6-12
21079 Hamburg
Tel.: +49 40 76629-0
Fax: +49 40 76629-6559
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 23. DfX-Symposium* zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.
© TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2012

ISBN 978-3-941492-51-6

Vorwort

Das Symposium *Design for X* findet nun bereits zum 23. Mal statt, in diesem Jahr inmitten der wunderschönen Altstadt Bamberg. Der Austragungsort wechselt, der Geist des Symposiums bleibt: Auch in diesem Jahr stehen Doktoranden, die Ihre Forschungsprojekte vorstellen und diskutieren möchten im Vordergrund. Ergänzt werden diese durch vier Keynote-Vorträge, hauptsächlich von Industrievertretern, die in Plenarvorträgen über den entsprechenden Stand und aktuelle Herausforderungen in der Produktentwicklung berichten.

Ich freue mich sehr, dass gerade in diesem Jahr mit über 40 eingereichten Beiträgen ein neuer Rekord verzeichnet werden konnte. Bedauerlicherweise führt dies leider auch dazu, dass wir aus Kapazitätsgründen eine Auswahl treffen mussten.

Die Schwerpunkte in diesem Jahr greifen mit **Toleranzanalyse/Robust Design, Leichtbau** und **Variantenmanagement** teilweise Themen der vergangenen Symposien auf, werden aber auch um neue Themenblöcke wie **Menschzentrierte Produktentwicklung** und **Wissensbasiertes Konstruieren** ergänzt.

Die Vorbereitung und Durchführung einer solchen Veranstaltung bedarf der tatkräftigen Unterstützung vieler engagierter Personen, bei denen ich mich hiermit herzlichst bedanken will: In erster Linie sind dies meine Mitveranstalter und Kollegen, Kristin Paetzold und Dieter Krause sowie auch meine Mitarbeiter Bernd Vierneusel und Daniel Krüger. Ein weiteres Dankeschön geht an meine beiden Sekretärinnen Evelyn Weyrich und Gabriele Stingl und natürlich auch an alle Autoren und Vortragenden die unser Symposium mit Beiträgen bereichert haben. Ich freue mich auf die vielen, interessanten Vorträge und die sicherlich lebhaften Diskussionen!

Erlangen, August 2012

Sandro Wartzack



Inhaltsverzeichnis

1 Session: Keynotes

Prozess unter Kontrolle – Dynamische Simulation komplexer mechanischer Systeme

*Andrei Degtiarev , Jonas Fischer, Stefan Lenssen
Schaeffler Technologies AG & Co. KG..... 1*

Effektives Risikomanagement in Entwicklungsprojekten

*Josef Oehmen
Massachusetts Institute of Technology..... 17*

Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz

*Christian Weber
TU Ilmenau..... 25*

2 Session: Wissensbasiertes Konstruieren

Die Rolle des Wissensingenieurs im Unternehmen – Ergebnisse einer Umfrage und Darstellung in der VDI-Richtlinie "Wissensbasiertes Konstruieren"

*Thomas Luft, Thilo Breitsprecher, Daniel Roth, Kai Lindow, Sandro Wartzack, Hansgeorg Binz
FAU Erlangen-Nürnberg; Uni Stuttgart; TU Berlin..... 63*

Reverse Engineering als Grundlage wissensbasierter Konstruktionen

*Dirk Hofmann, Christine Schöne, Ralph Stelzer
TU Dresden..... 79*

Konzept zur Wissensrepräsentation von Produktstrukturen mit Hilfe von Ontologien

*Touba Rahmani, Detlef Gerhard
TU Wien..... 89*

3 Session: Menschzentrierte Produktentwicklung

Markerlose Bewegungsaufzeichnung und Bewertungsmethoden für die menschenzentrierte Produktentwicklung

Jörg Miehling, Sandro Wartzack

FAU Erlangen-Nürnberg.....101

Modellierung und Simulation des Hand-Arm-Systems bei stoßartiger Anregung

Sven Matthiesen, Sebastian Mangold, Tobias Schäfer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)..... 113

4 Session: Leichtbau

Numerische Untersuchung der Einflüsse von Streuungen auf Versagenskriterien von Composite Strukturen

Markus Kellermeier, Sandro Wartzack

CADFEM GmbH; FAU Erlangen-Nürnberg..... 125

Untersuchungen von varianten Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten

Olaf Rasmussen, Benedikt Plaumann, Dieter Krause

TU Hamburg-Harburg.....135

Ansatz zur crashsicheren Auslegung von Leichtbaukonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Fügstellen

Klein Daniel, Lindner Christian, Wartzack Sandro

FAU Erlangen-Nürnberg.....151

Erfahrungsbasierte Unterstützung des Entwicklungsprozesses mit Fokus auf Verbindungsauslegung

Martin Eigner, Joscha Ernst, Daniil Roubanov

TU Kaiserslautern..... 163

5 Session: Variantenmanagement

Nutzung von „Merkmalen“ und „Eigenschaften“ zur Beschreibung und Analyse von Produktvarianz

Nicolas Gebhardt, Karen Malone, Dieter Krause

TU Hamburg-Harburg.....175

Zielsystemorientiertes Variantenmanagement einbaufertiger Systembaugruppen
Albert Albers, Markus Walch, Quentin Lohmeyer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)..... 187

Ansatz zur flexiblen Gestaltung modularer Bauweisen - Dilemma zwischen Standardisierung und Flexibilität
Johannes Siebel, Christian Schindler
TU Kaiserslautern..... 199

6 Session: Toleranzen und Robust Design

Virtuelle Toleranzbeurteilung abweichungsbehafteter Bauteile
Benjamin Schleich, Sandro Wartack
FAU Erlangen-Nürnberg.....211

Bestimmung charakteristischer Unsicherheiten im Auslegungsprozess von Bauteilen aus Faserkunststoffverbunden
Conny Schillo, Dieter Krause
TU Hamburg-Harburg.....223

Integration qualitativer und quantitativer Informationen als Grundlage für die Auswahl von Robust Design Strategien
Tobias Eifler, Johannes Matthias, Hermann Kloberdanz, Andrea Bohn, Herbert Birkhofer
TU Darmstadt.....237

Matrix based approach in assessing optimum robust product architectures
Krešimir Osman, Dorian Marjanović
University of Zagreb.....249

7 Session: Design for X

Vorschlag zur funktionsorientierten Kategorisierung von CAD-Templates am Beispiel eines Entwicklungsprozesses in der Automobilindustrie
A. Afkari, D. Roth, H. Binz
TTI GmbH; Universität Stuttgart..... 263

Effiziente Datenaufbereitung zur Simulationsplanung unter Berücksichtigung
von Marktkontext und Entwicklungssituation
Jochen Reitmeier, Kristin Paetzold
Universität der Bundeswehr München.....275

Mechanische Absicherung automatisierter Montageanlagen mit physikbasier-
ten Simulationen
Anton Strahilov, Jivka Ovtcharova, Thomas Bär
Daimler AG; Karlsruher Institut für Technologie.....289

Möglichkeiten der Informationsvisualisierung in der Montageabsicherung
Rainer Späth, Miriam Hesse, Andreas Kohn
BMW Group; TU München..... 301



Prozess unter Kontrolle – Dynamische Simulation komplexer mechanischer Systeme

Dr. Andrei Degtiarev, Dr. Jonas Fischer und Dr. Stefan Lenssen
Schaeffler Technologies AG & Co. KG; Herzogenaurach

Dynamische Systeme wie Abgasturbolader und insbesondere komplexere mechatronische Systeme wie Windenergieanlagen erfordern einen ganzheitlichen Ansatz, falls die Beanspruchungen der Bauteile für alle Betriebszustände inklusive der Wechselwirkungen der verschiedenen Subsysteme und Komponenten vorhergesagt werden sollen.

Mit diesem Vortrag wird die dafür erforderliche Prozesskette und die dazugehörigen Werkzeuge am Beispiel einer Windkraftanlagensimulation dargestellt. Die Prozesskette muss eine firmenübergreifende Zusammenarbeit gewährleisten und unterstützen. Für das Pre- und Postprocessing kommt hierbei eine neu entwickelte Simulationsplattform zum Einsatz. Diese unterstützt insbesondere eine gemeinschaftliche Simulation und ermöglicht allen Beteiligten gleichberechtigt die Durchführung und Kontrolle der Simulationsaufgaben, wobei das jeweilige Kern-Know-How über entsprechende Schnittstellen und Bibliotheken geschützt bleibt. Schnittstellen zwischen verwendeten CAE-Werkzeugen werden vorgestellt, die eine automatisierte Erstellung des Simulationsmodells mit garantierter Qualität ermöglichen. Neben den Prozessen zur Simulation wird detailliert auf die Modellierung von Lagern in der entsprechenden Gesamtsimulationen eingegangen.

1 Einleitung

Simulationen von komplexen Systemen wie z.B. einer kompletten Windenergieanlage (WEA), halten immer mehr Einzug in den Produktentstehungsprozess. Von Modellen zur aerodynamischen Auslegung der Windenergieanlagen bis hin zu komplexen 3D Modellen inklusive aller elastischen Getriebe-komponenten wie Wellen, Planetenträger, Zahnräder, Lager und Gehäuse werden Simulationen erforderlich, um die komplexen Wechselwirkungen dieser schwingenden Systeme zu verstehen. Für Simulationen dieser Art stehen mächtige Programmsysteme aus dem Bereich Finite Elemente Methoden oder Mehrkörpersimulation zur Verfügung. Selbst kompakte Programmsysteme mit dem speziellen Focus Windenergieanlagen-Simulation sind heute verfügbar.

Ein Komponentenhersteller wie die Firma Schaeffler muss zur Auslegung seiner Produkte im elastischen Gesamtsystem eine Vielzahl von sehr verschiedenen Aufgabenstellungen lösen. Hierzu sind adäquate Werkzeuge, aber auch robuste, durchgängige Prozesse notwendig. Schaeffler entwickelt seit vielen Jahren eigene Werkzeuge, die die Auslegung der Produkte auf verschiedenen Abstraktionsebenen vom Gesamtsystem über Komponenten wie Lager bis hin zu einzelnen Wälzkontakten mit benötigter Genauigkeit und Modelltiefe beschreiben. Speziell für die Simulation von sehr verschiedenen komplexen Systemen, wie Windenergieanlagen, Magnetlagerungen von Turbinenwellen oder Turboladern in Verbrennungsmotoren wurde eine eigene Simulationsplattform entwickelt. Diese unterstützt im Speziellen die Philosophie von durchgängigen, automatisierten und damit robusten Prozessen zur Modellerstellung und Ergebnisauswertung, ohne die komplette Fachkenntnis der zur Lösung eingesetzten kommerziellen Solver vorauszusetzen.

2 Komplexe Modelle - Windkraftanlage

Bevor die Prozesse und Werkzeuge dargestellt werden können, ist es sinnvoll, zuerst das Ziel der Simulation zu definieren. Dieses kann z.B. die Ermittlung von Wälzlagerkräften in einem Antriebstrang sein. Im Fall einer WEA wird dafür normalerweise ein dynamisches Modell der gesamten Anlage benötigt.

2.1 Modellaufbau

Die starke Kopplung zwischen Aerodynamik, mechanischen Schwingungen, Elektrik und nicht zuletzt der Steuerung, macht das Simulationsmodell im Vergleich zu anderen Industrieanwendungen sehr komplex. Im Rahmen des ADTS II Projektes [5], einer Zusammenarbeit zwischen den Firmen REPower

(Windkraftanlagehersteller), Eickhoff (Getriebehersteller) und Schaeffler, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das wegen seines Fokus auf den Antriebsstrang einen besonderen Komplexitätsgrad erreicht hat. Dies betrifft nicht nur den Antriebsstrang selbst, sondern auch die Modelle der Aerodynamik und der Steuerung. Die wichtigsten Komponenten (Blätter, Rotornabe, Maschinenbett, Turm, Fundament, Generator usw.) sind wie im Getriebe elastisch modelliert. Abbildung 1 stellt das Simulationsmodell zusammenfassend dar.

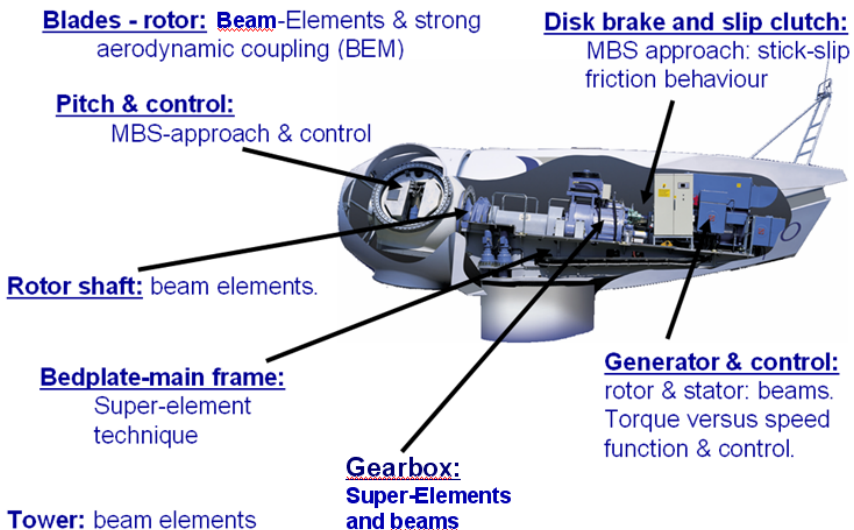


Abbildung 1: Simulationsmodell der WEA

2.2 Validierung

Das primäre Ziel der Industriepartnerschaft im ADTS-II Projekt war nicht das Simulationsmodell selbst, sondern die daraus resultierenden Untersuchungsergebnisse, welche neben der Wissenschaftlichen auch eine stark praxisrelevante Bedeutung haben. Aus diesem Grund ist eine ausführliche Modellvalidierung besonders wichtig. Für derart komplexe Simulationsmodelle muss die Validierung in mehreren Schritten erfolgen, wobei einzelne Teilaspekte unabhängig voneinander betrachtet werden können. So kann z.B. die Validierung der Aerodynamik und Steuerung unabhängig von der Schwingungsanalyse im Getriebe durchgeführt werden

Für den Abgleich zwischen Messungen und Simulation ist ein Not-Stop der WEA sehr gut geeignet. In der Realität findet dieser Vorgang selten statt, liefert aber wertvolle Informationen für die Simulation, da die resultierenden Anlagenparameter (z.B. Drehmoment, Bewegungen, Kräfte) sowohl von den Eigenfrequenzen des Systems, als auch von der Steuerung und dem Wälzlager- bzw. Verzahnungsspiel abhängig sind.

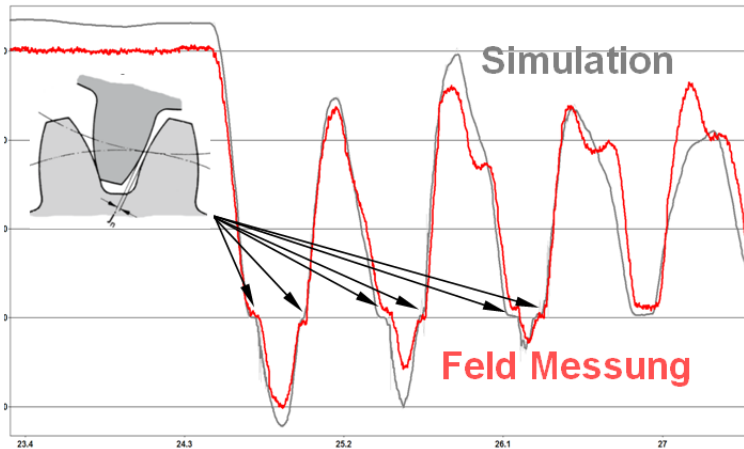


Abbildung 2: Drehmoment in der Abtriebswelle, Abgleich für einen Not-Stop

Abbildung 2 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für das Drehmoment in der Abtriebswelle. Ebenfalls ist dort der erwartete Einfluss der Zahnflankenspiele im Antriebsstrang sowohl bei der Messung als auch in der Simulation deutlich zu erkennen

Neben der Untersuchung von Makroparametern wie dem Verlauf des inneren Drehmomentes ist ein Abgleich im Frequenzbereich ebenfalls erforderlich. Dafür ist die Darstellung des Schwingungssignals durch Wasserfalldiagramme sehr gut geeignet. Beispielsweise zeigt Abbildung 3, links oben und unten, den Vergleich der Frequenzspektren der inneren Drehmomente aus Messung und Simulation. Auch hiermit wird die Güte des Simulationsmodells bestätigt.

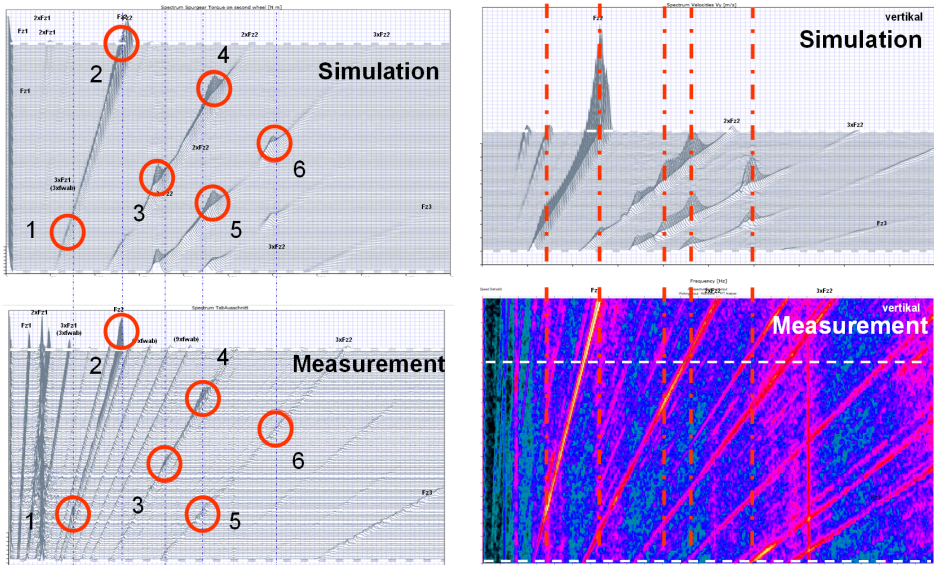


Abbildung 3: Validierung des Prüfstandmodells im Frequenzbereich

In Abbildung 3, rechts oben und unten, sind die Ergebnisse der Körperschallmessungen zusammen mit den Simulationsergebnissen dargestellt. Analog zu den gemessenen Systemresonanzen werden diese ebenfalls durch das Simulationsmodell abgebildet.

3 Simulationsprozess

Der Simulationsprozess für komplexe System erfordert eine Reihe von Maßnahmen, die eine effiziente Modellerstellung mit der notwendigen Qualität und Tiefe ermöglichen.

3.1 Modulare Aufbau

Um redundante Arbeiten zu vermeiden und die Validierung des Simulationsmodells zu erleichtern, wurden komplette Modelle sowohl des Prüfstands, als auch der WEA mit dem allgemeinen Ansatz der Submodelltechnik abgebildet. Abbildung 4 zeigt, wie das Getriebe in die jeweiligen Gesamtmodelle eingebunden wurde. Zur ersten möglichst einfachen Validierung der allgemeinen Getriebeparameter wurde ein Modell des Einzelgetriebes unter Verwendung von Importschnittstellen erstellt, simuliert und geprüft. Dabei war insbesondere die Schnittstelle zwischen dem Programm BEARINX® [2] und der un-

ter Punkt 4 genauer beschriebenen Simulationsplattform hilfreich. Später wurde dieses Modell nicht kopiert, sondern sowohl im Prüfstands- als auch im WEA-Modell referenziert. Dadurch entfällt der sehr fehleranfällige Prozess der Synchronisierung der Modelldaten.

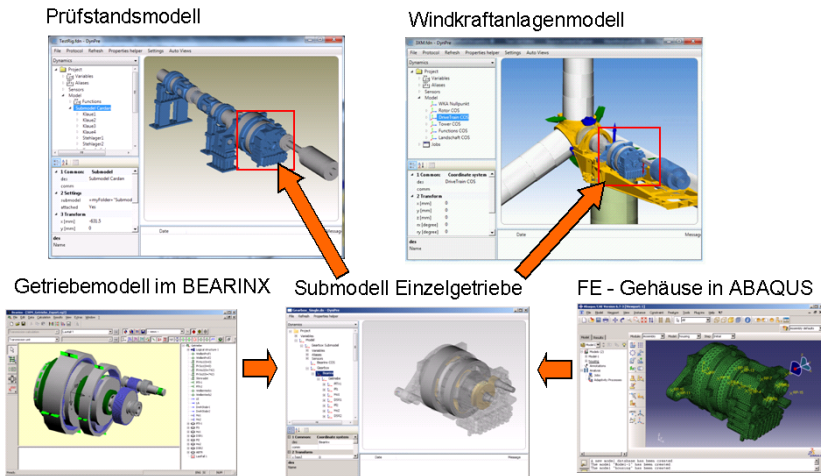


Abbildung 4: Effizienter Modellaufbau durch Verwendung von Submodellen

3.2 Sicherung der Modellqualität

Um ein möglichst fehlerfreies Modell zu erstellen ist nicht nur das „Zusammenklicken“ von MKS-Elementen erforderlich, sondern weitere, spezielle Maßnahmen, die für eine entsprechende Modellqualität sorgen. Zu diesen Maßnahmen gehören z.B. die folgenden Punkte:

- Die Konsistenz der Koordinatensysteme sollte durch eine automatische Schnittstelle gewährleistet werden. Häufig ist dieses eine versteckte Fehlerquelle bei Wälzlagern und Zahnrädern.
- Die Trägheits- und Steifigkeitseigenschaften sollten nicht vorgegeben, sondern durch den Berechnungssolver aus den eingegebenen Geometriedaten errechnet werden. Damit ist auch eine visuelle Kontrolle („das Modell entspricht genau der Zeichnung“) gegeben und mögliche Fehler können vermieden werden. Falsche Einheiten und/oder falsche Koordinatensysteme verursachen oft diese verbreiteten Fehler.

3.3 Versionsverwaltung + Zusammenarbeit

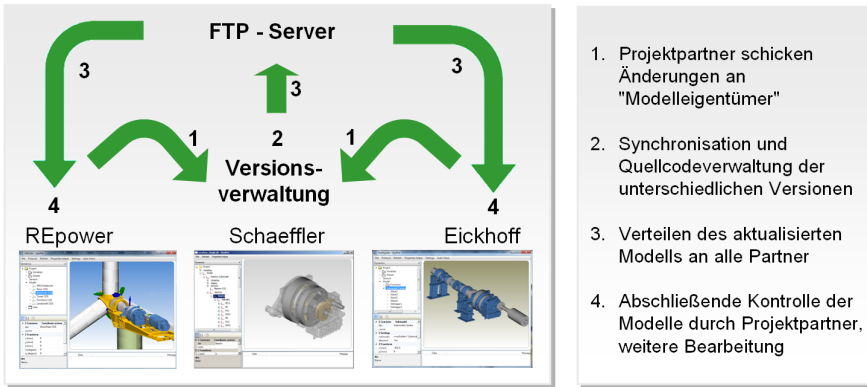


Abbildung 5: Erweiterter Prozess zum Modellaustausch

Arbeiten mehrere Partner in einem Konsortium an der gleichen Simulationssaufgabe, wie im ADTS-Wind II Projekt praktiziert, sind weiterführende Prozesse zur Organisation der Zusammenarbeit erforderlich. Jeder Partner sollte sich möglichst auf seine Kernkompetenz konzentrieren und diese in das Simulationsmodell einbringen. Um diese Arbeitsteilung effizient praktizieren zu können, müssen alle Partner parallel am gleichen Modell arbeiten. Hierzu wird eine in der Softwareentwicklung übliche Quellcodeverwaltung auch für die Verwaltung der Simulationsmodelle eingeführt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass immer am aktuellen Modell entwickelt wird und Übertragungsfehler ausgeschlossen sind. Der erweiterte Prozess zur Sicherung der Modellkonsistenz ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Datenaustausch wurde im ADTS-Wind II Projekt der Einfachheit halber über FTP-Server realisiert.

Mit diesem Vorgehen konnten im Rahmen des ADTS-Wind II Projekts sehr gute Erfahrungen in der Zusammenarbeit bei sehr komplexen Simulationsprojekten gesammelt werden.

Eine durchgängige Berechnungskette

Welches Berechnungsverfahren für die Auslegung von Produkten zum Einsatz kommt, ist hauptsächlich vom Auslegungsfokus, der zur Verfügung stehenden Entwicklungszeit und der benötigten Ergebnisqualität abhängig.

Um die oben bereits erwähnten Entwicklungsszenarien abdecken zu können, werden bei Schaeffler CAE-Werkzeuge für alle notwendigen Abstraktionsebenen entwickelt und eingesetzt.

... für verschiedene Abstraktionsebenen

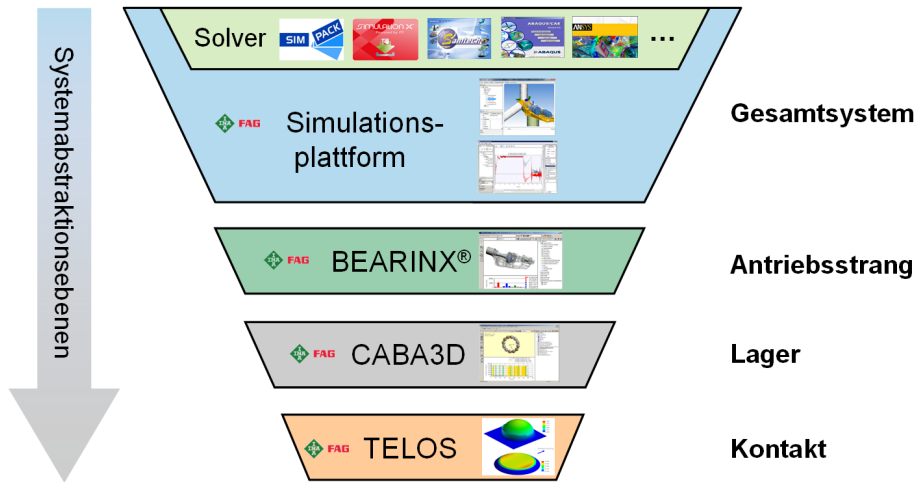


Abbildung 6: Durchgängiger Einsatz vernetzter Werkzeuge über alle Systemabstraktionsebenen

Abbildung 6 zeigt die verschiedenen Abstraktionsebenen mit den dazu gehörigen CAE-Programmen. Auf der obersten Abstraktionsebene, der Gesamtsimulation, kommt bei Schaeffler eine Vielzahl von kommerziellen CAE-Werkzeugen zum Einsatz. Da jedes dieser Tools auf verschiedenen Gebieten Stärken aber auch Schwächen besitzt, ist es notwendig, hier sehr breit aufgestellt zu sein. Ziel ist es, den Aufwand zur Erstellung von Simulationsmodellen möglichst gering zu halten und durch weitgehende Automatisierung, die Handhabung dieser Programme einem breiten Anwenderkreis, auch außerhalb der Berechnungsexperten, zu ermöglichen. Die Simulationsplattform stellt einen Pre- und Postprozessor sowie ein Werkzeug zur Generierung von beliebigen Simulationsworkflows zur Verfügung.

Eine Abstraktionsebene tiefer, dem Antriebsstrang, kann mit BEARINX®, dem bei Schaeffler weltweit zur Lagerauslegung eingesetzten Programm, deutlich detaillierter das Lagerverhalten untersucht werden. Unter Berücksich-

tigung der Innengeometrie der Lager sowie aller Belastungsverhältnisse am Antriebsstrang inklusive aller relevanten Elastizitäten, kann die Lagerbelastung sehr genau vorhergesagt werden.

Eine weitere Abstraktionsebene tiefer werden Lagersimulationen für speziell zu untersuchende dynamische Ereignisse mit dem Schaeffler Lagersimulationsprogramm CABA3D durchgeführt. Hierbei können die kinematischen Verhältnisse im Lager simuliert sowie spezielle charakteristische Kennwerte zur Bewertung der Lagerfunktion analysiert werden. [1]

Kontaktsimulationen schließen die Berechnungskette und ermöglichen den tiefen Einblick in das transiente Verhalten geschmierter Kontakte. Für diese Aufgabe steht bei Schaeffler das selbst entwickelte Simulationsprogramm TELOS zur 3D Simulation geschmierter Kontakte zur Verfügung. [1]

4 Werkzeuge: Simulation am Gesamtsystem – Die Simulationsplattform

Die Simulationsplattform wird im Hause Schaeffler hauptsächlich für interne Projekte, aber auch für Gemeinschaftsprojekte in Zusammenarbeit mit Kunden eingesetzt. Im Fokus stehen vor allem eine hohe Modellqualität sowie ein möglichst geringer Aufwand für Modellerstellung und Ergebnisauswertung. Dieses erreicht man nur mit Werkzeugen, welche die wiederkehrenden Prozessschritte abbilden und automatisieren. Abbildung 7 zeigt die Simulationsplattform, welche die verschiedenen Modelldefinitionen aufnimmt und automatisch Simulationsmodelle für verschiedene Solver erzeugen kann. Mit Hilfe der Simulationsplattform ist es so auch möglich „Nicht-Simulations-Experten“ den Zugang zu dynamischen Simulationen zu ermöglichen. [5]

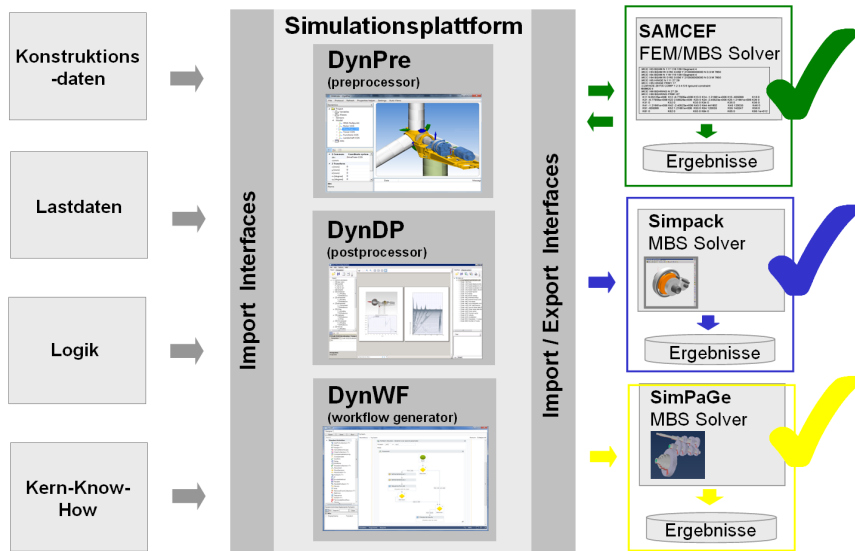


Abbildung 7: Schaeffler Simulationsplattform

Die Simulationsplattform hat automatisierte Schnittstellen zu vorhandenen, im Entwicklungsprozess ohnehin eingesetzten CAE-Werkzeugen, wie beispielsweise zu BEARINX®. Die Modellerstellung kann damit nicht nur drastisch beschleunigt, sondern auch eine garantierte Modellqualität erzeugt werden. Das Kern-Know-how der beteiligten Partner bleibt dabei geschützt. So können zum Beispiel Steueralgorithmen oder spezielle Berechnungsmodelle für Lager oder Zahnräder in Form von Bibliotheken (DLL) angebunden und während der Simulation an den Solver durch entsprechende „User-Elemente“ gekoppelt werden. Die Ergebnisse werden weitgehend automatisiert weiterverarbeitet, um immer gleiche Ergebnisauswertungen und Modellanimationen erzeugen zu können. Abbildung 8 zeigt den auf der Simulationsplattform basierenden Prozess, wie er zum Beispiel im Gemeinschaftsprojekt ADTS-Wind II zusammen mit den Firmen REpower Systems SE und Eickhoff Antriebstechnik GmbH angewendet wurde. [5]

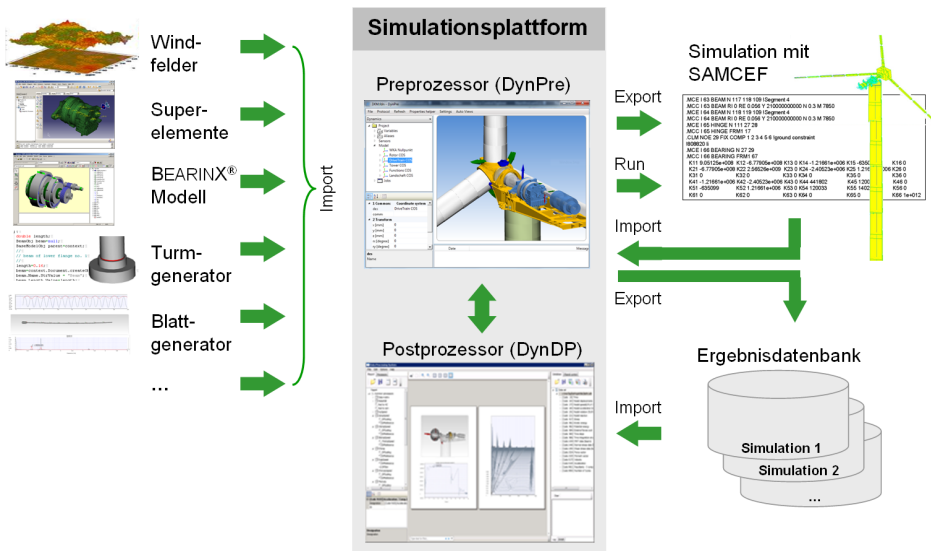


Abbildung 8: Durchgängiger Simulationsprozess (Beispiel Windenergieanlage)

Die Applikationen DynPre (Preprozessor), DynDP (Postprozessor) und DynWF (Workflow-Generator) bilden das Herzstück der Simulationsplattform (vgl. Abbildung 7) und werden im Folgenden kurz vorgestellt.

DynPre ist ein klassischer Preprozessor mit der Philosophie, selbst möglichst wenig spezielles Fachwissen bezogen auf die jeweilige Simulationenaufgabe in sich zu vereinen. Vielmehr werden allgemeine, immer wieder benötigte Aufgaben zur Aufbereitung und Verarbeitung des Simulationsmodells automatisiert. Dazu gehören unter anderem Import- und Export-Schnittstellen sowie Jobs zur Ausführung von Operationen am Projekt oder Modell. Über eine Scripting-Schnittstelle auf Basis von C# lassen sich sehr mächtige Funktionen komfortabel anknüpfen. [5]

Der Postprozessor DynDP bildet den zweiten wichtigen Bestandteil der Simulationsplattform. Neben der Darstellung und Weiterverarbeitung der Simulationsergebnisse für alle in DynPre definierten Sensoren, bietet DynDP auch die Möglichkeit das 3D Simulationsmodell mit den Sensoren zu koppeln und Animationen der Modelle zu generieren. Zusammengefasst lassen sich folgende Hauptfunktionen für DynDP angeben [5]:

-
- Effiziente Verarbeitung riesiger Datenmengen durch Datenbank basierte Verwaltung und Verarbeitung der Simulationsergebnisse
 - 2D-Visualisierung aller Simulationsergebnisse über der Zeit sowie Darstellung der Orbitalbewegungen der Komponenten
 - Weiterverarbeitung der Simulationsergebnisse durch vordefinierte Prozessoren z.B. für Frequenzspektren oder komplette Wasserfalldiagramme
 - Einfacher Vergleich verschiedener Simulationsrechnungen untereinander
 - 3D Animationen gekoppelt mit 2D Ergebnisdarstellungen

Zur Ergebnisinterpretation und Modellüberprüfung ist die 3D Animation der Simulationsergebnisse ein wesentliches Hilfsmittel. So können Deformationen elastischer Bauteile bei unterschiedlichen Anregungsmechanismen oder mögliche Modellierungsfehler, z.B. lose Teile animiert dargestellt und untersucht werden.

Bei komplexen Systemen ergibt sich häufig das Problem, dass die Deformationen einzelner Komponenten sehr unterschiedlich sind. So treten bei einer Windkraftanlage an der Turmspitze Auslenkungen im Meterbereich auf. In ähnlichen Größenordnungen können sich die Rotorblätter unter Windlasten verformen. Im Bereich des Antriebstranges sind innerhalb der Wälzlager und Getriebestufen Wellendurchbiegungen im μm -Bereich interessant. Bei einer Animation des Gesamtsystems in DynDP ist es deshalb dem Benutzer möglich, die Skalierung der Deformationen lokal für jede Komponente anzupassen.

Programmintern wird außerdem für jede der einzelnen elastischen Komponenten, wie z.B. Wellen, Zahnräder, FE-Strukturen und Rotorblätter sowohl die Starrkörperbewegung als auch die elastische Deformation berechnet. Beide lassen sich getrennt skalieren. So können besondere Effekte wie z.B.

- Zentrierungseffekte
- Schiefstellung von Planeten und Sonnewellen in Planetenstufen
- Große Bewegungen der Planeten und kleine Biegungen am Planetenbolzen
- Wellenschwingungen bei großen Starrkörperbewegungen

auch bei komplexen Modellen einwandfrei dargestellt und analysiert werden.

Der Unterschied zwischen Starrkörperbewegung und elastischer Deformation ist an dem einfachen Windkraftgetriebe in Abbildung 9 zu sehen. Infolge der Zahnkräfte und der Abstützung der Planetenräder am Bolzen tritt eine elastische Deformation des Planetenbolzens auf, die entsprechend skaliert und trotz der großen Starrkörperbewegung des Planetenträgers und der Planeten gut visualisiert werden kann.

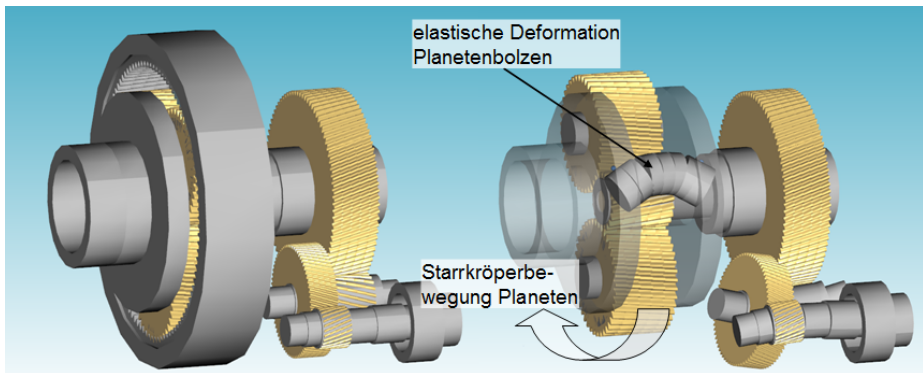


Abbildung 9: unbelasteter Zustand (links) und Animation (rechts) eines einfachen Windkraftgetriebes. (Skalierungsfaktor für elastische Deformation:1000 (für dargestellten Planetenbolzen: 5000)

Mit dem Workflow-Generator DynWF, basierend auf der Workflow Foundation des Microsoft .Net Frameworks, lassen sich übergreifend über DynPre und DynDP sehr komfortabel komplette Workflows für Simulationaufgaben definieren. So können beispielsweise Workflows zur Optimierung, für Parameterstudien, zur Berechnung von Ermüdungslasten (vgl. Abbildung 10) sowie zur erweiterten Ergebnisverarbeitung generiert werden. [5]

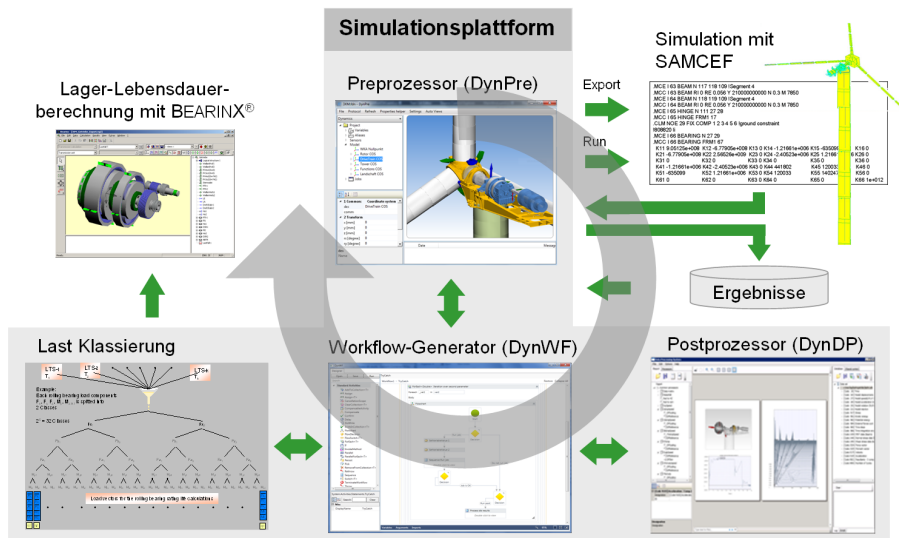


Abbildung 10: Workflow zur Simulation von Ermüdungslasten (Beispiel Windenergieanlage)

5 Zusammenfassung

Die in diesem Beitrag vorgestellte Prozesskette und die entsprechenden Werkzeuge haben sich als geeignet erwiesen, eine Gesamtsimulation einer Windkraftanlage erfolgreich durchzuführen. Insbesondere ermöglichen sie einen robusten und durchgängigen Prozessablauf, der eventuelle Fehlerquellen reduziert und eine firmenübergreifende Zusammenarbeit mit gleichzeitigem Know-How-Schutz gewährleistet.

Ein Simulationsprozess für komplexe System erfordert eine Reihe von Maßnahmen, die am Ende zu einem Simulationsmodell mit geforderter Qualität und Tiefe führen. Dieses wurde mit einem modularen Aufbau durch Submodelltechnik und einer durchgängigen Berechnungskette konsequent umgesetzt.

Einen zentralen Bestandteil nimmt dabei die Schaeffler-Simulationsplattform ein. Sie besitzt automatisierte Schnittstellen zu vorhandenen, im Entwicklungsprozess ohnehin eingesetzten CAE-Werkzeugen, wie beispielsweise dem Schaeffler Programm BEARINX® oder den MKS-Programmen Samcef oder Simpack. Die Schaeffler-Simulationsplattform verfügt über einen eigenen Pre- und Postprozessor. Während der Preprozessor einen effizienten

Modellaufbau mit entsprechenden Automatisierungsmöglichkeiten sicherstellt, liefert der Postprozessor DynDP die Möglichkeit, Simulationsergebnisse im Zeit- und Frequenzbereich zu analysieren. Durch eine Animation der Berechnungsergebnisse lassen sich weiterhin Effekte, wie Schiefstellen der Sonnenwelle im Getriebe der WEA oder Durchbiegungen der Planetenbolzen darstellen und analysieren.

Die vorgestellten Prozesse und Werkzeuge werden nicht nur für WEA sondern auch bei anderen Anwendungen z.B. im Bereich Automotive bei der Berechnung von Getrieben und Turboladern erfolgreich eingesetzt.

Literatur

- [1] S. Lenssen, A. Degtiarev, Schaeffler KG, „Simulation von Windenergieanlagen - Prozesse, Modellverbesserungen und Schnittstellen“, ATK 2009.
- [2] F.-D. Krull, S. Schemmert, Eickhoff Antriebstechnik GmbH, S. Lenssen, A. Degtiarev, M. Kohlhepp, R. Godau, Schaeffler KG, A. Ribbentrop, R. Hambrecht, REpower Systems AG, „Prozessorientierte Mehrkörpersimulation von Triebsträngen für Windenergieanlagen“, SIMPEP 2009.
- [3] J. Sarfert, S. Lenssen, Schaeffler KG, „BEARINX® - Kompetenz für Wälzlagerberechnung“, Broschüre, 1998.
- [4] A. Degtiarev, S. Lenssen, Schaeffler KG, „BEARINX-SIMPACK: Simulation processes are under control“, SIMPEP 2009.
- [5] A. Degtiarev, S. Lenssen, R. Godau, M. Kohlhepp, Schaeffler Technologies & Co. KG, F.-D. Krull, S. Schemmert, Eickhoff Antriebstechnik GmbH, A. Ribbentrop, R. Hambrecht, REpower Systems AG, „ADTS II - Gemeinschaftliche Simulation einer Windenergieanlage - Industrieller Ansatz, Modellverbesserung durch Prozessoptimierung“, ATK 2011.



Effektives Risikomanagement in Entwicklungsprojekten

Josef Oehmen

*Engineering Systems Division and Department of Mechanical Engineering;
Massachusetts Institute of Technology*

Large-scale engineering programs are tricky. If they are not cancelled altogether, they often suffer from significant cost overruns, schedule delays, and shortcomings in technical performance. One of the major root causes are risks, i.e. various uncertainties impacting the objectives of the program. In order to effectively manage those risks, organizations have to a) develop a structure to identify and describe engineering-related risks, b) prioritize their risks and c) implement effective risk management processes. This paper gives an overview of some current findings and focusses in particular on empirically validated best practices.

1 Risikomanagement als entscheidender Erfolgsfaktor grosser Entwicklungsprojekte

Für den Zweck dieses Papers wird Risiko als der Effekt von Unsicherheiten auf die Zielerreichung in Entwicklungsprojekten definiert [1]. Die Entwicklung „neuer“ Produkte und Systeme geht immer mit Unsicherheiten einher (siehe Abschnitt 2 und 3) und ist daher auch immer risikobehaftet. Diese Unsicherheiten und das Management der resultierenden Kosten-, Zeit- und Leistungsrisiken sind ein entscheidender Erfolgsfaktor in der Ausführung von Entwicklungsprojekten.

Beispielsweise liegen die durchschnittlichen Mehrkosten in der Entwicklung bei Projekten des US Departments of Defense bei 42%, sowie bei 25% in der Produktion, mit einer durchschnittlichen Zeitverzögerung von 22 Monaten. Dies resultierte in Mehrkosten in der Entwicklung von 45 Milliarden US\$ in 2011. Eine der Hauptursachen, die von Kritikern des amerikanischen Bundesrechnungshofes angeführt werden, ist mangelndes Risikomanagement in der Entwicklung [2–4]. In verwandten Bereichen ist die Problematik ähnlich stark – wenn nicht stärker – ausgeprägt. Die durchschnittlichen Mehrkosten in Softwareentwicklungsprojekten werden mit 30-40% angegeben [5], sowie mit 28-50% für komplexe Infrastrukturprojekte [6].

Eine Reihe von Studien haben die grundsätzliche Wichtigkeit von Risikomanagement und den Beitrag zum Entwicklungserfolg aufgezeigt und diskutiert, so z.B. [7–11]. Beispielhaft sei hier die Liste der 10 Hauptherausforderungen im Management grosser Entwicklungsprojekte aus [11] aufgezeigt, unter denen sich sowohl einzelne Risiken als auch Risikomanagement an sich wiederfindet:

- Reaktives anstatt proaktives Entwicklungsmanagement
- Unstabile, unklare und unvollständige Anforderungen
- Mangelndes proaktives Management von Unsicherheiten und Risiken
- Unzureichende Koordination und Abstimmung der Entwicklung zwischen verschiedenen Organisationen
- Lokale anstatt globale Optimierung der Entwicklungsprozesse
- Unklare Rollen, Verantwortlichkeiten und Rechenschaftspflicht
- Mangelnde fachliche Qualifikation, Teamfähigkeit und unproduktive Unternehmenskultur
- Unzureichende Planung in frühen Phasen des Entwicklungsprojektes
- Unabgestimmte und schlecht integrierte Leistungskennzahlen
- Schlechtes Vertragsmanagement und Koordination zwischen öffentlichen Auftraggebern und Industrie

2 Strukturierung von Entwicklungsrisiken

Um Entwicklungsrisiken effektiv handhaben zu können, muss eine Taxonomie verwendet werden, die ihnen gerecht wird und ihre Identifikation und Beschreibung vereinfacht. Auf der Ursachenseite (den „Unsicherheiten“) müssen daher zwei grundsätzliche Kategorien unterschieden werden: 1. Unsicherheiten bzgl. Kundenanforderungen sowie 2. Unsicherheiten in der Projektausführung als solche. Beide Kategorien von Unsicherheiten lassen sich nach (den gleichen) unterschiedlichen Zielaspekten strukturieren, z.B. Projekttaspekte (direkte Entwicklungsprojektkosten, Projektlaufzeit, Prozessqualität etc)

sowie Systemaspekte (Lebenszykluskosten eines Systems, Lieferzeit, technische Leistungsfähigkeit etc.).

Unsicherheiten bezüglich Kundenanforderungen beinhalten sämtliche Unsicherheiten, die sich auf die Nutzwertfunktion des Kunden (oder weiter gefasst, der unterschiedlichen Stakeholder des zu entwickelnden Systems) auswirken. Sie können auch als „Effektivitätsunsicherheiten“ bezeichnet werden, da sie primär die Zielsetzung des Entwicklungsprojektes adressieren. Hierzu zählen:

1. Unsicherheiten auf Kundenseite bezüglich des tatsächlichen Verlaufs der Nutzwertfunktion (z.B. Wichtigkeit der Höchstgeschwindigkeit).
2. Damit verwandt, Unsicherheiten auf Kundenseite bezüglich des trade-offs zwischen unterschiedlichen Systemaspekten (z.B. trade-off zwischen erreichbarer Höchstgeschwindigkeit und durchschnittlichem Verbrauch).
3. Unsicherheiten bezüglich des Verständnisses der Kundenanforderungen durch das Entwicklungsteam (z.B. Vollständigkeit, Korrektheit und Konfliktfreiheit der Anforderungsliste).

Unsicherheiten in der Projektausführung beziehen sich auf das Management und die Ausführung der Entwicklungsaktivitäten als solches. Diese Unsicherheiten können auch als „Effizienzunsicherheiten“ bezeichnet werden, da sie primär die Qualität und Effizienz der Projektausführung betreffen. Hierzu zählen beispielsweise Unsicherheiten bezüglich:

1. Qualität und Genauigkeiten von Plänen und Schätzungen (z.B. Kosten, Laufzeiten)
2. Stabilität der Projektausführung
3. Qualität der Arbeit von Entwicklungsdienstleistern
4. Leistungsfähigkeit eingesetzter Technologien

3 Hauptrisiken in der Entwicklung

Risiken lassen sich unterschiedlich quantifizieren. Im folgenden Beispiel wurden etwa 25 Entwicklungsrisiken im Rahmen einer Umfrage bezüglich Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensausmass bewertet. Die Ergebnisse wurden miteinander multipliziert, um eine Gesamtpriorität der einzelnen Risiken zu erhalten. Anschliessend wurden diese in 8 Hauptkategorien zusammengefasst und die jeweiligen Durchschnitte gebildet. Analog wurden Aktivitäten zur Bewältigung der verschiedenen Risiken bewertet und zusammengefasst (siehe Bild 1).

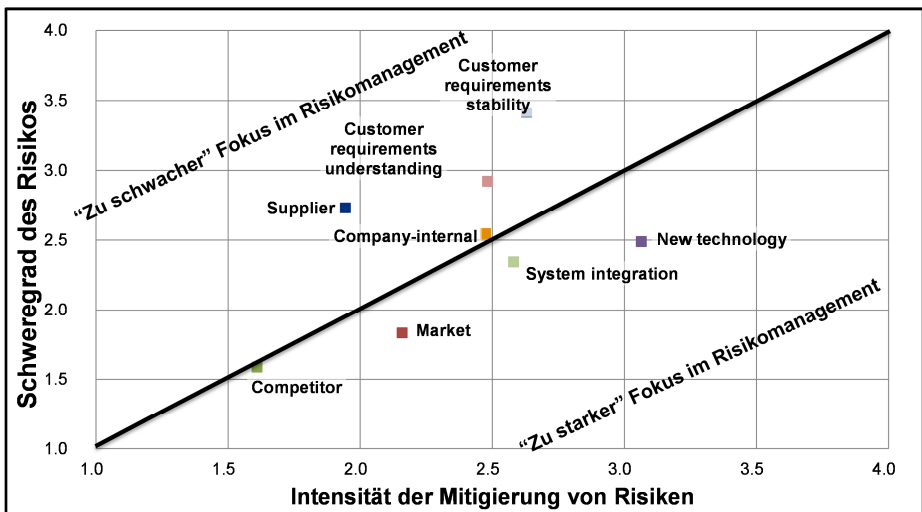


Bild 1: Verhältnis von Schweregrad und Mitigationsintensität unterschiedlicher Entwicklungsrisiken

Was hierbei insbesondere auffällt ist, dass die „technischen“ Risiken, wie beispielsweise die Verwendung neuer Technologien oder Risiken im Zusammenhang mit der Systemintegration, relativ gut beherrscht sind. Nicht nur ist der Schweregrad der Risiken im Mittelfeld anzusiedeln, sondern die Risiken werden auch überdurchschnittlich stark mitigiert.

Anders stellt es sich jedoch für Anforderungs- und Supplier-Risiken (in diesem Fall Entwicklungsdienstleister) dar. Anforderungsbezogene Risiken – ihre Stabilität sowie die Tiefe ihres Verständnisses – führen die Risiken in Bezug auf den Schweregrad. Die Intensität der Mitigation ist aber lediglich im Mittelfeld anzusiedeln. Dasselbe gilt, etwas weniger stark, auch für Risiken, die in der Zusammenarbeit mit Entwicklungsdienstleistern und Systemlieferanten in der Entwicklungsphase entstehen.

Da Schweregrad und Mitigationsintensität voneinander abhängen, kann die Empfehlung nicht einfach lauten, z.B. Technologierisiken weniger stark zu mitigieren (dies könnte z.B. in der überproportionalen Steigerung des Risikos münden). Jedoch scheint es ratsam, im Sinne einer Grenzkostenbetrachtung den „nächsten Risikomanagement-Euro“ in die Mitigation von Kunden- und Lieferanten-seitigen Risiken zu investieren.

4 Effektives und effizientes Management von Entwicklungsrisiken

Im Rahmen der Forschungsarbeiten, die im vorhergehenden Absatz dargelegt wurden, ist auch die Effektivität und Effizienz unterschiedlicher Risikomanagement-Praktiken untersucht worden [10], die im folgenden zusammenfassend dargestellt wird. Im Rahmen einer grossangelegten Umfrage (n=250 Risiko- und Entwicklungsmanager) wurden detailliert Risikomanagement-Praktiken auf ihren Zusammenhang mit verschiedenen Aspekten des Erfolges von Entwicklungsprojekten untersucht (z.B. Akzeptanz von Risikomanagement im Projekt; Projektstabilität; Erreichung von Kosten-, Zeit- und technischen Leistungszielen). Bezüglich der Effektivität des Risikomanagements sind die folgenden Praktiken besonders wichtig:

1. Fokussierung der Risikomanagementaktivitäten auf das Schaffen und Schützen von Kundenwert: Es muss klar ersichtlich sein, wie Risikomanagementaktivitäten einen Kundennutzen generieren, bzw. wie die Risiken diesem entgegenstehen.
2. Schaffung von Transparenz bezüglich Projektrisiken: Risikomanagement muss relevante Risiken vollständig identifizieren, sich also weder in der Identifikation von „Alibi-Risiken“ verlieren, noch signifikante Lücken lassen.
3. Unterstützung kritischer Entscheidungen durch Risikomanagement: Beispielsweise können Kosten- und Zeitpläne signifikant durch Risikoabschätzungen aufgewertet werden (z.B. durch die Ermittlung von Wahrscheinlichkeitsverteilung zukünftiger Kosten), aber auch andere Entscheidungen wie Meilensteinreviews und Technologieentscheidungen.
4. Minimierung der Risiken, denen ein Entwicklungsprojekt ausgesetzt ist: Risikomanagement muss im wirtschaftlich optimalen Rahmen die Auftretenswahrscheinlichkeit von Risiken reduzieren
5. Maximierung der Widerstandsfähigkeit des Entwicklungsprojektes gegenüber Risikoauswirkungen: Restrisiken werden immer verbleiben – sowohl aus fundamentalen erkenntnistheoretischen wie auch wirtschaftlichen Gründen. Entwicklungsprojekte müssen in der Lage sein, diese Risiken zu absorbieren, z.B. durch passende finanzielle, terminliche und technologische Reserven.

Bezüglich der Effizienz des Risikomanagements in Entwicklungsprojekten wurden folgende Praktiken identifiziert:

1. Entwicklung von Risikomanagementfähigkeiten und Ressourcen: Entwicklungsorganisationen müssen sowohl ausreichend Expertise entwickeln als

-
- auch personelle und technische Ressourcen zur Verfügung haben, Risikomanagementaktivitäten erfolgreich durchzuführen.
2. Anpassung und Integration von Risikomanagement in das Entwicklungsmanagement: Sowohl Projektmanager als auch Ingenieure sind im Tagesgeschäft stark beschäftigt. Risikomanagement-Aktivitäten müssen existierende Aktivitäten sinnvoll ergänzen oder ersetzen, und nicht als eine zusätzliche Aktivität eingeführt werden, deren Nutzen unklar und schlecht integriert bleibt.
 3. Unterstützung von kontinuierlichen Verbesserungsprozessen: Risikomanagement wird immer auch Schwachstellen in der Organisation und den Entwicklungsprozessen aufdecken. Diese Erkenntnisse müssen sinnvoll mit existierenden Verbesserungsprogrammen im Unternehmen integriert werden.
 4. Regelmässige Überwachung und Überarbeitung der Risiken, der Mitigierungsaktivitäten, sowie der Risikomanagement-Prozesse: Damit die Ergebnisse des Risikomanagements relevant bleiben, müssen sowohl die identifizierten Risiken als solche als auch die abgeleiteten Management-Massnahmen regelmässig überprüft werden. Am wichtigsten ist jedoch eine periodische Überprüfung und Verbesserung des Risikomanagementprozesses an sich, um eine leistungsfähige Integration in die Entwicklung sicherzustellen.

Literatur

- [1] ISO, *ISO 31000:2009(E) - Risk management - Principles and guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
- [2] GAO, *Defense Acquisitions - Major Weapon Systems Continue to Experience Cost and Schedule Problems under DOD's Revised Policy (GAO 06-368)*. Washington, D.C.: United States Government Accountability Office, 2006.
- [3] GAO, *Defense Acquisitions - Managing Risk to Achieve Better Outcomes (GAO 10-374T)*. Washington, D.C.: United States Government Accountability Office, 2010.
- [4] GAO, *Defense Acquisition - Assessments of Selected Weapon Programs - GAO-12-400SP*, no. March. Washington D.C.: United States Government Accountability Office, 2012.

-
- [5] M. Jørgensen and K. Moløkken-Østvold, "How large are software cost overruns? A review of the 1994 CHAOS report," *Information and Software Technology*, vol. 48, no. 4, pp. 297–301, Apr. 2006.
- [6] C. C. Cantarelli, B. Flyvbjerg, E. J. E. Molin, and B. van Wee, "Cost Overruns in Large-scale Transportation Infrastructure Projects: Explanations and Their Theoretical Embeddedness," *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 10, no. 1, pp. 5–18, 2010.
- [7] J. Mu, G. Peng, and D. L. MacLachlan, "Effect of risk management strategy on NPD performance," *Technovation*, vol. 29, no. 3, pp. 170–180, Mar. 2009.
- [8] W. F. Jacob and Y. H. Kwak, "In search of innovative techniques to evaluate pharmaceutical R&D projects," *Technovation*, vol. 23, no. 4, pp. 291–296, Apr. 2003.
- [9] T. Raz, A. J. Shenhar, and D. Dvir, "Risk management, project success, and technological uncertainty," *R and D Management*, vol. 32, no. 2, pp. 101–109, Mar. 2002.
- [10] A. Olechowski, J. Oehmen, W. Seering, and M. Ben-Daya, "Characteristics of successful risk management in product design," in *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2012, Dubrovnik, Croatia, May 21-24 2012*, 2012, no. 2007, pp. 269–278.
- [11] J. Oehmen, B. W. Oppenheim, D. Secor, E. Norman, E. Rebentisch, J. A. Sopko, M. Steuber, R. Dove, K. Moghaddam, S. McNeal, M. Bowie, M. Ben-Daya, W. Altman, and J. Driessnack, *The Guide to Lean Enablers for Managing Engineering Programs*, Version 1. Cambridge, MA: Joint MIT-PMI-INCOSE Community of Practice on Lean in Program Management, 2012, p. 214.



Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz

Christian Weber

*Inst. für Maschinen- und Gerätekonstruktion, Fachgebiet Konstruktionstechnik
Technische Universität Ilmenau*

Almost exactly 12 years ago – at the DFX Symposium 2000 – the author for the first time presented the approach of modelling products and product development processes based on product characteristics and properties. This contribution gives an overview over the backgrounds of this approach, shows the approach itself and asks what came out of it.

1 Einleitung

Auf dem DFX-Symposium 2000, seinerzeit noch in Schnaittach, hat der Autor dieses Beitrages zum ersten Mal über die Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen auf Basis von Produktmerkmalen (englischer Begriff nach Andreasen [1]: *characteristics*) und Produkteigenschaften (*properties*) berichtet. Etwas später erhielt der Ansatz die Bezeichnung:

- „Characteristics-Properties Modelling“ (CPM) für die Produkt(modell)-sicht und
- „Property-Driven Development“ (PDD) für die Prozesssicht

Der Titel des Beitrages aus dem Jahr 2000 lautete: „Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozessmodells“ [2]. Der Beitrag enthielt im Prinzip bereits alle

wesentlichen Grundlagen des CPM/PDD-Ansatzes, fokussierte nach einer Darstellung der Grundlagen aber auf CAx-Werkzeuge für die Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses. Dieses Thema ist immer noch relevant (worauf noch zurückzukommen sein wird), es sind zwischenzeitlich aber auch andere Untersuchungen auf der Basis des CPM/PDD-Ansatzes angestellt worden.

Der Autor ist den Organisatoren des DFX-Symposiums 2012 dankbar, 12 Jahre nach dem allerersten Beitrag eine kritische Zwischenbilanz bezüglich des CPM/PDD-Ansatzes zu ziehen: Was wurde aus dem Ansatz, was hat er beigetragen, was ist offen geblieben?

2 Stand in Wissenschaft und Praxis, Hintergründe von CPM/PDD

Es ist im Rahmen des hier zur Verfügung stehenden Platzes unmöglich, den Stand der Wissenschaft auf dem Gebiet der Konstruktionstheorie und -methodik umfassend darzustellen, obwohl dieser im Jahr 2000, dem Zeitpunkt der ersten Veröffentlichung über das Modellieren von Produkten und Produktentwicklungsprozessen auf der Basis von Merkmalen und Eigenschaften (CPM/PDD), durchaus maßgebend war, um überhaupt einen neuen Ansatz zu präsentieren. Stattdessen sollen – weitgehend ohne genaue Referenzen – nur die wichtigsten Stichworte zusammengefasst werden:

- Stark dominant waren (und sind zum Teil noch) die Modelle aus dem europäischen, insbesondere deutschsprachigen Raum. Sie gehen auf Entwicklungen verschiedener Wissenschaftler¹ in den 1950er bis 1970er Jahren zurück und wurden ab 1977 in der Richtlinienreihe 222x des VDI zusammengefasst. Am wichtigsten und bekanntesten ist die Richtlinie VDI 2221 [3] als genereller Rahmen („Dachrichtlinie“). Die Essenz ist ein generisches Vorgehensmodell für den Produktentwicklungsprozess, das mit der Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung beginnt und schrittweise (in mehreren „Entwicklungsphasen“) über funktionale und Prinzipüberlegungen bis zum Entwurf und zur Detaillierung der Lösung führt. Das Hauptanliegen dieses und ähnlicher Vorgehensmodelle ist die Unterstützung von Produktentwicklern bei der systematischen Lösungsfindung,

¹ Exemplarisch genannt seien Hansen (Ilmenau), Rodenacker (München), Hubka (Zürich) bzw. später Hubka/Eder und Eder/Hosnedl, Koller (Aachen), Pahl (Darmstadt), Beitz (Berlin), Roth (Braunschweig) sowie Ehrlenspiel (München).

bei der Bewertung von Lösungsalternativen sowie bei der systematischen Ausarbeitung des gewählten Konzeptes. Fokus ist in den meisten Publikationen der Grenzfall der völligen Neukonstruktion – wohl wissend, dass diese Konstruktionsart gegenüber der Varianten- und Anpassungskonstruktion in der Praxis eher selten vorkommt.

Es stand und steht stets die Modellierung des Entwicklungs**prozesses** im Vordergrund, Fragen der **Produkt**modellierung bzw. der Produktmodelle werden nicht explizit behandelt. Rechnerbasierte Methoden und Werkzeuge, die in praktischen Entwicklungsprozessen heute eine wichtige, teilweise dominante Rolle spielen, werden überhaupt nicht angesprochen (was natürlich mit dem Alter der betreffenden Ansätze zu tun hat) und sind auch in jüngeren Publikationen, die auf der gleichen Basis aufbauen, eher ein Randthema.

- Abgesehen von der Gemeinsamkeit des im vorangegangenen Absatz umrissenen Phasenmodells gab und gibt es innerhalb der europäischen/deutschsprachigen Konstruktionstheorie und -methodik durchaus verschiedene Ausprägungen („Schulen“), die sich in der Schwerpunktsetzung, zum Teil auch in den Begriffen voneinander unterscheiden. Dies hat immer wieder Anlass gegeben, über eine Zusammenfassung bzw. Konsolidierung des verfügbaren Wissens nachzudenken (z.B. [4, 5]).
- Ein völlig anderes Modell, die Theorie des „Axiomatic Design“, hat ab 1990 Nam Suh vorgestellt und propagiert [6, 7]. Der Kern dieser Theorie besteht darin, dass es sich beim Entwickeln im Wesentlichen um eine Transformation (englisch: *mapping*) handelt, und zwar aus dem „Funktionsraum“ (*functional space*) in die „physikalische Welt“ (*physical space*). „Europäische/deutschsprachige Schulen“ der Konstruktionstheorie und -methodik einerseits und „Axiomatic Design“ andererseits gelten bis heute als nahezu unvereinbar.
- Nicht unerwähnt bleiben soll das „Function-Behaviour-Structure Model“ von John Gero. Hierzu gab es im Jahr 1990 eine erste Veröffentlichung [8], die allerdings aus dem Bereich der KI-Forschung stammt und in der allgemeinen Konstruktionsforschung erst mit Zeitverzögerung zur Kenntnis genommen wurde.
- Vajna, später Vajna und Bercsey prägten – übrigens erstmals auf dem DFX-Symposium 1997 [9] – den Begriff der Autogenetischen Konstruktionstheorie, deren Weiterentwicklung in [10] ausführlich beschrieben ist. Diese Theorie beschreibt die Entstehung eines Produktes als Analogie zur Evolution von Lebewesen, d.h. als einen kontinuierlichen Entwicklungspro-

zess von Objekten, Techniken und Technologien. Produktentwicklung wird als fortlaufende Optimierung einer oder mehrerer Ausgangslösungen (= Population) verstanden, wobei die Produkteigenschaften als Gene in einem Chromosom beschrieben werden.

- In den 1980er und 1990er Jahren – Jahrzehnte **nach** der Formulierung der ersten Konstruktionstheorien und -methodiken – entstand als neuer Zweig die empirische Konstruktionsforschung: In Laborumgebungen (mit erfahrenen Praktikern, oft auch mit Studenten) – wegen der damit verbundenen Schwierigkeiten seltener: direkt in der Industrie – wurde untersucht, wie Entwicklungstätigkeit tatsächlich abläuft. Diese Arbeiten wurden begonnen in Großbritannien (University of Cambridge), dann in Deutschland (TU Darmstadt, TU München) sowie den Niederlanden (TU Delft) weitergeführt, zum Teil in Kooperation mit Sozialwissenschaftlern und Psychologen (deren empirische Untersuchungsmethoden zum Einsatz kommen). Die Ergebnisse waren und sind stets interessant, teilweise überraschend.
- Während sich die Konstruktionstheorie und -methodik in der Lehre hervorragend bewährte (und bewährt), wurde ab den 1990er Jahren zunehmend die mangelnde Akzeptanz in der Praxis festgestellt und analysiert (siehe z.B. Franke [11], Birkhofer [12]).
- In der Praxis war stattdessen im großen Stil die Ausrüstung der Produktentwickler mit immer neuen und immer komplexeren Software-Werkzeugen zur Unterstützung von Entwurf, Berechnung/Simulation und Datenhaltung angelaufen (CAx-Systeme). Bereits 1998 prägten Spur und Krause den Begriff des (vollständig) Virtuellen Produktes und der (vollständig) Virtuellen Produktentwicklung [13].
Von wenigen Ausnahmen abgesehen (etwa der von Prof. H. Meerkamm und seinen Mitarbeitern betriebenen Entwicklung des Programmsystems mfk am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg [14]) liefen die Forschungsarbeiten auf den Gebieten Konstruktionstheorie und -methodik einerseits und Rechnerunterstützung des Entwicklungsprozesses andererseits leider weitgehend ohne Querbezüge ab. Das hatte (und hat) zweierlei negative Konsequenzen: Die Konstruktionswissenschaft hat sich aus der Entwicklung neuer Software-Werkzeuge weitgehend verabschiedet. Dafür findet Software-Entwicklung, -Einführung und -Anwendung in der Praxis ohne jeglichen methodischen Hintergrund statt (worunter Produktentwickler in der Praxis of leiden).

-
- Der Fokus der im Ursprung aus dem Maschinenbau stammenden Konstruktionstheorie und -methodik weitete sich auf: Die Produkte wurden „mechatronischer“, die vorhandenen Erkenntnisse und Erfahrungen wurden auf die Entwicklung von domänenübergreifenden Produkten und Systemen übertragen (siehe z.B. VDI-Richtlinie 2206, [15]). Im Weiteren wurde (und wird) die Entwicklung kombinierter Sach- und Dienstleistungen (*Product-Service Systems* [PSS], „hybride Leistungsbündel“) betrachtet.
 - Die Thematik des X-gerechten Konstruierens (*Design for X*, DFX) hat sich erheblich aufgeweitet: Neben den traditionellen Themen des festigkeits-, fertigungs- und montagegerechten Konstruierens traten neue Aspekte, z.B. *Design for Quality* (DFQ) und *Design for Environment* (DFE). Allerdings war (und ist vielfach noch) der Bezug zwischen allgemeiner Konstruktionstheorie und -methodik und X-gerechtem Konstruieren eher schwach ausgeprägt.

Seit 2000 hat sich das Bild weiter verändert – es ist bemerkenswerte Bewegung in die Konstruktionstheorie und -methodik gekommen, viele neue Ansätze wurden und werden präsentiert und diskutiert:

- Der Autor stellte – wie bereits gesagt: erstmals auf dem DFX-Symposium 2000 [2] – den Ansatz der Produkt- und Prozessmodellierung auf der Basis von Produktmerkmalen und -eigenschaften vor. Auf ihn wird im weiteren Verlauf dieses Beitrages näher eingegangen.
- Albers und Matthiesen führten das Contact & Channel Model (C&CM) ein [16, 17]. Es baut auf früheren Erkenntnissen zu Wirkflächenpaarungen auf, bietet jedoch in zwei Hinsichten Erweiterungen: Einerseits werden ausgehend von den Wirkflächenpaarungen (*contacts*) und den dazwischen liegenden, im Allgemeinen freier gestaltbaren Stützstrukturen (*channels*) neue Gestaltungsmethoden präsentiert. Andererseits wird die Sicht von den bislang rein mechanischen Kontakten auf fluidische, elektrische, sogar informationstechnische „Kontakte“ erweitert.
- Hatchuel und Weil erklärten in ihrer C-K-Theorie (Concept-Knowledge Theory, [18]) die Tätigkeit „Produkte entwickeln“ als wechselseitiges Erweitern des „Konzeptraumes“ (vereinfacht: Generierung von Lösungen) und des „Wissensraumes“ (vereinfacht: Überprüfung/Analyse der Lösungen).

-
- Lindemann [19] präsentierte das so genannte „Münchener Vorgehensmodell“ (MVM) des Produktentwicklungsprozesses, welches sich insbesondere durch flexible Vorgehensstrategien und Methodenvielfalt (einschließlich rechnerbasierter Methoden und Werkzeuge) auszeichnet. Außerdem wird auf das Management von Entwicklungsprozessen fokussiert.

Wie zum Teil bereits aus den Literaturangaben hervorgeht, hat gerade das DFX-Symposium (bzw. sein Vorgänger, das „Symposium Fertigungsge-rechtes Konstruieren“) zahlreichen neuen Ideen eine Präsentations- und Diskussionsplattform geboten

Der im Folgenden näher erläuterte Ansatz der Produkt- und Prozessmodellierung auf der Basis von Produktmerkmalen und -eigenschaften (CPM/PDD) ergab sich in den späten 1990er Jahren aus konstruktiven Projektarbeiten mit Studentengruppen. Diese Arbeiten hatten wir seinerzeit genutzt, um den Umgang der Akteure mit Methodiken und Methoden zu studieren (eine Art empirische Studie, wenn auch wenig formalisiert). Die Grundidee zu CPM/PDD stammt vom Autor gemeinsam mit Horst Werner, damals wissenschaftlicher Mitarbeiter, später Oberingenieur am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD der Universität des Saarlandes.

Vor dem Hintergrund des umrissenen Standes der Wissenschaft (insbesondere in der Zeit vor 2000) hat der CPM/PDD-Ansatz folgende Ziele²:

- Es sollte auf den vorhandenen Erkenntnissen der Konstruktionstheorie und -methodik aufgebaut werden. Es sollten möglichst viele der existierenden Modelle, Methoden und Werkzeuge integriert werden können; es sollten sogar zwischen bisher für unvereinbar gehaltenen Ansätzen Brücken geschlagen werden, z.B. zwischen der „europäischen/deutschsprachigen Schule“ der Konstruktionstheorie und -methodik und dem Ansatz des Axiomatic Design nach Suh. (Dahinter stehende Hypothese: Angesichts der Komplexität des Produktentwicklungsprozesses müssen mehrere Erklärungsmodelle nebeneinander Gültigkeit haben; es fehlt aber an einem Rahmenkonzept zur ihrer Einordnung.)

² Um der Wahrheit den Vorrang zu geben: Es war zuerst die Idee für CPM/PDD da, erst anschließend wurden die nun als Ziele formulierten Potentiale erkannt und umgesetzt.

- Der Ansatz sollte, wenn möglich, praxisnäher sein als die traditionellen Modelle der Konstruktionstheorie und -methodik. Das hieß vor allem:
 - Es durfte nicht nur auf den Grenzfall der Neukonstruktion fokussiert werden, für Entwicklungsprozesse mit Übernahme von Elementen aus Vorgängern/Vorbildern (Anpassungs-, Variantenkonstruktion) sollten ergänzende Erklärungen gegeben werden.
 - Es sollte erklärt werden können, was Entwicklungsprozesse in unterschiedlichen Branchen und Unternehmen voneinander unterscheidet (bzw. wie man zu einer branchen-/unternehmensspezifischen Methodik kommt).
- Es sollte eine Basis für die Rolle des Computers in der Produktentwicklung geschaffen werden. Insbesondere sollten Hinweise für die Entwicklung und Anwendung produktmodellierender und prozessunterstützender Software abgeleitet werden können.

Zusammenfassend ist der CPM/PDD-Ansatz keine neue oder alternative Konstruktionsmethodik. Vielmehr versucht er,

- ergänzende Erklärungen für bisher nicht oder unzureichend verstandene Phänomene in der Produktentwicklung zu liefern und
- in Form eines Rahmenkonzeptes möglichst viele bestehende (und womöglich zukünftige) Ansätze zu integrieren.

3 Produkt- und Prozessmodellierung auf der Basis von Produktmerkmalen und -eigenschaften (CPM/ PDD)

3.1 Grundlagen

Der CPM/PDD-Ansatz basiert auf der Unterscheidung zwischen Merkmalen (englisch: *characteristics*) und Eigenschaften (*properties*) eines Produktes:

- Die Merkmale (im Folgenden als **C**_i bezeichnet) erfassen die Gestalt eines Produktes, definiert durch die (Teile-) Struktur, die räumliche Anordnung der Komponenten sowie die Formen, Abmessungen, Werkstoffe und Oberflächenparameter aller Bauteile („Struktur und Gestalt“, „Beschaffenheit“). Wichtig ist, dass (nur) diese Parameter vom Produktentwickler direkt beeinflusst werden können.

-
- Die Eigenschaften (P_j) beschreiben das Verhalten des Produktes, z.B. Funktion, Sicherheit, Zuverlässigkeit, ästhetische Eigenschaften, aber auch Fertigungs-/Montage-/Prüfgerechtigkeit, Umweltgerechtigkeit, Herstellkosten usw.

Die Eigenschaften können vom Produktentwickler **nicht** direkt festgelegt werden, sondern eben nur über den „Umweg“, dass er/sie bestimmte Merkmale ändert, welche sich ihrerseits in der gewünschten Weise auf bestimmte Eigenschaften auswirken.

Die Merkmale entsprechend weitgehend der Gruppe von Parametern, die von Hubka und Eder [20] als „innere Eigenschaften“ (bzw. *internal properties*) bezeichnet werden und bei Suh [6, 7] als „Konstruktionsparameter“ (*design parameters*) auftreten. Im Kern sind sie die Summe der Parameter, welche die „Gestalt“ eines technischen Produktes/Systems beschreiben.

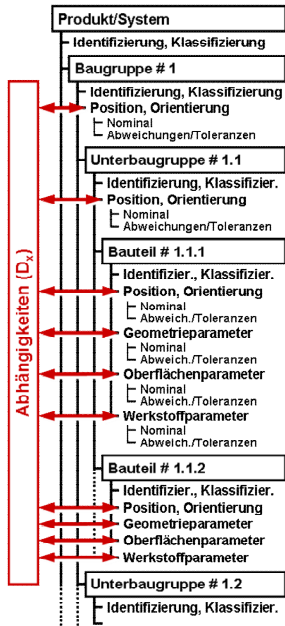
Die Eigenschaften, wie sie hier eingeführt werden, entsprechen weitgehend den „äußeren Eigenschaften“ (*external properties*) nach Hubka/Eder [20] sowie den „funktionalen Anforderungen“ (*functional requirements*) nach Suh [6, 7].

In jüngerer Zeit haben Birkhofer und Wäldele [21, 22] noch einmal andere Begriffe vorgeschlagen, die noch stärker auf die direkte bzw. indirekte Beeinflussbarkeit der Parameter durch den Produktentwickler abheben: Was in der hier gewählten Terminologie „Merkmale“ sind, bezeichnen Birkhofer und Wäldele als „unabhängige Eigenschaften“; „Eigenschaften“ hier sind entsprechend die „abhängigen Eigenschaften“.

Die Ausführungen zeigen, dass die Unterscheidung zwischen Produktmerkmalen und -eigenschaften in der Konstruktionstheorie und -methodik teilweise seit Jahrzehnten bekannt ist. Das einzig Neue des CPM/PDD-Ansatzes ist, sie in das Zentrum der Betrachtungen zu rücken. Dadurch werden aus Sicht des Autors für einige Aspekte des Produktentwicklungsprozesses neue Erklärungsmöglichkeiten geboten.

Die Begriffe „Merkmale“ und „Eigenschaften“ eines Produktes – für komplexe Produkte sicher tausende! – müssen weiter untergliedert werden, um sie praktisch handhaben zu können. **Bild 1** zeigt den hierzu vorgeschlagenen Ansatz.

Produktdefinierende Daten (Merkmale, *characteristics*)



Produktverhalten (Eigenschaften, *properties*)

Funktionen, funkt. Eigensch.
Effizienz
Festigkeit, Steifigk., Stabilität
Lebensdauer
Sicherheit, Zuverlässigkeit
Bauraum, Gewicht
Ästhetische Eigenschaften
Ergonomische Eigenschaften
Fertig-/Montage-/Prüfeigensch.
Transporteigenschaften
Instandhaltungseigenschaften
Erfüllung Gesetze, Normen, ...
Umwelteigenschaften*
Ressourcenverbrauch*
Kosten*

Synthese

**Synthese, Produktentwicklung:
Festlegung der produktdefini-
erenden Parameter (Merkmale)
ausgehend von vorgegebenen/
geforderten Eigenschaften**

**Analyse (physisch oder „virtuell“):
Bestimmung/Vorhersage des
Produktverhaltens (Eigenschaften)
ausgehend von bekannten/vorge-
gebenen Konstruktionsmerkmalen**

Analyse

Bild 1: Klassen von Merkmalen (links) und Eigenschaften (rechts) mit den beiden wesentlichen Beziehungen zwischen beiden (Analyse und Synthese)

- Bild 1 zeigt links eine naheliegende Gliederung der Produktmerkmale, nämlich deren hierarchischen Strukturierung entlang des Teilebaumes. Auf den einzelnen Hierarchieebenen ist jeweils angegeben, welche Parameter zur vollständigen Erfassung der Produktmerkmale benötigt werden (hier nicht im Einzelnen erläutert). Die genannten Daten sowie die Art ihrer Strukturierung sind alle in aktuellen CAX-Systemen vorhanden, vor allem in CAD- und PDM-Systemen.
- Bild 1 zeigt rechts einen Vorschlag für eine erste Ebene zur weiteren Untergliederung der Produkteigenschaften. Es handelt sich gewissermaßen um sehr allgemeine Überschriften zur Beschreibung des Verhaltens eines Produktes, die sich im Wesentlichen aus den verschiedenen Produktlebensphasen ergeben.

Auch die Eigenschaften müssen weiter unterteilt werden, um im Entwicklungsprozess sinnvoll handhabbar zu sein. Allerdings postuliert der CPM/

PDD-Ansatz, dass eine weitere Unterteilung nicht mehr allgemein angegeben werden kann, sondern bereits produktgruppen-, wenn nicht sogar unternehmensspezifisch ist. Man kann auch sagen: Das Aufstellen einer Liste der unterhalb der allgemeinen Überschriften nach Bild 1 zu berücksichtigenden Eigenschaften eines Produktes ist bereits der erste Schritt zur Definition einer anwendungsspezifischen Entwicklungsmethodik [23].

Die letzte Aussage steht im Widerspruch zu den meisten anderen Ansätzen der Konstruktionstheorie und -methodik. Sie hat eine negative und eine positive Konsequenz:

- Negativ: Es besteht kaum Aussicht, generische Vorgehensmodelle für die Produktentwicklung/Konstruktion beliebiger Produkte zu erstellen.
- Positiv: Sie begründet aus dem CPM/PDD-Ansatz heraus genau, was die Unterschiede zwischen Entwicklungsprozessen in bestimmten Branchen und Unternehmen ausmacht – es sind jedes Mal andere relevante Eigenschaften zu betrachten.

Ein weiterer Unterschied zwischen der Merkmals- und der Eigenschaftsseite des Grundmodells nach Bild 1 sei erwähnt:

- Auf der Merkmalsseite gelingt es in der Regel ohne Probleme, das Kriterium „Vollständigkeit“ zu überprüfen und sicherzustellen. Das ergibt sich aus den normalerweise streng hierarchischen Strukturen (Teilebaum bis hinunter zu einzelnen Flächen, Kanten und Punkten im CAD-Modell).
- In Bezug auf die Eigenschaften ist das Kriterium „Vollständigkeit“ nicht zu überprüfen; stattdessen kann man allenfalls von „Relevanz“ bestimmter Eigenschaften sprechen. Die Begründung ist, dass einem Produkt neben den im Entwicklungsprozess betrachteten beliebig viele weitere Eigenschaften zugeordnet werden können. Zugegebenermaßen etwas extreme Beispiele sind: das Kraftfahrzeug als Gewitterschutzkabine, als Waffe usw. oder aber die Ästhetik einer Chemieanlage. Kritisch für den Produktentwickler wird es, wenn der Kunde, der Gesetzgeber oder ein Konkurrent für ein an sich bekanntes Produkt neue Eigenschaften fordert bzw. propagiert (z.B. das Kraftfahrzeug als Entertainment-Zentrum): Dann wird eine bisher nicht betrachtete Eigenschaft plötzlich äußerst relevant.

Diese Feststellung korrespondiert mit einer Aussage von Armand Hat-chuel, der im Zusammenhang mit seiner C-K-Theorie [18] (und unter Nutzung seiner eigenen Terminologie) davon spricht, dass man nur die Concept-Seite

systematisch füllen kann, während es auf der Knowledge-Seite nur möglich ist, „islands of knowledge“ zu generieren.

In Bild 1 ist auf der Seite der Merkmale (Bild 1, links) ein zusätzlicher Block eingetragen, der für die gegenseitigen Abhängigkeiten (*dependencies*, formal \mathbf{D}_x) zwischen Merkmalen steht: In der Produktentwicklung sind zahlreiche derartige Abhängigkeiten bekannt, etwa geometrisch-räumliche Abhängigkeiten zwischen Elementen und Bauteilen, aber auch zwischen Toleranzen (= Passungen), zwischen Werkstoffen (Materialpaarungen) oder sogar logische Abhängigkeiten (z.B. Wenn-Dann-Bedingungen zwischen Komponenten zur Erfassung von Konfigurationsvarianten). Ein Teil dieser Abhängigkeiten, insbesondere die geometrisch-räumlichen, kann bereits heute durch die so genannte Parametrik von CAX-Systemen erfasst werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Existenz solcher Abhängigkeiten ein großer Vorteil für den Produktentwickler ist: Jede einzelne Abhängigkeit vermindert die Anzahl der Parameter, um die sich der Produktentwickler kümmern muss (= die Anzahl der Konstruktionsfreiheitsgrade) um 1. Ohne die (explizite oder implizite) Ausnutzung solcher Abhängigkeiten wäre die Fertigstellung einer einigermaßen komplexen Konstruktionsaufgabe wohl nahezu unmöglich – insbesondere in der Detaillierungsphase mit tausenden festzulegenden Parametern.

Schließlich führt Bild 1 noch die beiden in der Produktentwicklung wesentlichen Beziehungen zwischen den Produktmerkmalen und -eigenschaften ein:

- **Analyse:** Ausgehend von bekannten/vorgegebenen Merkmalen eines Produktes wird dessen Verhalten bestimmt bzw. – sofern das Produkt physisch noch nicht existiert – vorhergesagt. Solche Analyseschritte können entweder experimentell (je nach Phase des Entwicklungsprozesses: anhand von Modellen, Prototypen oder dem realen Produkt nach dessen Herstellung) oder durch Berechnung/Simulation anhand von virtuellen Modellen vorgenommen werden.
- **Synthese:** Ausgehend von vorgegebenen, d.h. in der Aufgabenstellung geforderten Eigenschaften werden die Merkmale der Lösung bestimmt. Der Begriff „bestimmen“ hat hier zwei verschiedene Bedeutungen: einerseits Definition der relevanten Merkmale selbst (Erarbeitung/Auswahl von Lösungskonzepten, qualitative Gestaltung) und andererseits Zuweisung konkreter Werte für qualitativ bereits festliegende Merkmale (Dimensionierung).

Die Synthese ist die Hauptaufgabenstellung in der Produktentwicklung. Die Anforderungsliste ist im Wesentlichen eine Liste geforderter oder gewünschter Produkteigenschaften. Die Aufgabe des Produktentwicklers ist es, die Merkmale der Lösung zu bestimmen. Anforderungslisten können neben Produkteigenschaften auch Produktmerkmale enthalten – aber dann werden explizit oder implizit schon bestimmte Teillösungen (Lösungselemente, -muster) von Anfang an vorausgesetzt.

In der Produktentwicklung werden aber auch vielfältige Analyseschritte benötigt; sie dienen im Wesentlichen der Überprüfung, ob die geforderten Produkteigenschaften tatsächlich erreicht werden (= „Absicherung“).

3.2 Produktmodellierung (Characteristics-Properties Modelling, CPM)

Die Analyse und die Synthese als die zentralen Tätigkeiten des Produktentwicklungsprozesses werden nun in einer weiter detaillierten Betrachtung näher untersucht. Dabei werden folgende Abkürzungen verwendet:

- C_i** Produktmerkmale (*characteristics*)
- P_j** Produkteigenschaften (*properties*)
- PR_j** Geforderte Eigenschaften (*required properties*)
- D_x** Abhängigkeiten (*dependencies*, „Constraints“) zw. Merkmalen
- R_j** Beziehungen (*relations*) zw. Merkmalen und Eigenschaften, Durchführung von Analyseoperationen
- R_j⁻¹** Inverse Beziehungen (*inverted relations*) zw. Eigenschaften und Merkmalen, Durchführung von Syntheseoperationen
- EC_j** Äußere Rahmenbedingungen (*external conditions*)

Weiterhin wird als Vereinfachung eingeführt, dass sowohl auf der Merkmals- als auch auf der Eigenschaftsseite keine hierarchischen Strukturierungen mehr gezeichnet werden (die in Wirklichkeit natürlich vorhanden sind), sondern dass diese durch einfache Listen der relevanten Merkmale bzw. Eigenschaften ersetzt werden. Diese Merkmals- und Eigenschaftslisten können (wie übrigens ähnlich auch bei Suh [6, 7]) als Vektoren **C** bzw. **P** notiert werden, was die Formalisierung des gesamten Ansatzes sehr erleichtert (hier nicht im Detail erläutert, siehe hierzu etwa [24]).

3.2.1 Modell der Analyse

Bild 2 zeigt zunächst das Grundmodell für die Analyse. Im Kern handelt es sich um ein Netzwerkmodell, in dem die Merkmale (C_i) die verschiedenen zu untersuchenden Eigenschaften (P_j) determinieren. Einzige Voraussetzung ist hier, dass die verschiedenen Eigenschaften unabhängig voneinander betrachtet werden können (sie müssen dazu nicht notwendigerweise unabhängig voneinander sein), was gängiger Analysepraxis entspricht. Die wesentliche Aussage des Modells nach Bild 2 ist, dass für ein Produkt mit bekannten Merkmalen diese sämtliche relevanten Eigenschaften bestimmen, wobei allerdings für die verschiedenen Eigenschaften in der Regel jeweils unterschiedliche Kombinationen immer derselben Merkmale maßgebend sind.

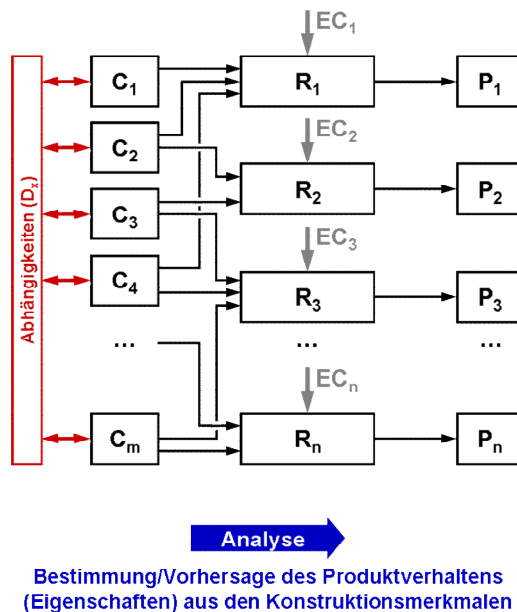


Bild 2: Grundmodell der Analyse

Sobald das Produkt physisch existiert (d.h. sobald seine Merkmale C_i „verstofflicht“ sind) und in Betrieb gesetzt wird, können seine Eigenschaften bzw. sein Verhalten in den meisten Fällen durch Versuch und Messung bestimmt werden. In diesem Fall stellt das Produkt selbst die Beziehungen zwischen Merkmalen und Eigenschaften (R_j) her.

Während des Produktentwicklungsprozesses existiert das Produkt noch nicht oder noch nicht vollständig in der physischen Realität. Deshalb kann man in der Produktentwicklung seine Eigenschaften nur vorhersagen (und nicht nachträglich bestimmen), wozu geeignete abstrakte Modelle, Methoden und Werkzeuge: Genau hierfür stehen die in Bild 2 eingezeichneten \mathbf{R}_j -Kästen.

Insgesamt sind in der Produktentwicklung folgende Klassen von Modellen, Methoden und Werkzeugen (\mathbf{R}_j) zur analytischen Bestimmung bzw. Vorhersage der Produkteigenschaften (\mathbf{P}_j) ausgehend von bekannten/gegebenen Produktmerkmalen (\mathbf{C}_i) einsetzbar – hier sortiert von eher informellen („weichen“) zu stark formalisierten („harten“) Ansätzen:

- Schätzung
- Erfahrung/Erfahrungswerte
- Befragung von Experten oder potentiellen Kunden (vor allem bei schwer messbaren Eigenschaften, etwa ästhetischen)
- Experimentelle Bestimmung (anhand von Modellen, Prototypen oder dem realen Produkt nach dessen Herstellung)
- Tabellen und Diagramme (ergeben sich in der Regel aus den Ergebnissen zahlreicher zuvor durchgeführter Experimente in geeignet systematisierter Form)
- Konventionelle (d.h. in der Regel: vereinfachte) Berechnungen
- Rechnerbasierte Berechnungs-/Simulationswerkzeuge

Wie später (Abschnitt 3.3.1) noch erläutert wird, benötigt man im Verlauf des Entwicklungsprozesses abhängig von der Entwicklungsphase selbst für die gleiche Eigenschaft verschiedene Methoden/Werkzeuge, im Falle der Festigkeitsanalyse beispielsweise überschlägige Berechnungsmethoden in frühen gegenüber detaillierten FEM-Analysen in späten Phasen.

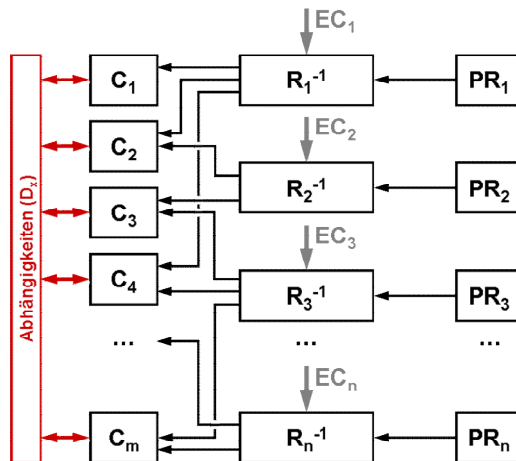
Das Grundmodell für die Analyse der Produkteigenschaften (\mathbf{P}_j) ausgehend von den Produktmerkmalen (\mathbf{C}_i) nach Bild 2 führt eine weitere Klasse von Einflussgrößen ein: Die Bestimmung bzw. Vorhersage jeder Produkteigenschaft mittels geeigneter Modelle, Methoden und Werkzeuge wird durchgeführt unter der Annahme bestimmter äußerer Rahmenbedingungen (*external conditions*, \mathbf{EC}_j). Sie definieren den Gültigkeitsbereich der durch die jeweilige Analysemethode bzw. das Analysewerkzeug gewonnenen Aussage. So ist beispielsweise die Analyse der Tragfähigkeit oder der Lebensdauer eines Produktes gebunden an bestimmte Betriebs- und Lastfälle, Aussagen über die Fertigungsgerechtigkeit gelten nur im Zusammenhang mit den durch das Fertigungssystem vorgegebenen Randbedingungen, sogar die Bestimmung der äs-

thetischen Eigenschaften ist häufig an bestimmte Randbedingungen (z.B. den kulturellen Hintergrund des Zielpublikums) gebunden.

Diese Erkenntnis ist besonders wichtig im Zusammenhang mit dem X-gerechten Konstruieren (näher ausgeführt in [25]). Darüber hinaus betrifft sie die Auswahl und den Einsatz rechnerbasierter Methoden und Werkzeuge: Hier sind die dem jeweiligen Werkzeug zugrunde liegenden Annahmen bezüglich der äußeren Rahmenbedingungen oft gar nicht transparent, was gelegentlich ein maßgeblicher Faktor beim Scheitern von CAX-Projekten ist.

3.2.2 Modell der Synthese

Formal kann die Synthese „einfach“ als Umkehrung (Invertierung) der Analyse betrachtet werden: Ausgehend von vorgegebenen Eigenschaften – hier nun geforderten Eigenschaften (*required properties*, PR_j) – sind die Merkmale (C_i) der Lösung festzulegen und sind deren Werte zu bestimmen. **Bild 3** zeigt das entsprechende, durch Invertierung (Umdrehen aller Pfeile) aus dem Analysefall nach Bild 2 abgeleitete Netzwerkmodell.



← **Synthese**

Festlegung der produktdefinierenden Parameter
(Merkmale) aus vorgeg./geforderten Eigenschaften

Bild 3: Grundmodell der Synthese

In der Produktentwicklung werden dazu geeignete Synthesemethoden und -werkzeuge benötigt, die in dem Modell nach Bild 3 durch die „inversen Beziehungen“ (R_j^{-1}) symbolisiert werden. Wiederum sortiert von „weichen“ zu „harten“ Methoden und Werkzeugen sind folgende Kategorien anzugeben:

- Menschliche Genialität (allerdings: nach denkpsychologischen Untersuchungen erklärbar durch besonders schnelle Assoziation)
- Assoziation (Übertragung bereits gesehener Muster – aus der Technik, der Biologie oder sogar noch weiter entfernten Gebieten – auf die aktuelle Aufgabe)
- Erfahrung (als Assoziation basierend auf vielen in der Vergangenheit überwiegend selbst erlebten bzw. gesehenen Fällen und Mustern)
- Kataloge, Anwendung von Standardlösungen (z.B. Maschinenelem.)
- Regelwerke, methodische/systematische Vorgehensmodelle (die zu meist Kombinationen mehrerer der vorgenannten Ansätze beinhalten)
- Invertierte Berechnungsverfahren (in der Regel nur für sehr einfache oder – eben zum Zweck der Invertierbarkeit – stark vereinfachte Fälle)
- Rechnerbasierte Methoden und Werkzeuge

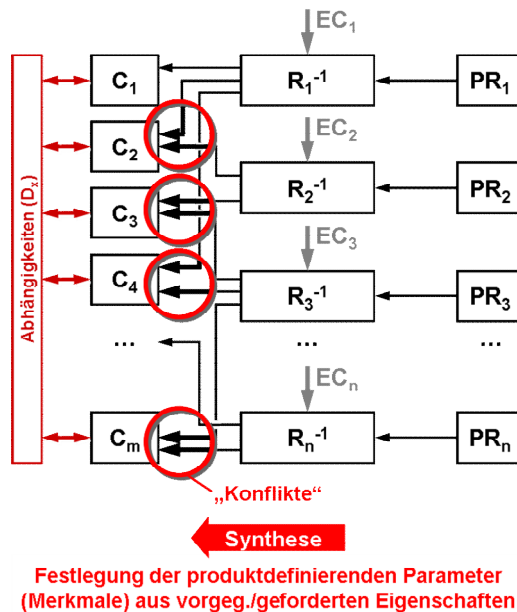


Bild 4: Zielkonflikte bei der Synthese – verschiedene geforderte Eigenschaften beeinflussen dieselben Merkmale in unterschiedliche Richtungen

se (siehe Pfeilrichtungen in Bild 5). Der Benutzer kann sowohl ausgehend von den Merkmalen eines Lösungselementes/-musters dessen Eigenschaften bestimmen als auch umgekehrt ausgehend von geforderten Eigenschaften nach passenden Lösungselementen/-mustern und deren Konstruktionsparametern (Merkmalen) suchen.

Lösungselemente und -muster können genutzt werden als:

- Physische Objekte: Typische Beispiele sind etwa die bekannten Maschinenelemente, bei denen die Verknüpfung der Merkmals- mit der Eigenschaftsseite zumeist mit Hilfe von Katalogen, Tabellen, Diagrammen und Berechnungsalgorithmen erfolgt.
- „Virtuelle“ Objekte: Hierfür sind mehrere verschiedene Bezeichnungen gebräuchlich, etwa CAD-Makros, -Variantenprogramme, -Features, -Templates.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich der hier eingeführte Begriff des Lösungselementes/-musters nicht nur auf die Erfüllung bestimmter Funktionen bezieht (wie meistens in der Konstruktionstheorie und -methodik). Vielmehr kann es in Bezug auf sämtliche Eigenschaften Lösungselemente/-muster geben: neben der Funktion auch Fertigungs- und Montage-„Muster“, Lösungen zur Erfüllung bestimmter Sicherheitsanforderungen, sogar ästhetische Muster/Konzepte usw.

Der Autor ist davon überzeugt, dass große Teile der Produktentwicklung in der Praxis in Form eines „Übereinanderschichtens“ bekannter Lösungselemente/-muster stattfinden. Beispiel: Kraftfahrzeuge der Kompaktklasse vereinigen seit Jahren, teilweise Jahrzehnten die folgenden Lösungselemente/-muster:

- Antrieb: Verbrennungskraftmaschine (wahlweise Otto oder Diesel/turboaufgeladen), mehrstufiges Schaltgetriebe (wahlweise manuell oder automatisch betätigt)
- Anordnung: Frontmotor quer, Frontantrieb
- Designkonzept: „Two-box-Design“, Schrägheck, 3 oder 5 Türen
- Karosserie: Stahlblech punktgeschweißt und geschraubt
- Passive Sicherheit: Deformationszonen, Crashtubes, steife Fahrgastzelle, 3-Punkt-Gurte/Gurtstrammer, Front- und Seiten-Airbags
- ...

Die Aufzählung zeigt, dass der Wechsel auch nur eines dieser Muster (z.B. Ersatz Verbrennungskraftmaschine durch Elektromotor[en], Übergang auf Aluminium-Karosserie oder faserverstärkte Kunststoff-Bauweisen) erhebliche Turbulenzen in der betroffenen Branche bzw. den darin tätigen Unternehmen verursacht. Andererseits kann dasjenige Unternehmen, das als erstes aus den gängigen Mustern ausbricht, unmittelbar als Innovator profilieren.

3.3 Prozessmodellierung (Property-Driven Development, PDD)

3.3.1 Vorgehensmodell

Die Darstellungen in Abschnitt 3.2 haben sich mit der Modellierung von Produkten auf der Basis von deren Merkmalen und Eigenschaften befasst (Characteristics-Properties Modelling, CPM). Ausgehend davon wird nun ein Modell des eigenschaftsgetriebenen Produktentwicklungsprozesses dargestellt (Property-Driven Development, PDD).

Der Produktentwicklungsprozess insgesamt kann als Tätigkeit angesehen werden, die in der Grundtendenz dem Synthesemodell nach Bild 3 folgt, die aber zur Absicherung des Erreichten (exakter: der erreichten Eigenschaften) immer wieder zwischengeschaltete Analyseschritte erfordert, denen das Modell nach Bild 2 zugrunde liegt.

Die **Bilder 6 und 7** geben – für zwei aufeinander folgende Zyklen A und B – eine schematische Übersicht über den Ablauf des Produktentwicklungsprozesses aus der Perspektive des PDD-Ansatzes :

A1 Der Produktentwicklungsprozess startet mit einer Anforderungsliste. Diese ist im PDD-Ansatz im Wesentlichen eine Liste geforderter Produkteigenschaften (\mathbf{PR}_j , Soll-Eigenschaften). Ausgehend davon ist der erste Schritt der Produktentwicklung ein Syntheseschritt: Der Produktentwickler greift die wichtigsten der geforderten Eigenschaften heraus (im Falle der Neukonstruktion in der Regel die funktionalen Eigenschaften) und legt unter Nutzung geeigneter Synthesemethoden (\mathbf{R}_A^{-1}) einige wesentliche (!) Merkmale (Konstruktionsparameter) der Lösung fest (\mathbf{C}_{iA}), beispielsweise in Form einer Skizze. Alternativ dazu können auch vorhandene (Teil-) Lösungen herangezogen werden (= Lösungselemente/-muster, siehe Abschnitt 3.2.3, Bild 5).

A2 Der nächste Schritt ist ein Analyseschritt: Ausgehend von den zu diesem Zeitpunkt (durch Schritt A1) festgelegten Merkmalen der Lösung werden deren Eigenschaften (\mathbf{P}_{jA} , Ist-Eigenschaften) bestimmt bzw. vorhergesagt. Dazu werden geeignete Analysemethoden (\mathbf{R}_A) benötigt.

Es sei betont, dass die Analyse nicht nur die Überprüfung derjenigen Eigenschaften umfasst, welche der Ausgangspunkt des vorangegangenen Syntheseschrittes waren, sondern möglichst alle (relevanten) Eigenschaften. Dies ist in frühen Phasen nicht immer möglich, weil – besonders zur Bestimmung komplexer Eigenschaften – zu diesem Zeitpunkt nicht genug Merkmale (Konstruktionsparameter) definiert sind (siehe „?“ in Bild 6).

A3 In diesem Schritt werden die Ist-Eigenschaften (\mathbf{P}_{jA}) den Soll-Eigenschaften (\mathbf{PR}_j) gegenübergestellt und die einzelnen Abweichungen bestimmt ($\Delta\mathbf{P}_{jA}$).

A4 Die im vorangegangenen Schritt bestimmten Einzeldifferenzen ($\Delta\mathbf{P}_{jA}$) zwischen den Ist- und den Soll-Eigenschaften alleine nutzen dem weiteren Prozessfortschritt relativ wenig. Es muss vielmehr auf ihrer Basis eine Gesamtevaluation vorgenommen werden: Der Produktentwickler muss die vorrangigen Problempunkte des gegenwärtigen Entwicklungsstandes erkennen und über das weitere Vorgehen entscheiden.

Dies bedeutet in der Regel, die im nächsten Zyklus aus Synthese, Analyse, Bestimmung der Einzelabweichungen, Gesamtevaluation (hier: Zyklus B, Bild 7) zu betrachtenden Eigenschaften auszuwählen und hierfür geeignete Methoden und Werkzeuge zurechtzulegen. In frühen Phasen des Entwicklungsprozesses ist es eine mögliche Vorgehensstrategie, die Eigenschaft(en) mit der größten Abweichung zwischen Ist und Soll zum Ausgangspunkt des nächsten Zyklus zu nehmen. In späteren Phasen ist die Lage nicht so klar, unter Umständen müssen komplexe Evaluationsmethoden eingesetzt werden.

In jedem Falle gilt, dass die Ergebnisse der Gesamtevaluation der eigentliche „Treiber“ des Prozesses sind.

An den ersten Zyklus (A) schließen sich weitere Zyklen (B, C, ...) an, die gleich aufgebaut sind. Bild 7 zeigt dies auszugsweise anhand des Zyklus B:

B1 Der letzte Schritt aus dem vorangegangenen Zyklus (A4) bestimmt, welche Eigenschaften der Ausgangspunkt des nachfolgenden Zyklus sind. Mittels geeigneter Synthesemethoden (\mathbf{R}_B^{-1}) muss nun auf sinnvolle Veränderungen auf der Merkmalsseite geschlossen werden ($\mathbf{C}_{iA} \rightarrow \mathbf{C}_{iB}$).

„Veränderung“ heißt, dass entweder bereits zuvor festgelegte Merkmale modifiziert oder dass weitere Merkmale hinzugefügt werden. „Merkmale

hinzufügen“ kann seinerseits entweder heißen, dass der bestehende Entwurf um Details angereichert wird oder dass ganze Komponenten ergänzt werden (die natürlich selbst auch wieder bekannte Lösungselemente/-muster sein können).

B2 Als nächstes ist wieder ein Analyseschritt durchzuführen: Infolge der vorausgegangenen Synthesemaßnahmen haben sich die Merkmale der Lösung verändert. Wegen dieser veränderten Situation müssen auch die (Ist-) Eigenschaften der Lösung neu bestimmt bzw. müssen die früheren Vorhersagen revidiert werden ($\mathbf{P}_{jA} \rightarrow \mathbf{P}_{jB}$). Dazu werden erneut geeignete Analysemethoden (\mathbf{R}_B) benötigt. Diese sind voraussichtlich andere als im Zyklus davor (\mathbf{R}_A), weil nun auf der Merkmalsseite detailliertere Informationen vorliegen, welche genauere Analysen ermöglichen.

Bei der Analyse werden in diesem (und in jedem weiteren) Schritt im Prinzip immer die gleichen Eigenschaften untersucht (also stets alle [relevanten] Eigenschaften). Wegen der Veränderungen auf der Merkmalsseite und wegen des dadurch ermöglichten Einsatzes anderer, in der Regel genauerer Analysemethoden ergeben sich aber von einem Zyklus zum nächsten jeweils andere, in der Regel exaktere Analyseergebnisse.

Hieraus lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass man im Produktentwicklungsprozess zur Analyse jeweils der gleichen Eigenschaft unterschiedliche Methoden und Werkzeuge benötigt: In frühen Phasen solche, die nur einige wenige festgelegten Merkmale benötigen und dafür weniger exakt sein können und müssen, und (erst) in späten Phasen, wenn also viele Details festliegen, exaktere Methoden und Werkzeuge.

Nicht mehr in Bild 7 dargestellt:

B3 Wie im Zyklus A folgt eine Gegenüberstellung der Ist-Eigenschaften (\mathbf{P}_{jB}) mit den Anforderungen bzw. Soll-Eigenschaften (\mathbf{PR}_j) zur Bestimmung der nunmehr vorliegenden Einzelabweichungen ($\Delta\mathbf{P}_{jB}$). Gegenüber dem vorangegangenen Zyklus haben sich die Soll-Eigenschaften/Anforderungen in der Regel nicht verändert, es gibt aber auf Seiten der Ist-Eigenschaften eine veränderte (hoffentlich verbesserte) Situation, woraus neue (hoffentlich verkleinerte) Werte für die Abweichungen zwischen Soll und Ist resultieren.

B4 Auf Basis der neu bestimmten Einzelabweichungen ($\Delta\mathbf{P}_{jB}$) muss im letzten Schritt des Zyklus B eine neue Gesamtevaluation vorgenommen werden, aus der wiederum die Schlussfolgerungen für den nächsten Zyklus abzuleiten sind (Gesamtevaluation als Prozess-„Treiber“).

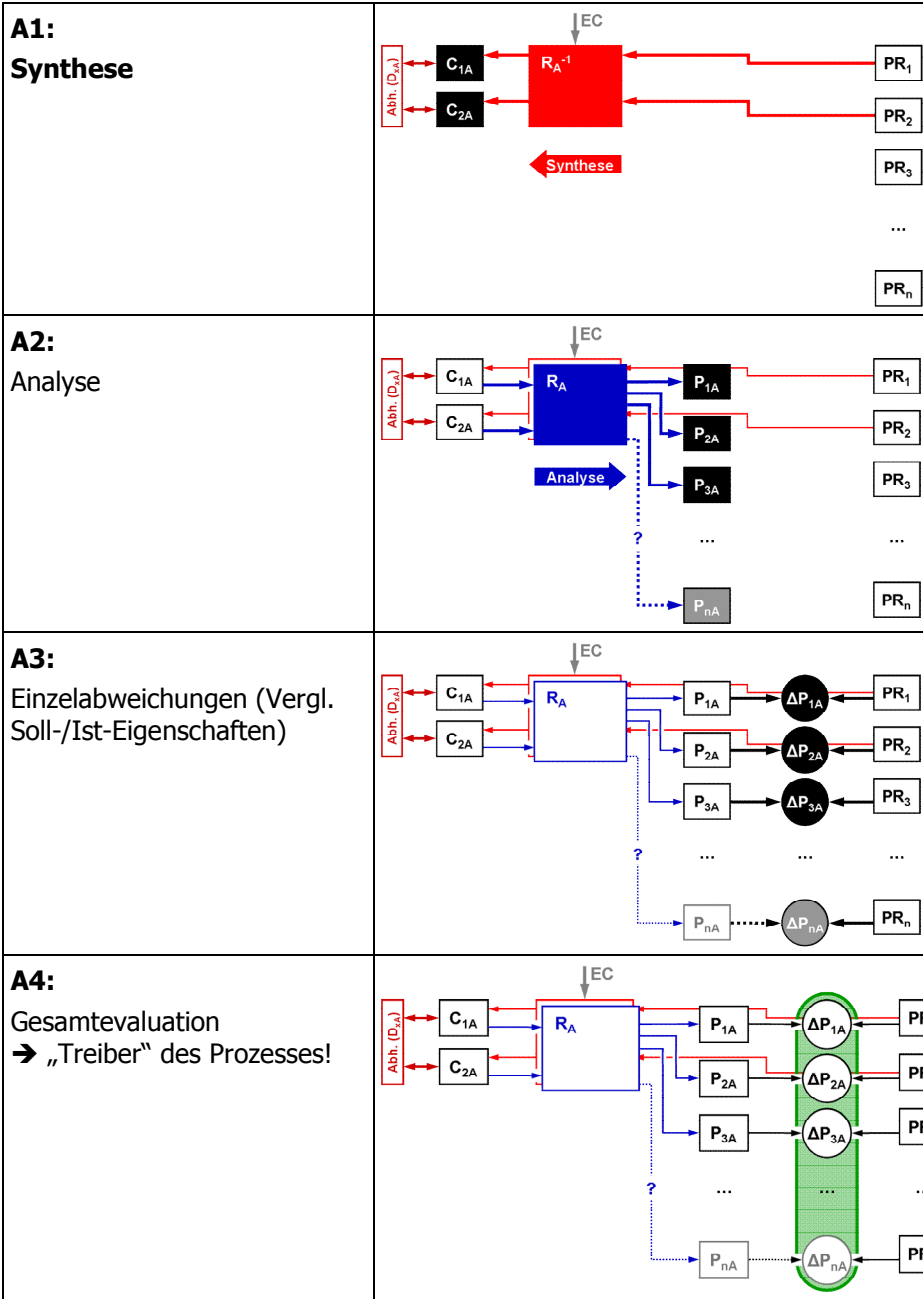


Bild 6: Eigenschaftsgetriebener Produktentwicklungsprozess (PDD), Zyklus A

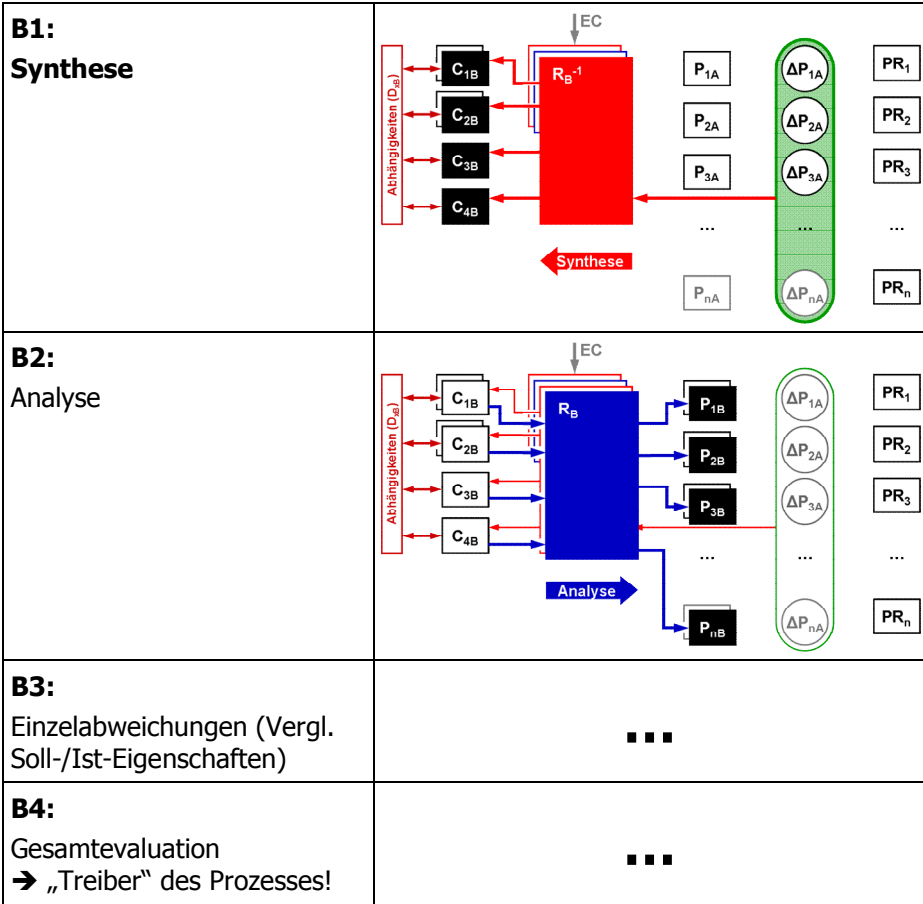


Bild 7: Eigenschaftsgetriebener Produktentwicklungsprozess (PDD), Zyklus B (Auszug)

Im Verlauf des Entwicklungsprozesses geschieht folgendes:

- Durch die Syntheseschritte wird von einem Zyklus zum nächsten die Merkmalsseite (produktdefinierende Informationen) vervollständigt.
- Durch die Analyseschritte werden von einem Zyklus zum nächsten die Informationen über die Eigenschaften / das Verhalten der Lösung ergänzt und präzisiert (Absicherung).
- Durch den Vergleich der Soll- mit den Ist-Eigenschaften und die jeweils folgende Gesamtevaluation wird sichergestellt, dass die Lösung die Anforderungen hinreichend gut erfüllt.

Das gesamte Vorgehen entspricht letztlich einem Regelkreis, worauf hier nicht im Einzelnen eingegangen werden soll (siehe [26]).

Die hier vorgestellte Sicht auf den Produktentwicklungsprozess auf Basis des PDD-Ansatzes lässt sich relativ gut mathematisch formalisieren – letztlich in Erweiterung der Theorie des *Axiomatic Design* nach Suh [6, 7]), worauf hier jedoch ebenfalls nicht eingegangen sei (siehe [24]).

Es sei darauf hingewiesen, dass das PDD-Konzept eine Sicht auf „frühe“ bzw. „späte“ Phasen der Produktentwicklung impliziert, die sich deutlich von der Sicht der konventionellen Konstruktionstheorie und -methodik unterscheidet:

- Frühe und späte Phasen der Produktentwicklung unterscheiden sich **nicht** durch den Betrachtungsgegenstand voneinander (Funktions- und Prinzipbetrachtungen = frühe Phasen, Gestaltbetrachtungen = späte Phasen),
- sondern allein durch die Anzahl der bereits festgelegten Merkmale (Detailierungsgrad der Lösung) – unabhängig davon, auf welche geforderten Eigenschaften ihre Festlegung zurückgeht.

Im vorstehenden Text wurde an mehreren Stellen angemerkt, dass man zur Realisierung noch gar nicht oder unzureichend erfüllter geforderter Eigenschaften auf Lösungselemente/-muster zurückgreifen kann. Das kann so weit gehen, dass ganz am Anfang des Produktentwicklungsprozesses der komplette Entwurf eines Vorgängers/Vorbildes als erster Lösungsansatz eingesetzt wird. In diesem Fall „springt“ der Prozess direkt in eine späte Phase im oben definierten Sinne. Der Produktentwickler muss sich „nur noch“ um die entsprechend dem neuen Anforderungsprofil defizitären Eigenschaften kümmern und versuchen, diese durch Änderung (Variation) oder Ergänzung (Hinzufügen von Komponenten) von Merkmalen zu verbessern.

Dadurch liefert das PDD-Modell eine relativ einfache Erklärung für die Konstruktionsarten Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion: Diese unterscheiden sich nur durch den Umfang der a priori aus vorhandenem Wissen „gesetzten“ Lösungselemente/-muster. Das ändert nichts an dem Grundkonzept, dass der Produktentwicklungsprozess allein durch noch nicht (hinreichend) erfüllte Eigenschaften gesteuert wird, und ändert auch nichts am Ablauf des Prozesses selbst. Innerhalb PDD ist es daher unnötig, für unterschiedliche Konstruktionsarten unterschiedliche Vorgehensweise zu definieren.

3.3.2 Ende des Produktentwicklungsprozesses

Im PDD-Ansatz lassen sich klare Bedingungen für das erfolgreiche Ende des Produktentwicklungsprozesses angeben:

1. Es müssen alle Merkmale der Lösung (\mathbf{C}_i) so weit spezifiziert sein, dass diese hergestellt werden kann.
2. Alle (relevanten) Eigenschaften der Lösung (\mathbf{P}_j) müssen bestimmt/vorhergesagt werden können, und zwar
3. mit hinreichender Sicherheit und Genauigkeit.
4. Die bestimmten/vorhergesagten (Ist-) Eigenschaften müssen hinreichend nahe an den geforderten (Soll-) Eigenschaften liegen ($\Delta\mathbf{P}_j \rightarrow \mathbf{0}$).

Es sei darauf hingewiesen, dass die meisten anderen Ansätze der Konstruktionstheorie und -methodik nur die erste und die vierte Bedingung nennen. Die Bedingungen zwei und drei spielen auf den Einsatz geeigneter und „hinreichend sicherer und genauer“ Absicherungsmethoden an – ein großes Thema in der industriellen Praxis.

3.3.3 Integration anderer Modelle, Methoden und Werkzeuge

Eine wichtige Forderung an den CPM/PDD-Ansatz war es, dass möglichst viele der existierenden Modelle, Methoden und Werkzeuge integriert werden können sollten (siehe Abschnitt 2). An einzelnen Beispielen sei hierauf kurz eingegangen.

Bild 8 erläutert graphisch den Zusammenhang zwischen dem PDD-Prozessmodell und den Vorgehensmodellen der klassischen Konstruktionsmethodik „europäischer/deutschsprachiger Prägung“ (z.B. nach VDI 2221, [3]):

- Die klassische Konstruktionsmethodik liefert Methoden, die sich auf die **funktionalen Anforderungen** konzentrieren und den Produktentwickler ausgehend davon zu einer prinzipiellen Lösung führen; diese wird in der Regel in Form einer Skizze dokumentiert, enthält also nur sehr wenige Merkmale. Die zwischengeschalteten Betrachtungsebenen „Funktionsstruktur“ und „Prinzipielle Lösung“ sind rein gedankliche Hilfskonstrukte, die den Weg von den (funktionalen) Anforderungen zur Lösungsskizze erleichtern sollen. Um ausgehend von (funktionalen) Anforderungen zur Lösung zu gelangen, wären durchaus ganz andere Methoden einsetzbar: Vom „genialen Einfall“ (ohne jede formale Zwischenebene) bis zum Start mit der fertigen Konstruktion eines Vorgängers/Vorbildes (= besonders umfassendes „Lösungselement/-muster“).

- Andere geforderte Eigenschaften (Festigkeits-, Fertigungs-, Montagegerechtigkeit usw.) erfordern dagegen **andere** Methoden und Werkzeuge (DFX-Methoden/-Werkzeuge). Diese Fragen lassen sich nicht mehr mit Begriffen wie „Funktionsstruktur“, „Lösungsprinzip“ usw. diskutieren, was erklären könnte, warum DFX in die klassische Konstruktionsmethodik eher schlecht integriert ist.
Design for X (DFX), daneben aber auch *Design of X* – also simultanes Entwickeln von Produkt und Technologie – aus der Perspektive des CPM/PDD-Ansatzes wurden in [25] behandelt.

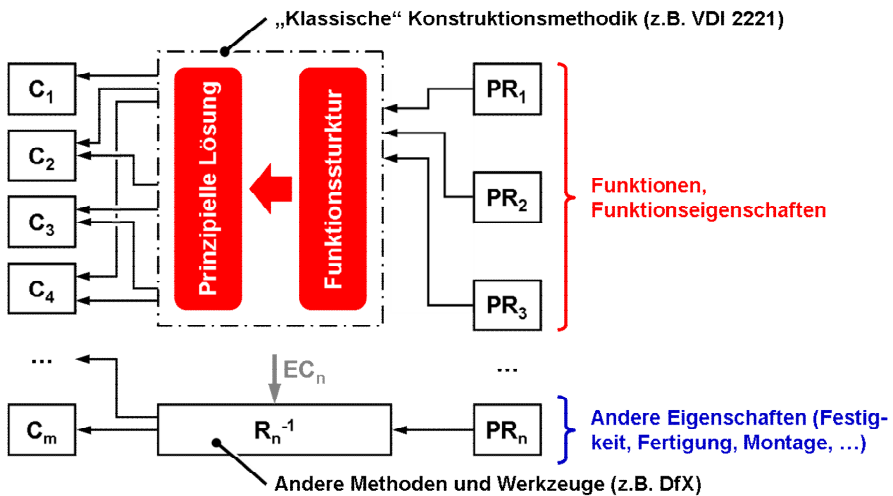


Bild 8: Integration anderer Methoden und Werkzeuge (schematisch)

Ohne dies hier im Einzelnen nachzuweisen, lässt sich zeigen, dass das CPM/PDD-Modell – nach entsprechender Formalisierung (siehe [24]) – als Sonderfall in die von Suh [6, 7] im Rahmen des *Axiomatic Design* entwickelte *Design Equation* übergeht, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Die Beziehungen \mathbf{R}_j bzw. \mathbf{R}_j^{-1} zwischen den Merkmalen (\mathbf{C}_i) und den Eigenschaften (\mathbf{P}_j) sind bekannt und linear (oder linearisiert).
(Beachte: Die Linearitätsbedingung ist Voraussetzung dazu, dass man alle betrachteten Beziehungen überhaupt in einer Matrixgleichung – Suhs *Design Equation* – zusammenfassen kann.)

-
- Die *Design Equation* ist genau dann invertierbar (d.h. von einem Analyse- in ein Syntheseproblem umformbar), wenn die Anzahl der als maßgeblich betrachteten Merkmale gleich der Anzahl der relevanten Eigenschaften ist ($i = j$).

Auf die Integration von Computer-basierten Werkstoffen in den eigenschaftsgetriebenen Produktentwicklungsprozess wird im nachfolgenden Abschnitt 4.1 noch eingegangen.

4 Kritisches Resümee

4.1 Was wurde erreicht?

Die Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen auf Basis von Produktmerkmalen und -eigenschaften (CPM/PDD) kann aus Sicht des Autors in einigen Punkten durchaus ergänzende Erklärungen für bisher nicht oder unzureichend verstandene Phänomene liefern. Auf diese wurde an den jeweils entsprechenden Stellen in den vorangegangenen Abschnitten hingewiesen. Stichwortartig zusammengefasst:

- Die Unterschiede zwischen Produktentwicklungsprozessen in bestimmten Branchen und Unternehmen werden durch die jeweils unterschiedlichen Profile der relevanten Produkteigenschaften begründet.
- Erklärung des gesamten Produktentwicklungsprozesses durch Zyklen aus Synthese-Analyse-Evaluation.
- Maßgebliche Steuergröße des gesamten Prozesses: Produkteigenschaften, exakter: aktuelle Differenz zwischen Ist- und Soll-Eigenschaften.
- Daran gekoppelt: Evaluation als Werkzeug zur Steuerung des Prozessfortschrittes.
- Angabe von erweiterten Kriterien für das erfolgreiche Ende von Produktentwicklungsprozessen.
- Neue Überlegungen zur Bestimmung des aktuellen Reifegrades während der Produktentwicklung (nicht im Text erläutert, siehe hierzu [25]).
- Neue und erweiterte Erklärung des Begriffes „Lösungselement/-muster“ und der Rolle von Lösungselementen/-mustern im Prozess, Lösungselemente/-muster können dabei „physisch“ (z.B. Wiederverwendung von

Komponenten) oder „virtuell“ (Einsatz von digitalen Makros, Features, Templates usw.) sein.

- Daran gekoppelt: Fließender Übergang zwischen den Konstruktionsarten Neu-, Anpassungs-, Variantenkonstruktion (allein abhängig vom Umfang der benutzten Lösungselemente/-muster).
- Der CPM/PDD-Ansatz eignet sich grundsätzlich zur Integration anderer Modelle, Methoden und Werkzeuge (selbst bisher als unvereinbar gesehener Konzepte wie „europäische/deutschsprachige Schule“ der Konstruktionsmethodik und *Axiomatic Design* nach Suh, siehe Abschnitt 3.3.3).

Wie bereits eingangs erwähnt, beschäftigte sich bereits der allererste Beitrag über die Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen auf Basis von Produktmerkmalen und -eigenschaften – gehalten auf dem DFX-Symposium 2000 – mit dem Thema der Computerunterstützung [2]. Diese Frage ist in weiteren Artikeln immer wieder behandelt worden, wobei sich der CPM/PDD-Ansatz stets als gute Möglichkeiten zur Einordnung, Entwicklung und Anwendung von Software-Werkzeugen zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses erwiesen hat.

Es ist unmöglich, im Rahmen des vorliegenden Beitrages alle Erkenntnisse hierzu darzustellen, daher seien nur die wichtigsten Aussagen stichwortartig zusammengefasst (näheres siehe in [2, 24, 26-29]):

- Die wichtigste Klasse von Computer-Werkzeugen im Sinne des kontinuierlichen Prozessfortschrittes sind Werkzeuge zur Analyse bestimmter Produkteigenschaften, also Realisierungen der R_j -Kästen nach Bild 2 durch Software – in der CAX-Terminologie: CAE-Systeme (Computer-Aided Engineering).
Sie sollten konsequent nach den Eigenschaften, über die sie Auskunft geben, sowie nach dem erforderlichen Detaillierungsgrad der Lösung (= benötigte Anzahl bereits festgelegter Merkmale → Einsatzmöglichkeit in frühen bzw. späten Phasen) klassifiziert werden, was in der Praxis oft nicht geschieht. Insgesamt werden sehr viele verschiedene CAE-Werkzeuge benötigt, weil anhängig von der Produktklasse, teilweise auch abhängig vom einzelnen Unternehmen sehr viele verschiedene Eigenschaften als relevant angesehen werden können.
- Die Rolle der Geometriemodellierung (und der CAD-Systeme, welche diese Aufgabe übernehmen) ist es eigentlich, die CAE-Systeme mit den jeweils notwendigen (Ausschnitten der) Geometrieinformationen zu versorgen.

- In Bezug auf Computer-Werkzeuge für die Synthese (Realisierungen der R_j^{-1} -Kästen nach Bild 3) sieht der Autor derzeit nur zwei gangbare Ansätze:
 - Software, die auf bekannten Lösungselementen/-mustern beruht: Letztlich sind dies die „klassischen“ CAx-Makros, -Variantenprogramme, Feature-Modellierer usw.
 - Optimierungsmethoden/-werkzeuge (CAO, *Computer-Aided Optimization*): Diese bilden die Zyklen aus Synthese-Analyse-Evaluation des Produktentwicklungsprozesses insgesamt nach (siehe Abschnitt 3.3.1). Das Problem ist, dass nach derzeitigem Erkenntnisstand allenfalls einige wenige Eigenschaften gleichzeitig betrachtet werden können, aber nicht die Gesamtheit aller (relevanten) Eigenschaften, die zudem von Produkt(klasse) zu Produkt(klasse) stark unterschiedlich ist. Beispiel: So genannte Strukturoptimierer, die bereits kommerziell erhältlich sind, betrachten typischerweise die Eigenschaften „mechanisches Verhalten“ und „Gewicht“; sie liefern aber oft fertigungstechnisch gar nicht machbare Lösungsvorschläge, weil die Eigenschaft „Fertigungsgerechtigkeit“ nur sehr schwierig erfasst werden kann (allenfalls unter Vorgabe einer konkreten Technologie).
- Es wurden die Rolle und die Entwicklungsmöglichkeiten von PDM/PLM-Systemen (Product Data Management, Product Lifecycle Management) diskutiert.
- CPM/PDD liefert neue Einsichten in den Aufbau Computer-basierter Produktmodelle.
- CPM/PDD bietet eine gute Grundlage für die Definition des Terminus „Virtuelle Produktentwicklung“ und für die Einsatzmöglichkeiten von Techniken der Virtuellen Realität im Produktentwicklungsprozess.

Weitere Themengebiete, die in der Gruppe des Autors auf der Basis des CPM/PDD-Ansatzes untersucht worden sind, seien nur stichwortartig genannt:

- Modellierung und Gestaltung kombinierter Sach- und Dienstleistungen (*Product-Service Systems* [PSS], „hybride Leistungsbündel“) mit Hilfe des CPM/PDD-Ansatzes [30, 31].
- Steuerung des Produktentwicklungsprozesses nicht anhand technischer Eigenschaften, sondern anhand von Kosten- und Wertfunktionen [32, 33].

-
- In Kooperation mit Kollegen aus der Fertigungs(system)planung wurden die Anwendungsmöglichkeiten des CPM/PDD-Ansatzes auch in diesem Bereich untersucht [34].
 - Modellieren und Verfolgen von Technischen Produktänderungen (*engineering change management*) mit Hilfe von aus dem CPM/PDD-Ansatz abgeleiteten Matrixrepräsentationen [35, 36].
 - Erstellen digitaler Lösungskataloge auf der Basis der des CPM/PDD-Konzeptes für Lösungselemente/-muster [37, 38].
 - Betrachtung der Begriffe „Konstruktions-/Produktentwicklungswissen“ aus der Perspektive des CPM/PDD-Ansatzes [39, 40].
 - Auswahl von Lösungsprinzipen und Lösungselementen (hier konkret: Aktuatoren) basierend auf Merkmals-/Eigenschaftserwägungen [41].

Alle diese unter Beteiligung des Autors durchgeführten Untersuchungen verfolgten unter anderem den Zweck, den „eigenen“ CPM/PDD-Ansatz mit einer Vielzahl aktueller Fragen zu konfrontieren, um seine Grenzen auszuloten oder gar – gemäß Popper [42] – das eine Falsifikationsbeispiel zu finden, welches das ganze „Theoriegebäude“ in Frage stellt. Dies ist nicht gelungen, andererseits konnten aber auch nicht zu allen Fragen revolutionäre neue Erkenntnisse gewonnen werden. Dinge, die offen geblieben sind, werden in Abschnitt 4.2 dargestellt.

Bevor hierauf eingegangen wird, sei erwähnt, dass der CPM/PDD-Ansatz auch außerhalb der eigenen Gruppe einigen Widerhall fand und recht oft zitiert wurde. Am intensivsten fand die Auseinandersetzung mit CPM/PDD vielleicht in dem Bayerischen Forschungsverbund FORFLOW statt (Prozess- und Workflowunterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung), an dem Wissenschaftler aus den Bereichen Konstruktionstechnik, Wirtschaftsinformatik und Informatik von vier Bayerischen Universitäten beteiligt waren [43].

4.2 Was ist offen geblieben?

Obwohl im Rahmen von Industrieprojekten kleinere Teile des CPM/PDD-Ansatzes erprobt und umgesetzt werden konnten (oft im Zusammenhang mit der Erneuerung der CAx-Architektur), steht eine umfassende Implementierung und Überprüfung auf mögliche Vorteile in der Industriepraxis noch aus (etwa entlang der in [23] geäußerten Ideen). Hier teilt CPM/PDD das Schick-

sal der meisten anderen neuen Ansätze aus der Konstruktionstheorie und -methodik: Aufwand und Risiko einer Umsetzung sind hoch, außerdem sind – wie bereits in Abschnitt 2 kurz angesprochen – Evaluationen im Rahmen der empirischen Konstruktionsforschung generell schwierig.

Entgegen ursprünglichen Hoffnungen, den Fokus gegenüber klassischen konstruktionsmethodischen Konzepten aufweiten zu können, ist (auch) CPM/PDD bis heute deutlich auf mechanische Produkte begrenzt geblieben – elektrische/elektronische und Software-Komponenten und damit mechatronische Produkte lassen sich kaum sinnvoll unterbringen.

Die Diagnose des Autors ist, dass auf der Seite der Merkmalsmodellierung (siehe Bild 1 links) noch Defizite bestehen: Die (aus dem CAD- und PDM-Bereich übernommene) hierarchische Gliederung der Merkmale reicht nicht aus; es fehlen die logisch-funktionalen Kopplungen/Verbindungen der Elemente. Jedem Ingenieur ist geläufig, dass diese zur Erfassung der Strukturen von elektrischen/elektronischen und Software-Komponenten unerlässlich sind; sie existieren jedoch auch in mechanischen (Teil-) Systemen, etwa in Form der Kopplungen (oder „Schlüsse“ oder „Wirkflächenpaarungen“) zwischen Elementen, sie werden hier jedoch traditionell nicht explizit dargestellt.

Es ist denkbar, dass sich dieser Mangel durch Integration des Contact & Channel Models (C&CM) von Albers und Matthiesen [16, 17] beheben oder abmildern lässt, gerade weil dieses neben mechanischen Kontakten auch fluiddische, elektrische, sogar informationstechnische „Kontakte“ betrachtet. Entsprechende Diskussionen sind geführt worden, es hat sich aber noch keine Gelegenheit zur Durchführung solcher Untersuchungen ergeben.

Ähnliches wie für mechatronische Produkte gilt für *Product-Service Systems* (PSS): Hier ist es trotz einiger Bemühungen nicht überzeugend gelungen, auf der Merkmalsseite ein schlüssiges Konzept zu erarbeiten, welche Parameter eine Dienstleistung definieren und wie diese – gemeinsam mit den Merkmalen der Sachleistungen – zu strukturieren sind.

Auch auf der Seite der Eigenschaftsmodellierung (Bild 1 rechts) bestehen noch offene Fragen. Diese betreffen insbesondere die Dekomposition von Eigenschaften eines Produktes: Es gibt kein theoretisch fundiertes Konzept, sondern nur (in der Regel branchen-/unternehmensspezifische) Erfahrungswerte, wie man Produkteigenschaften auf handhabbare Parameter zurückführt; ebenso ist völlig unklar, wie sich Eigenschaften des Produktes auf die Eigenschaften seiner Komponenten verteilen oder „vererben“ lassen.

In diesem Bereich kann es durchaus sein, dass keine Lösung möglich ist: Bereits im Abschnitt 3.1 wurde darauf hingewiesen, dass auf Seiten der Eigenschaften im hier diskutierten Sinne keine Vollständigkeit erreicht werden kann, sondern dass es stets nur um „*islands of knowledge*“ (Zitat Armand Hatchuel im Zusammenhang mit seiner C-K-Theorie [18]) geht.

Schließlich ist es noch nicht abschließend gelungen, die Abfolge mehrerer hierarchisch aufeinander aufbauender Objekte mit ihren zugehörigen Merkmals-Eigenschafts-Netzwerken (z.B. entsprechend Bild 2) schlüssig zu beschreiben, **Bild 9**. Eine Klärung dieser Frage wäre deshalb äußerst interessant, weil sich dann Entwicklungsprozesse in aufeinander aufbauenden Systemen (z.B. Werkstoff – Komponente – (technisches) Produkt – (technisches) System – sozio-technisches System) besser strukturieren ließen: Was sind für die Akteure auf den einzelnen Ebenen die beeinflussbaren Merkmale und die zu realisierenden Eigenschaften? In welchem Zusammenhang stehen die auf einer unteren Ebene erzeugten Eigenschaften mit den Merkmalen der nächsthöheren Ebene?

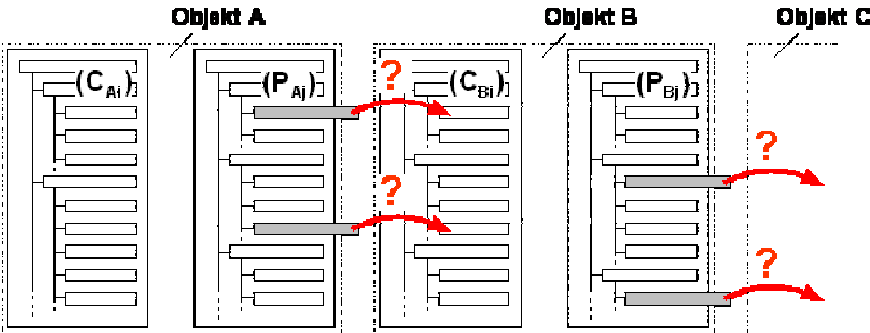


Bild 9: Modellierung mehrerer hierarchisch aufeinander aufbauender Objekte mit ihren zugehörigen Merkmals-Eigenschafts-Netzwerken (ungeklärt)

4.3 Schlusswort

Der Autor betrachtet es als Zu-Fall (im eigentlichen Wortsinn) und nicht als Verdienst, wenn man einen kleinen Beitrag zu den theoretischen Grundlagen der eigenen Disziplin leisten kann, der in der „scientific community“ eine gewisse Beachtung findet. Dabei sind die intensiven Diskussionen mit Kollegen und Kolleginnen vielleicht die erfüllendste Erfahrung.³ Bei allem ist es Pflicht, offen für andere Ideen zu bleiben, Kritik dankbar anzunehmen und der Falsifizierung der eigenen Ideen freudig entgegen zu sehen (wenn möglich: sie selbst sogar aktiv zu betreiben).

Literatur

- [1] Andreasen, M.M.: Synthesis Methods as System Basis – a Contribution to a Design Theory (in Danish). Dissertation, Lund University, 1980.
- [2] Weber, C.; Werner, H.: Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozessmodells. In: Meerkamm, H. (ed.), Proceedings of DfX 2000, pp. 126-143. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.
- [3] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI, Düsseldorf, 1986.
- [4] Grabowski, H.; Rude, S.; Grein, G. (eds.): Universal Design Theory. Proceedings of the Workshop „Universal Design Theory“. Shaker, Aachen, 1998.
- [5] Birkhofer, H.: The Consolidation of Design Science – a Critical Review of the Status and some Proposals to Improve it. In: Hosnedl, S.; Vanek, V., Proceedings of the AEDS Workshop 2006 (Applied Engineering Design Science), pp. 13-22. University of West Bohemia, Pilsen, 2006.

³ Interessante, zum Teil auch konstruktiv-kontroverse Diskussionen über CPM/PDD und die Konstruktionstheorie und -methodik im Allgemeinen ergaben und ergeben sich insbesondere mit den Kollegen bzw. Kolleginnen Albers (Karlsruhe), Andreasen (Kopenhagen), Birkhofer (Darmstadt), Blessing (Luxemburg), Lindemann (München), Meerkamm (Erlangen), Paetzold (München), Vajna (Magdeburg), Wartzack (Erlangen) und Zeman (Linz).

-
- [6] Suh, N.P.: The Principles of Design. Oxford University Press, 1990.
- [7] Suh, N.P.: Axiomatic Design. Oxford University Press, 2001.
- [8] Gero, J.S.: Design Prototypes – a Knowledge Representation Schema for Design. *AI Magazine* 11 (1990) 4, pp. 26-36.
- [9] Vajna, S.; Wegner, B.: Autogenetische Konstruktionstheorie – Evolutionärer Ansatz einer erweiterten Konstruktionstheorie. In: Meerkamm, H. (ed.), *Proceedings of Symposium „Fertigungsgerechtes Konstruieren“*, pp. 116-125. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [10] Vajna, S., Clement, S., Jordan, A., Bercsey, T.: The Autogenetic Design Theory – an Evolutionary View of the Design Process. *Journal of Engineering Design* 16 (2005) 4. pp. 423-440.
- [11] Franke, H.-J.: Ungelöste Probleme der Konstruktionsmethodik. In: Franke, H.-J.; Krusche, T.; Mette, M. (eds.): *Konstruktionsmethodik – Quo vadis? Symposium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Roth*, pp. 13-30. Institut für Konstruktionslehre der TU Braunschweig, Bericht Nr. 56, 1999.
- [12] Birkhofer, H.: There is nothing as practical as a good theory – an attempt to deal with the gap between design research and design practice. In: Marjanovic, D. (ed.), *Proceedings of Design 2004*, pp. 7-14. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2004.
- [13] Spur, G.; Krause, F.-L.: *Das virtuelle Produkt*. Hanser, München, 1998.
- [14] Meerkamm, H.: Design System mfk – an Important Step towards an Engineering Workbench. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE)*, Vol. 207, *Journal of Engineering Manufacture*, 1993, pp. 105-116.
- [15] VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme / Design Methodology for Mechatronic Systems*. VDI, Düsseldorf, 2004.

-
- [16] Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation Universität Karlsruhe, IPEK-Forschungsberichte Bd. 6, Karlsruhe, 2002.
- [17] Albers, A.; Matthiesen, S.; Ohmer, M.: An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems. In: Folkesson, A.; Gralén, K.; Norell, M.; Sellgren, U. (eds.), Proceedings of ICED 03. The Design Society & the Royal Institute of Technology, Glasgow/Stockholm, 2003.
- [18] Hatchuel, A.; Weil, B.: A New Approach of Innovative Design - an Introduction to C-K Theory. In: Folkesson, A.; Gralén, K.; Norell, M.; Sellgren, U. (eds.), Proceedings of ICED 03. The Design Society & the Royal Institute of Technology, Glasgow/Stockholm, 2003.
- [19] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer, Berlin-Heidelberg, 2005.
- [20] Hubka, V.; Eder, W.E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaft. Springer, Berlin-Heidelberg, 1992.
- [21] Birkhofer, H.; Wäldele, M.: The Concept of Product Properties and its Value for Research and Practice in Design Birkhofer. In: Norell, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (eds.), Proceedings of ICED 09, Vol. 2, pp. 227-238. The Design Society, Glasgow, 2009.
- [22] Wäldele, M.: Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte : ein Beitrag für die konventionelle und algorithmenbasierte Produktentwicklung. Dissertation TU Darmstadt 2011. Fortschrittberichte VDI, Reihe 1, Bd. 414, Düsseldorf 2012.
- [23] Weber, C.: How to Derive Application-Specific Design Methodologies. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojetic, N. (eds.), Proceedings of Design 2008, Vol. 1, pp. 69-80. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2008.

-
- [24] Weber, C.: CPM/PDD – An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In: Bley, H.; Jansen, H.; Krause, F.-L.; Shpitalni, M. (eds.), Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium, pp. 159-179. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 2005.
- [25] Weber, C.: Looking at “DFX” and “Product Maturity” from the Perspective of a New Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In: Krause, F.-L. (ed.), Proceedings of the 17th CIRP Design Conference, The Future of Product Development, pp. 85-104. Springer, 2007.
- [26] Vajna, S.; Weber, C.; Zeman, K.; Bley, H.: CAx für Ingenieure – eine praxisbezogene Einführung (2. Auflage). Springer, Berlin-Heidelberg, 2009.
- [27] Weber, C.; Werner, H.; Deubel, T.: A Different View on PDM and its Future Potentials. Journal of Engineering Design 14 (2003) 4, pp. 447-464.
- [28] Weber, C.: Design Theory and Methodology – Contributions to the Computer Support of Product Development/Design Processes. In: Birkhofer, H. (ed.), The Future of Design Methodology. Springer, London, 2011.
- [29] Weber, C.; Husung, S.: Virtualisation of Product Development/Design – Seen from Design Theory and Methodology. In: Culley, S.J.; Hicks, B.J.; McAlloone, T.C.; Howard, T.J.; Reich, Y. (eds.), Proceedings of ICED 11, Vol. 2, pp. 226-235. The Design Society, Glasgow, 2011.
- [30] Weber, C.; Steinbach, M.; Botta, C.; Deubel, T.: Modelling of Product-Service Systems (PSS) Based on the PDD Approach. In: Marjanovic, D. (ed.), Proceedings of Design 2004, pp. 547-554. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2004.
- [31] Steinbach, M.: Systematische Gestaltung von Product-Service Systems – Integrierte Entwicklung von Product-Service Systems auf Basis der Lehre von Merkmalen und Eigenschaften. Dissertation Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2005. Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 35.

-
- [32] Deubel, T.; Steinbach, M.; Weber, C.: Anforderungs- und kostengetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesses. In: Meerkamm, H. (ed.), Proceedings of DfX 2004, pp. 143-152. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2004.
- [33] Deubel, T.: Anforderungs-, kosten- und wertgetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2007. Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 39.
- [34] Deubel, T.; Zenner, C.; Bley, H.; Weber, C.: Adaptation of a New Design Method for the Requirement-Driven Planning of Manufacturing Systems. In: Gu, P.; Xue, D.; Ramirez-Serrano, A.; Park, S.; Fletcher, D. (eds.), Proceedings of the 16th CIRP International Design Seminar, Paper no. 10061, pp. 529-534. Kananaskis, Canada, 2006.
- [35] Köhler, C.; Conrad, J.; Wanke, S.; Weber, C.: A Matrix Representation of the CPM/PDD Approach as a Means for Change Impact Analysis. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojetic, N. (eds.), Proceedings of Design 2008, Vol. 1, pp. 167-174. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2008.
- [36] Köhler, C.: Technische Produktänderung – Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf der Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes. Dissertation Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2009. Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 45.
- [37] Wanke, S.; Conrad, J.; Köhler, C.: Verhaltensbeschreibende Produktkataloge – ein Anwendungspotential der Solution Patterns des CPM/PDD-Ansatzes. In: Meerkamm, H. (ed.), Proceedings of DFX 2007, pp. 93-102. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2007.
- [38] Wanke, S.: Neue Konzepte zur Verwaltung und Bereitstellung von Lösungen im Produktentwicklungsprozess – CPM/PDD-Lösungsmuster als Grundlage eines verhaltensbeschreibenden Lösungskataloges. Dissertation Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2010. Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 48.
- [39] Conrad, J.; Köhler, C.; Wanke, S.; Weber, C.: What Is Design Knowledge from the Viewpoint of CPM/PDD? In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojetic, N. (eds.), Proceedings of Design 2008, Vol. 2, pp. 745-752. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2008.

-
- [40] Conrad, J.: Semantische Netze zur Erfassung und Verarbeitung von Informationen und Wissen in der Produktentwicklung. Dissertation Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2010. Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 49.
- [41] Erbe, T.; Weber, C.; Paetzold, K.: Actuation Principle Selection – an Example for Trade-off Assessment by CPM-Approach. In: Culley, S.J.; Hicks, B.J.; McAlloone, T.C.; Howard, T.J.; Lindemann, U. (eds.), Proceedings of ICED 11, Vol. 4, pp. 222-229. The Design Society, Glasgow, 2011.
- [42] Karl R. Popper: Logik der Forschung. Julius Springer, Wien, 1935.
- [43] Meerkamm, H.; Henrich, A.; Jablonski, S.; Krcmar, H.; Lindemann, U.; Rieg, F. (eds.): Flexible Prozessunterstützung in der Produktentwicklung – Prozesse, Daten, Navigation. Abschlussbericht des Bayerischen Forschungsverbundes FORFLOW 2006-2009. Shaker, Aachen, 2009.

Die Rolle des Wissensingenieurs im Unternehmen – Ergebnisse einer Umfrage und Darstellung in der VDI-Richtlinie "Wissensbasiertes Konstruieren"

Thomas Luft¹, Thilo Breitsprecher¹, Daniel Roth², Kai Lindow³, Sandro Wartzack¹ und Hansgeorg Binz²

¹Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, FAU Erlangen-Nürnberg;

²Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Uni Stuttgart;

³Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin;

Knowledge Based Engineering (KBE) offers a variety of methods and tools to design engineers in order to meet the challenges of modern product development processes. However, no universal and consistent approach exists to guide design engineers through the process of developing, implementing and running a KBE application. This led to the establishment of a working group within the VDI (Verein Deutscher Ingenieure). The members are from German companies and research institutes that deal with KBE applications, methods and tools. The aim is to develop a new VDI guideline that describes a methodical procedure for the implementation of a KBE application (referred to as KBE project). A unique approach is the definition of roles within a KBE project that contribute in different manners depending on the actual project step. The most important role in this case is the knowledge engineer. The role of the knowledge engineer is described in this paper according to the VDI guideline and subsequently this description is compared with the result of a current industrial survey.

1 Motivation für die VDI-Richtlinie „Wissensbasiertes Konstruieren“

Das Konstruieren ist der Kernprozess aller ingenieurmäßigen Planungstätigkeiten in den Entwicklungsabteilungen moderner Unternehmen, unabhängig davon ob sie im Maschinen- und Anlagenbau, im Bereich Automotive oder in der Luftfahrtbranche vertreten sind. Das Arbeitsumfeld der Konstrukteure ist jedoch einem ständigen Wandel unterlegen: Eine Studie des VDMA (Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e. V.) zeigt, dass aufgrund der fortschreitenden Globalisierung der Märkte, dem steigenden Innovationsdruck und der erhöhten Individualität und Dynamik der einzelnen Absatzregionen, die Anforderungen an die Produkte immer differenzierter werden. Die Unternehmen erkennen die Notwendigkeit, ihre Produkte und die damit verbundenen Produktentwicklungsprozesse an die neuen Anforderungen anzupassen [14].

Das „Wissensbasierte Konstruieren“ (kurz: KBE für knowledge based engineering) stellt hierfür mächtige Werkzeuge und Methoden bereit, auf die der Konstrukteur zurückgreifen kann. KBE bezeichnet allgemein die gedankliche Durchdringung eines Konstruktionsprozesses, so dass dieser, zumindest auf Teilstrecken, rechnerunterstützt implementiert werden kann [12]. Wie eine einheitliche und möglichst allgemeingültige Vorgehensweise für KBE-Anwendungen in Unternehmen realisiert werden kann, existiert bis dato jedoch nicht. Dies motivierte Vertreter von Firmen, die kundenindividuelle KBE-Lösungen entwickeln, und Mitglieder von Forschungseinrichtungen, die im Bereich wissensbasierte Methoden und Werkzeuge tätig sind, den Fachausschuss „Wissensbasiertes Konstruieren“ des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zu gründen. Das gesetzte Ziel des VDI FA 111 ist es, eine Richtlinie zu erarbeiten, die eine methodische Vorgehensweise zur Implementierung einer KBE-Anwendung beschreibt. Eine solche Implementierung wird im Rahmen der Richtlinie als KBE-Projekt aufgefasst. Mithilfe der Richtlinie sollen die mit einem KBE-Projekt beauftragten Mitarbeiter mit der Gewissheit vorgehen können, nichts Grundlegendes falsch zu machen. Der Anwender der VDI-Richtlinie erhält auf der einen Seite konkrete und anwendungsbezogene Vorschläge und kann sich gleichzeitig, wie in [16] gefordert, auf wissenschaftlich fundierte Inhalte verlassen.

Grundlage für die pragmatische Durchführung eines KBE-Projekts ist eine systematische Gesamtvorgehensweise. Diese wurde im Rahmen von regelmäßigen Treffen erarbeitet und ist in Bild 1 dargestellt. Die Phasen Planung, Entwicklung, Test und Betrieb werden im vorliegenden Beitrag erläutert.

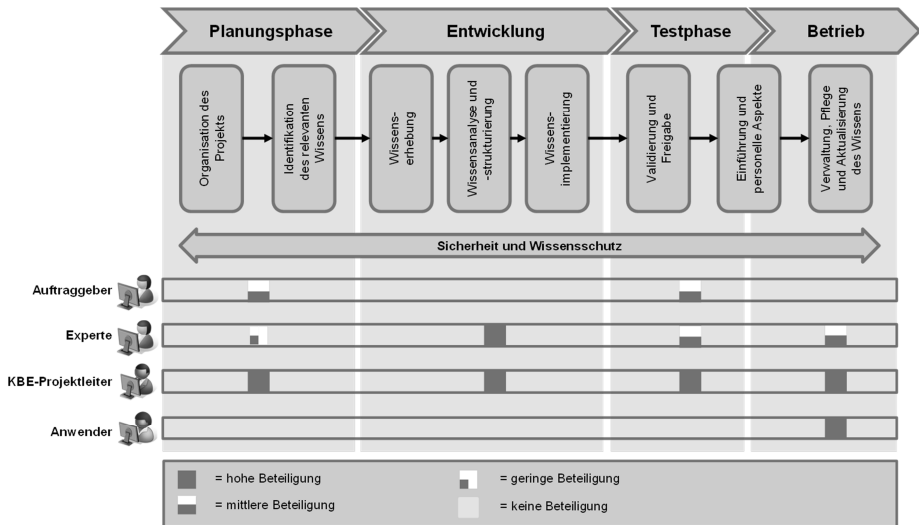


Bild 1: Gesamtvorgehensweise der Richtlinie

Eine selbstgestellte Anforderung an den FA 111 ist es, die zur Umsetzung eines KBE-Projekts relevanten Rollen zu identifizieren und zu beschreiben. Durch dieses „Denken in Rollen“ werden, im Gegensatz zu einem „Denken in Personen“, auch kleinere Unternehmen oder Abteilungen in die Lage versetzt, ein KBE-Projekt durchzuführen. Eine zentrale Stellung nimmt die Rolle des Wissensingenieurs ein, da dieser sowohl Aspekte des wissensbasierten Konstruierens als auch des übergeordneten, firmeninternen Wissensmanagements berücksichtigen muss. Nach einer allgemeinen Darstellung der Rollen eines KBE-Projekts geht dieser Beitrag, auf Basis einer empirischen Untersuchung, abschließend auf die Rolle des Wissensingenieurs im Detail ein.

2 Zielsetzung, Vorgehensweise und Methoden des FA 111

Mit Hilfe der neuen Richtlinie sollen Unternehmen in die Lage versetzt werden, geeignete Methoden und Werkzeuge der wissensbasierten Konstruktion auszuwählen und eine KBE-Anwendung zu implementieren. Die Art der Anwendung ist dabei nicht festgelegt und kann vom einfachen Geometriefeature mit semantischen Informationen (z. B. Gussauge bei Kunststoffspritzgussbauteilen) bis hin zum komplexen Softwaresystem mit umfangreichen Benutzerschnittstellen für die Ein- und Ausgabe von Daten und Informationen reichen (z. B. Programm zur Getriebeauslegung). Unternehmen und Konstrukteure können somit auf den oben skizzierten Wandel ihres Arbeitsumfelds reagieren und ihren Entwicklungsprozess effizient gestalten.

In regelmäßigen Abständen kommt das gesamte Gremium des FA 111, unter der Leitung des Ausschussvorsitzenden Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack, zusammen und diskutiert den Fortschritt der Richtlinienarbeit, genehmigt Ausarbeitungen und legt die strategische Ausrichtung der Richtlinie fest. Parallel dazu finden Treffen in Arbeitsgruppen statt, die Inhalte zu bestimmten Teilaspekten der Richtlinie (z. B. Qualitätssicherungsmethoden für den Test einer KBE-Anwendung, Wissenserhebungsmethoden) erarbeiten.

Die Feststellung des realen Bedarfs bezüglich der Inhalte einer Richtlinie „Wissensbasiertes Konstruieren“ erfolgt insbesondere durch ergänzende empirische Untersuchungen. Hierfür werden Konstrukteure zu unterschiedlichen Gesichtspunkten im Rahmen fokussierter Interviews befragt. Neben den Möglichkeiten, ihr angeeignetes Wissen zu speichern, sind auch die Quellen eines Konstrukteurs von Interesse, aus denen er im Tagesgeschäft sein benötigtes Wissen je nach Konstruktionsaufgabe erhebt. Nach einer Analyse der Interviewergebnisse kann die Richtlinie entsprechend ergänzt werden. Die neu gewonnenen Erkenntnisse stehen somit später auch unerfahrenen KBE-Anwendern zur Verfügung und erleichtern ihnen die Einarbeitung in das Gebiet des „Wissensbasierten Konstruierens“. Weiterhin wurden Vertreter von CAD-Softwareentwicklern zu den Gremientreffen eingeladen, um darzulegen, wie die jeweiligen Produkte KBE-Anwendungen unterstützten. Der FA 111 formuliert aus den Vortragsinhalten CAD-softwareunabhängige Hinweise für die Implementierung einer KBE-Anwendung. Somit wird die Richtlinie dem Anspruch nach Allgemeingültigkeit gerecht und stellt richtungsweisende, technisch-wissenschaftliche Arbeitsunterlagen und Entscheidungshilfen zur Verfügung [16].

3 Ansatz zur Durchführung eines KBE-Projekts

Der übergeordnete Prozess besteht aus den Phasen Planung, Entwicklung, Test und Betrieb. Um die Zuweisung der notwendigen Tätigkeiten in den jeweiligen Phasen für den späteren Anwender der Richtlinie zu erleichtern, werden Rollen definiert, die in einem KBE-Projekt besetzt sein sollten. Diese Rollen – Auftraggeber, Experte, KBE-Projektleiter und Anwender – sind nicht an einzelne Personen gebunden, so dass auch Firmen mit geringeren personellen Kapazitäten die Richtlinie für ein KBE-Projekt anwenden können. Die unterschiedlichen Bedeutungen einer Rolle für die jeweiligen Phasen werden beurteilt, wodurch sich der personelle Aufwand je Phase abschätzen lässt. Die vier Phasen sind nochmals in konkrete Arbeitsschritte untergliedert und werden nun im Folgenden näher beschrieben (vgl. Bild 1).

3.1 Phasen eines KBE-Projekts

Mit Projektstart erfolgt in der **Planungsphase** die Projektierung und Vorbereitung eines KBE-Projekts. Dies beinhaltet die konzeptuelle Einbettung in die Unternehmensorganisation sowie die Identifikation des relevanten Wissens. Hierbei baut die Identifikation des relevanten Wissens, das für die Durchführung von Geschäftsprozessen notwendig ist, direkt auf unternehmensrelevante Organisationsaspekte auf. Aufbauend auf einer Machbarkeitsanalyse wird dem Management eine fundierte Entscheidung für oder gegen das KBE-Projekt ermöglicht.

Entscheidet sich das Management für die Durchführung des KBE-Projekts, so findet in der anschließenden Phase der **Entwicklung** des KBE-Projekts die Wissenserhebung statt. Diese Erhebung des impliziten und expliziten Wissens erfolgt auf Basis vorher identifizierter Wissensquellen und -träger sowie eine Bereinigung und eine abschließende Analyse des Wissens. Im Anschluss wird das Wissen strukturiert. Dies stellt eine wesentliche Vorarbeit für die spätere Bereitstellung, d. h. Repräsentation, des Wissens dar.

In der sich anschließenden **Testphase** wird basierend auf der Dokumentation bisheriger Schritte und der Vorstellung eines Prototyps im Management über die Freigabe des KBE-Projekts zur Realisierung entschieden. Meilenstein an dieser Stelle, ist die abgeschlossene Modellierung des KBE-Systems, sodass das Wissen sowie organisationale Aspekte auf Integrität, Redundanz und Konsistenz geprüft werden können.

Abschließend steht in der Phase des **Betriebs** die eigentliche Einführung in die IT-Landschaft und Unternehmensorganisation an. Nach der Implementierung und während des Betriebs des KBE-Systems muss dieses verwaltet und gepflegt werden. Hierzu zählen unter anderem die Aktualisierung des Wissens und auch Umstrukturierungen in der IT-Landschaft zur effizienteren Nutzung des Systems.

3.2 Rollen in einem KBE-Projekt

Peter Drucker (1909-2005) hat bereits 1959 den Begriff des „Wissensarbeiters“ geprägt. Das Ziel der Wissensarbeit ist es, die individuellen Kenntnisse und Fähigkeiten aller Mitarbeiter systematisch mit Hilfe geeigneter Organisationsstrukturen und effizienter Informations- und Kommunikationstechnologien im Unternehmen zu integrieren (z. B. durch KBE-Projekte) [3]. Die Mitarbeiter in KBE-Projekten verfügen meist über verschiedene Rollen, die sie in der Organisation wahrnehmen. Bereits bestehende Rollen im Unternehmen

(z. B. Produktentwickler, CAD-Konstrukteur, Berechnungsingenieur) sollen allerdings durch ein KBE-Projekt nicht ersetzt werden. Stattdessen werden den Rollen weitere, KBE-spezifische Funktionalitäten und Aufgaben zugewiesen. Darunter wird unter anderem die Bereitstellung, das heißt Repräsentation, von Wissen mittels geeigneter IT-Werkzeuge verstanden. Durch programmiertes, so genanntes explizit formuliertes Wissen, wird das unwissende Werkzeug in seiner Leistungsfähigkeit wesentlich verbessert. Mit KBE-Anwendungen lassen sich weitgehend bekannte Routinetätigkeiten automatisieren. Dies ist mit herkömmlichen Werkzeugen und Methoden (z. B. parametrisierten CAD-Modellen oder Verwendung von Konstruktionsfeatures) nicht möglich [7]. Die Hauptzielgruppe von KBE-Projekten sind neben den Ingenieuren und Experten im technischen Vertrieb insbesondere auch die Ingenieure mit komplexen Entwurfs- und Entwicklungsaufgaben [6]. Im Folgenden werden die wesentlichen Rollen eines KBE-Projekts beschrieben (siehe Bild 1).

Auftraggeber (z. B. Konstruktionsleiter): Der Auftraggeber ist für die Initialisierung eines KBE-Projekts zuständig. Die Motivation hierfür hat oft ökonomische Gründe (z. B. der Kostendruck in den Entwicklungsabteilungen, das Bestreben nach kürzeren Produktentwicklungszeiten). Immer mehr fallen aber auch strategische Gründe ins Gewicht, wie etwa das langfristige Sichern und Bereitstellen von Mitarbeiter-Knowhow oder das Bestreben nach Standardisierung und Modularisierung der Produktpalette. Der Auftraggeber ist zunächst an der Planungsphase des KBE-Projekts beteiligt, da er das Projektziel (z. B. Art und Umfang der KBE-Anwendung) festlegt und den Projektmitarbeiter, je nach Funktion und Qualifikation (Hard- und Softskills), dem Projekt zuweist. Im Verlauf des Projekts übernimmt er eine untergeordnete Funktion, da die Projektleitung nicht in seiner Hand liegt (siehe Wissensingenieur). Während der Testphase ist der Auftraggeber an der Validierung der KBE-Anwendung beteiligt und überprüft ob das gewünschte Ziel (z. B. Unterstützung bei der Auslegung von Welle-Nabe Verbindungen) erreicht wurde und die erhofften Verbesserungen eingetreten sind (z. B. Kostenersparnis, kürzere Konstruktionszeiten).

Experte (z. B. Konstrukteur, Fertigungsplaner, Montagearbeiter): Der Experte ist, neben dem Wissensingenieur, eine der wichtigsten Rollen in einem KBE-Projekt und in allen Phasen aktiv. In der Planungsphase unterstützt er durch das Anbieten seines Wissens aktiv die Identifikation des relevanten Wissens. Diese Funktion behält er in der Entwicklungsphase bei. In der Testphase unterstützt er bei der Überprüfung der KBE-Anwendung, beispielsweise durch die Vorgabe eines Testfalls. Im Verlauf der Betriebsphase assistiert der Experte dem Wissensingenieur beim Betrieb der KBE-Anwendung. Hierfür ist er angehalten, neues Wissen, das er etwa durch Projekterfahrung oder im

Rahmen von Schulungen erworben hat, dem Wissensingenieur anzubieten oder direkt in die Wissensbasis einzugeben. Über die gesamte Dauer des Projekts muss beim Experten jedoch eine entsprechende Motivation vorliegen, die sowohl durch den Auftraggeber als auch durch den KBE-Projektleiter geweckt und im Projektverlauf aufrechterhalten werden muss.

Anwender (z. B. CAD-Konstrukteur): Die Hauptaktivität der Anwender liegt in der Nutzung von KBE-Systemen, um ein bestimmtes Konstruktions- oder Berechnungsziel zu erreichen. Zeitlich lässt sich diese Rolle damit in den Betrieb des KBE-Systems eingliedern. In den vorgelagerten Schritten der Planung, Entwicklung wie auch Testphase spielt der Anwender keine aktive Rolle, wird indirekt aber sicherlich berücksichtigt. Das KBE-System muss dermaßen gestaltet sein, dass der Anwender in der Betriebsphase spezielle informationstechnische Systeme (z. B. CAD-System) anwenden kann und dabei z. B. Methoden wie das parametrische Modellieren mit zugehörigen Informationen zur Zielerreichung (z. B. Erstellen eines CAD-Modells) bereitgestellt bekommt.

KBE-Projektleiter (z. B. Wissensingenieur): Die Rolle des Wissensingenieurs wird im folgenden Kapitel detailliert beschrieben. Er ist über die gesamten Phasen, von der Planung bis zum Betrieb, eines KBE-Projekts aktiv.

Letztendlich kommt es in einem KBE-Projekt auf die Fähigkeit der Organisation an, eine Unternehmenskultur, die den Wissensaustausch zwischen Mitarbeitern fördert, zu schaffen. Die Mitarbeiter sollen so in ihrer jeweiligen Rolle befähigt und somit in die Lage versetzt werden, die dazugehörigen Tätigkeiten und Aufgaben effizient ausführen zu können.

4 Die Rolle des Wissensingenieurs

Eine erfolgreiche und unternehmensübergreifende Nutzung von KBE-Anwendungen und Wissensmanagementsystemen sowie deren konsistenter Weiterentwicklung erfordert eine genaue Definition von funktionalen Verantwortlichkeiten [7]. Eine der wichtigsten Rollen ist die des Wissensingenieurs [4], die in diesem Abschnitt zunächst aus bibliographischer und anschließend aus empirischer Sicht betrachtet wird.

4.1 Der Wissensingenieur aus bibliographische Sicht

Nach SCHOTT sind Akteure eines wissensorientierten Unternehmens alle an Handlungen beteiligten (Wissens-)Mitarbeiter, die entweder Wissensanbieter oder Wissensträger sein können [13]. Eine abgestimmte Interaktion der verschiedenen Akteure bzw. Rollen ist dabei für die Effizienz des Wissensmana-

gements entscheidend [7]. In der Literatur werden zahlreiche Ansätze zur Darstellung verschiedener Rollen mit ihren jeweiligen spezifischen Aufgaben, Zuständigkeiten und Beziehungen im Wissensmanagement beschrieben und voneinander abgegrenzt (vgl. , [1], [2], [7], [9], [10], [11], [15], [17]).

Im Folgenden wird die auf NONAKA aufbauende und von NORTH ergänzte Rollenbeschreibung beleuchtet. Dabei ergänzt NORTH die drei Rollen Wissenspraktiker, Wissensingenieure und Wissensmanager von NONAKA [9] um die beiden Gruppen Supportmitarbeiter und Informationsbroker bzw. Infrastrukturmanager (vgl. Bild 3) [10]. Diese Rollen werden wie folgt beschrieben:

Wissensingenieure haben eine Vermittlerrolle und schlagen vor allem eine Brücke zwischen den visionären Ideen der Unternehmensführung bzw. der Wissensmanager und den operativ an den realen Geschäftsprozessen arbeitenden Wissenspraktikern. Zu den Aufgaben von Wissensingenieuren gehört nach KARBACH daher der gesamte Planungs-, Entwicklungs- und Betriebsprozess eines wissensbasierten Systems. Dies umfasst die ersten Vorstudien (z. B. Machbarkeitsstudien), die Auswahl von geeigneten Werkzeugen, die Akquisition von Wissen (z. B. Wissenserhebung, -interpretation, -modellierung und -repräsentation) sowie die Integration in die IT-Landschaft des Unternehmens und die Weiterentwicklung des Wissensmanagementsystems einschließlich sämtlicher KBE-Projekte. Eine wesentliche Aufgabe des Wissensingenieurs ist es, menschliches Expertenwissen durch geeignete Methoden (z. B. Dokumentenanalyse, Experteninterviews, moderierte Workshops) zu sammeln und anschließend in einer Wissensbasis (z. B. KBE-System) abzulegen [4], [8]. Dazu rufen Wissensingenieure das explizite und implizite Wissen der Wissenspraktiker ab, vernetzen es problembezogen miteinander und stellen es auf formalisierte Weise dar, um es für wissensbasierte Systeme verfügbar zu machen. Das durch die vier Formen der Wissensumwandlung (Sozialisierung, Externalisierung, Internalisierung, Kombination) und durch die Wissensspirale entstehende Wissen dient unter anderem der Verbesserung von Produktkonzepten und der effizienteren Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen [5], [9], [18]. Nach BIMAZUBUTE muss ein Wissensingenieur eine möglichst breite Ausbildung sowie eine umfassende Allgemeinbildung aufweisen [1]. Hierbei sind solide Kenntnisse sowohl in den Informations- und Kommunikationswissenschaften als auch in den Humanwissenschaften erforderlich. Zudem sollte der Wissensingenieur auch grundlegende Kenntnisse der Psychologie, Logik, Systemanalyse und Linguistik haben sowie geeignete Methoden aus der empirischen Sozialforschung beherrschen [1]. Wissensingenieure sind daher mittlere Führungskräfte, die Kundenanforderungen und Marktpotenziale durch das Bündeln des Wissens der Wissen-

spraktiker in Lösungen umsetzen und dadurch unternehmerisch tätig werden [10].

Wissenspraktiker sind eine Gruppe, die aufgrund ihres Status als Fachexperten oder besonderer Erfahrungen und Kontakte zur Außenwelt den operativen Kern der Wissensarbeit bilden. Nach NONAKA sammeln, erzeugen und entwickeln diese Wissensarbeiter nicht nur explizites sondern auch implizites Wissen und lernen bei der professionellen Ausführung ihrer Tätigkeiten vor allem fachlich ständig dazu [9]. Dabei hängt die Qualität des geschaffenen Wissens von den Erfahrungen aus ihrem Arbeitsalltag ab. Aus diesem Grund sollten Wissenspraktiker insbesondere von den Wissensmanagern möglichst anspruchsvolle und herausfordernde Aufgaben übertragen bekommen. Die Wissenspraktiker können in die komplementären Gruppen der Wissenswerker und der Wissensspezialisten differenziert werden. Wissenswerker erzeugen und sammeln insbesondere durch physische Erfahrungen implizites Wissen (z. B. auf Erfahrungen beruhende Fertigkeiten), arbeiten meist geistig und physisch und stehen im regelmäßigen Kontakt zu realen Geschäftsprozessen. Zu dieser Gruppe zählen Verkäufer, Key Account-Manager, Facharbeiter in der Montage und Handwerker. Die zweite Gruppe, die Wissensspezialisten, analysieren und mobilisieren strukturiertes explizites Wissen (z. B. quantifizierbare wissenschaftliche und technische Daten). Wissensspezialisten sind daher insbesondere in F&E-Abteilungen und Stabsbereichen (z. B. Finanzen, Personal, Recht, Marktforschung) zu finden. Zudem gehören auch Softwareingenieure, Entwicklungsingenieure und Verkaufsingenieure zu den Wissensspezialisten eines Unternehmens [9], [10], [18].

Wissensmanager (auch als Wissensverwalter bezeichnet) sind nach NORTH die Gruppe von Wissensarbeitern, die wissensfördernde Rahmenbedingungen schaffen und die auf die Unternehmensziele ausgerichteten Wissensaktivitäten kontrollieren [10]. Zu den Aufgaben von Wissensmanagern gehört die Etablierung einer Unternehmensvision (z. B. in Form einer Unternehmenspolitik) zur Festlegung des Wertesystems, mit dessen Hilfe das vom Unternehmen erzeugte Wissen erläutert, bewertet und gerechtfertigt werden kann. Die Kommunikation von unternehmensübergreifenden Wissensstrategien und -zielen ist daher eine weitere Aufgabe. Außerdem sind Wissensmanager auch für die Erklärung des ständig neu geschaffenen Wissens verantwortlich. Sie entscheiden strategisch mittels qualitativer und quantitativer Kriterien darüber, welche Wissensinitiativen und -instrumente zukünftig gefördert werden (z. B. KBE-Projekte). Bei Wissensmanagern handelt es sich um Visionäre und Kontextgestalter, die im Top-Management zu finden sind. Sie sind also die oberen Führungskräfte eines Unternehmens, die das ganzheitliche Wissensmanagement verantworten [9], [10], [18].

Informationsbroker und Infrastrukturmanager (IuI-MA) gehören nach NORTH aufgrund ihrer Qualifikation zu den fachlichen Wissensarbeitern und können wegen ihrer Aufgaben auch als Informations- und Kommunikationsmitarbeiter bezeichnet werden [10]. Sie übernehmen insbesondere unterstützende Tätigkeiten, wie die technische (v. a. Infrastrukturmanager) und inhaltliche (v. a. Informationsbroker) Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationsstruktur des Unternehmens. In dieser Gruppe sind daher unter anderem Wirtschaftsinformatiker, IT-Administratoren, Informatiker und Informations- und Kommunikationswissenschaftler zu finden [10].

Support-Mitarbeiter (SP-MA) unterstützen die anderen Mitarbeitergruppen gezielt und haben aufgrund ihrer Tätigkeiten einen großen Einfluss auf das Image des Unternehmens beim Kunden. Bei den Support-Mitarbeitern handelt es sich nach NORTH um Mitarbeiter in Sekretariaten, Backoffices, Call-Centern und Pforten [10].

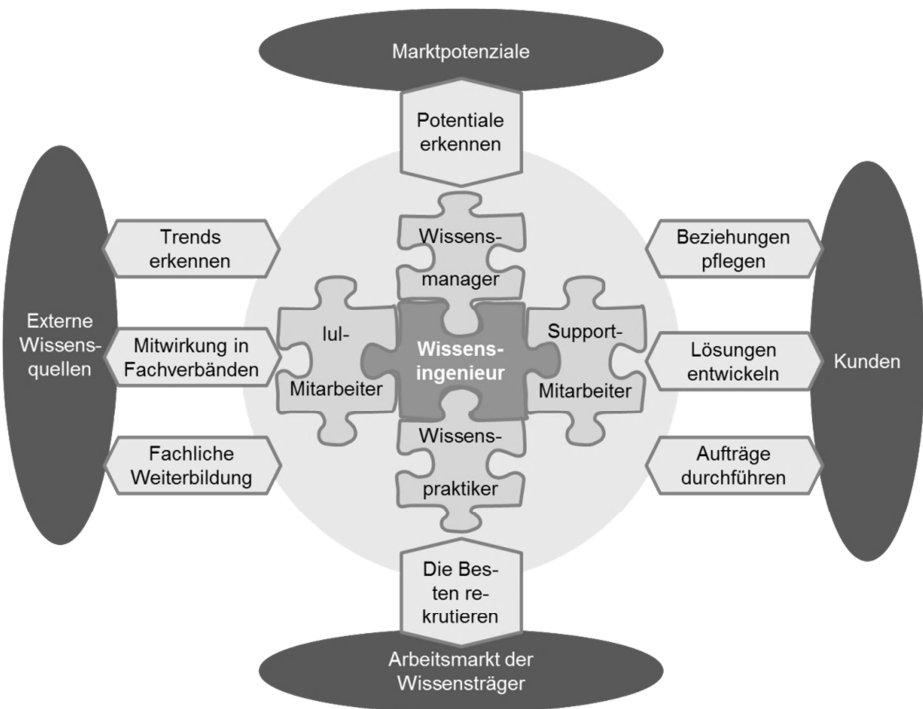


Bild 2: Die Rolle des Wissensingenieurs aus bibliographischer Sicht [10]

Wie aus dem Schaubild ersichtlich, ist die zentrale Rolle die des Wissensingenieurs. Dieser kann – je nach Größe und Rollenverständnis des Unternehmens – die anderen skizzierten Rollen (z. B. Wissenspraktiker) integrieren bzw. implizieren. Die Rolle des Wissensingenieurs mit den vier „Unterrollen“ hat neben zahlreichen Aufgaben auch viele Beziehungen unter anderem mit externen Wissensquellen und Kunden (vgl. Bild 3).

4.2 Der Wissensingenieur aus empirischer Sicht

Neben der vorangegangenen Beschreibung der Rolle des Wissensingenieurs aus Sicht der Literatur wird in diesem Kapitel die Sicht der Unternehmen beleuchtet. Dafür wurden insgesamt zehn semi-strukturierte Interviews mit verschiedenen Unternehmensvertretern (sechs angestellte Mitarbeiter, drei leitende Mitarbeiter und einem Geschäftsführer) durchgeführt, die im Bereich Wissensmanagement tätig sind. Aus dem Maschinen- und Anlagenbau wurden zwei, aus der Elektronik, Elektro-/Energietechnik drei, aus der Automobile- und aus der Ingenieursdienstleisterbranche jeweils zwei Vertreter befragt. Die Auswertung dieser Umfrage dient der Bestimmung der Rolle des Wissensingenieurs. Diejenigen Unternehmen, welche eine Wissensmanagementabteilung haben, ordnen diese entweder dem F&E-Bereich zu (bei drei Unternehmen) oder haben eine eigene Stabstelle Wissensmanagement aufgebaut (bei drei Unternehmen). Bei 70 Prozent der befragten Unternehmen werden Wissensmanagementaktivitäten in den Prozessbeschreibungen der Produktentwicklung integriert, z. B. in Form von (verpflichtenden) Lessons Learned, Best Practices und Feedbackreporte. Dagegen geben nur 30 Prozent der Interviewpartner an, dass in ihrem Unternehmen Tools für das wissensbasierte Konstruieren (KBE) verwendet wird.

Eine Rolle, die Wissensmanagementaufgaben wahrnimmt, gibt es nur in der Hälfte der befragten Unternehmen. Die konkrete Rolle bzw. Bezeichnung Wissensingenieur – wie sie in der Literatur beschrieben wird (vgl. Kapitel 4.1) – ist in keinem der befragten Unternehmen genau so vorhanden. Allerdings gibt es ähnliche Rollen (z. B. Technologie-Scout, Spezialist wissensbasierte Konstruktion, Chief Modul Owner). Zu den Hauptaufgabenfeldern eines Wissensingenieurs gehört nach Meinung aller befragten Interviewpartner die Motivation der Wissensträger. Für 70 Prozent der Befragten sind zudem der Wissensaustausch (Erhebung, Interpretation und Bereitstellung von Wissen), die Wissenssicherung sowie die Motivation der Mitarbeiter zur Wissensnutzung wichtige Aufgabenfelder. Dagegen ist die Wissensentwicklung oft Aufgabe der (Fach-)Experten. Die Verantwortung für das gesamte Wissensmanagementsystem wurde kaum genannt, da dies nach Meinung der Interviewpartner die Aufgabe von Vorgesetzten ist.

Als konkrete Aufgabe von Wissensingenieuren sehen 70 Prozent der Befragten die Bereitstellung von Wissen sowie dessen Strukturierung. Die Erstellung eines rechnerunterstützten Wissensmanagementsystems sowie die Planung eines unternehmensweiten Wissensmanagementsystems sind für fünf bzw. drei Interviewpartner weitere Aufgaben eines Wissensingenieurs.

Für die Durchführung von Wissenserhebungen, eine der wichtigsten Aufgaben des Wissensingenieurs, werden in neun Unternehmen Experteninterviews und in sieben moderierte Workshops eingesetzt. Die Dokumentenanalyse und die Beobachtung von Experten werden von fünf bzw. von vier Unternehmen durchgeführt. Ergänzend wird Expert Debriefing und Data Mining von je einem Interviewpartner vorgeschlagen. Für die Strukturierung von Wissen verwenden alle Unternehmen verschiedene Dokumente (z. B. Protokolle, Berichte). Rechnerunterstützte Eingabemasken in Wissensmanagementsystemen und detaillierte Verfahrensweweisungen sind nur in fünf bzw. vier der größeren Unternehmen verfügbar. Die wichtigsten fachlichen, methodischen, sozialen und personalen Anforderungen an die Rolle des Wissensingenieurs aus Sicht der befragten Unternehmen sind der folgenden Abbildung zu entnehmen (Bild 3).

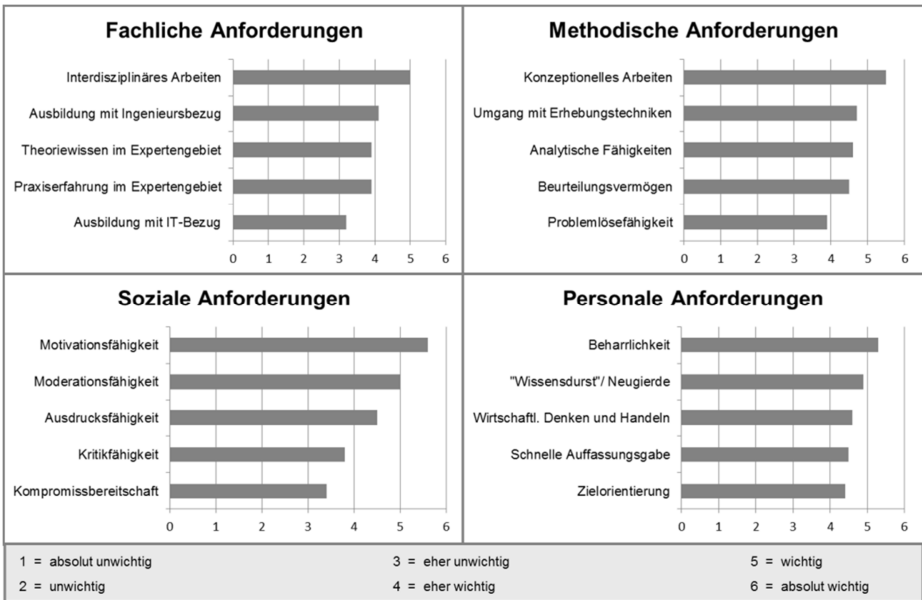


Bild 3: Anforderungen an die Rolle des Wissensingenieurs

Die wesentlichste fachliche Anforderung ist die Fähigkeit interdisziplinär arbeiten zu können. Hinsichtlich der weiteren vier wichtigen fachlichen Kriterien „Theoriewissen im Expertengebiet“, „Praxiserfahrung im Expertengebiet“, „Ausbildung mit Ingenieursbezug“, „Ausbildung mit IT-Bezug“ lassen sich zwei Meinungsrichtungen erkennen. Einige Interviewpartner sind der Auffassung, dass Fachwissen des Wissensingenieurs nicht nur unnötig sondern sogar von Nachteil ist, da ein Laie Sachverhalte klarer und verständlicher darstellen und formalisieren kann. Dagegen ist die fachliche Kompetenz des Wissensingenieurs auf dem Gebiet des Wissensmanagements viel bedeutender. Im Gegensatz dazu vertreten andere Interviewpartner die Meinung, dass ein natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Hintergrund des Wissensingenieurs von Vorteil oder zwingend erforderlich ist, um die oft sehr spezifischen und komplexen Sachverhalte und Zusammenhänge überhaupt verstehen zu können.

Hinsichtlich der methodischen Anforderungen ist eine große Übereinstimmung bei der Fähigkeit des „konzeptionellen Arbeitens“, das die strukturierte Arbeitsweise impliziert, festzustellen. Demzufolge wird von einem Wissensingenieur erwartet, Wissen und Informationen systematisch und methodisch erheben, strukturieren und in einen Wissensmanagementsystem implementieren zu können. Der Umgang mit den bereits genannten Erhebungstechniken sowie analytische Fähigkeiten und einem guten Beurteilungsvermögen sind weitere wesentliche methodische Anforderungen an den Wissensingenieur.

Ausnahmslos von allen wird eine überdurchschnittlich hohe soziale Kompetenz vorausgesetzt, die sich vor allem durch ein offenes, kontaktfreudiges und freundliches Auftreten kennzeichnet. Die wichtigste soziale Anforderung ist die „Motivationsfähigkeit“ des Wissensingenieurs. Alle befragten Interviewpartner bewerten diese Anforderung als „wichtig“ bzw. „absolut wichtig“. Der Wissensingenieur muss somit die Mitarbeiter ständig dazu motivieren, ihr Wissen zu teilen. Die zweite und dritte wichtige Anforderung sind die Moderationsfähigkeit und die Ausdrucksfähigkeit des Wissensingenieurs. Ein Wissensingenieur sollte zudem ein guter Netzwerker sowie Kommunikator sein, der Vertrauen bei den Experten genießt.

Für sieben der neun befragten Interviewpartner ist die Beharrlichkeit bzw. Hartnäckigkeit eine wichtige bzw. absolut wichtige Charaktereigenschaft eines guten Wissensingenieurs. Ferner ist es auch für fast alle Befragten wichtig, dass ein Wissensingenieur neugierig und wissensdurstig ist. Weitere wesentliche Fähigkeiten sind die schnelle Auffassungsgabe sowie das wirtschaftliche Denken und Handeln eines Wissensingenieurs.

Die größten Herausforderungen für einen Wissensingenieur sind nach Meinung der Interviewpartner die Vorbehalte der Fachexperten, ihr Wissen preiszugeben sowie die steigende Komplexität des Wissens und der Wissensmanagementsysteme. Eher unkritisch sind nach Aussagen der Unternehmensvertreter der Mangel an effektiven IT-Tools zum Wissensaustausch und eine nicht einheitliche Formalisierung von Wissen. Die folgende Darstellung gibt einen Überblick zu unterschiedlich kritischen Herausforderungen (Bild 4).

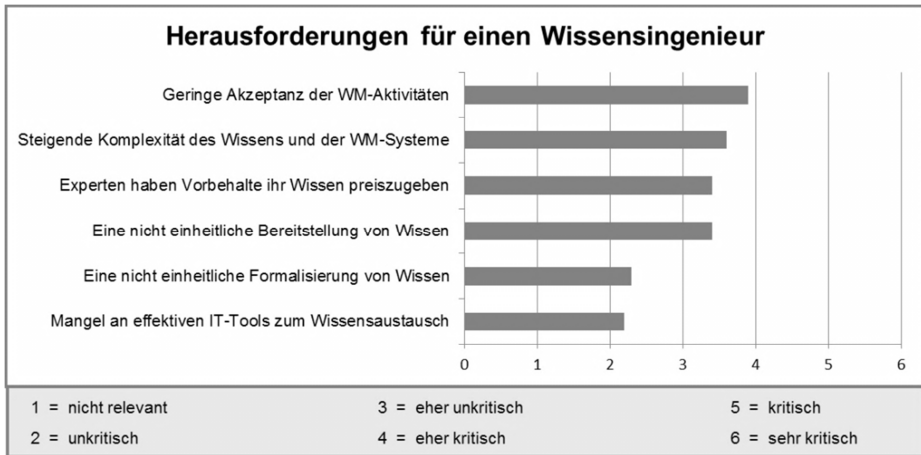


Bild 4: Herausforderungen für einen Wissensingenieur

5 Schlussfolgerungen

Durch eine bibliographische und eine empirische Studie wurde das Verständnis zur Rolle des Wissensingenieurs, mit seinen Aufgaben und Anforderungen, erweitert. Abschließend kann festgestellt werden, dass sowohl aus Sicht der Wissenschaft als auch aus unternehmerischer Sicht eine einheitliche Rollenbeschreibung für Wissensingenieure nur bedingt möglich ist. Dies bedeutet, dass die wesentlichen fachlichen, methodischen, sozialen und personalen Anforderungen an die Rolle des Wissensingenieurs, wie sie im Abschnitt 4.2 beschrieben sind, in die VDI-Richtlinie „Wissensbasiertes Konstruieren“ übernommen werden. Die Aufgabe des Anwender der Richtlinie besteht dann darin, geeignete Mitarbeiterinnen oder Mitarbeiter für die Besetzung dieser Rolle zur Durchführung des KBE-Projekts auszuwählen.

Literatur

- [1] Bimazubute, R.: Die Nachbereitung von Experteninterviews im expertenzentrierten Wissensmanagement. FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl Informatik 8 (Künstliche Intelligenz), Dissertation, 2005.
- [2] Breilmann, M.: Enterprise 2.0 mit SharePoint: Wissen, Austausch & Vernetzung. Wissensmanagement. O. Bd. (2011) Nr. 8, S. 16/17.
- [3] Broßmann, M.; Mödinger, W.: Praxisguide Wissensmanagement. Qualifizieren in Gegenwart und Zukunft. Planung, Umsetzung und Controlling in Unternehmen. Berlin: Springer Verlag 2011.
- [4] Gloystein, H.: Wettbewerb für Information Manager. FH Darmstadt, Projektbericht, 2005.
- [5] Karbach, W.; Linster, M.: Wissensakquisition für Expertensysteme. Techniken, Modelle und Softwarewerkzeuge. München: Carl Hanser Verlag, 1990.
- [6] Kranz, O.; Kokorniak, M.: Einfache Neuformulierung von Entwurfszielen. In: Digital Engineering Magazin (2005), Nr. 4, pp. 29.
- [7] Lehner, F.; Scholz, M.; Wildner, S.: Wissensmanagement. Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag 2009.
- [8] Luft, T.; Wartzack, S.: Requirement analysis for contextual management and supply of process- and design knowledge – a case study. Proceedings of the 12th International Design Conference 2012, Dubrovnik, 2012, pp. 1515/1524.
- [9] Nonaka, I.; Takeuchi, H.: The Knowledge-Creating Company. How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. New York: Oxford University Press, Inc. 1995.
- [10] North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag 2011.

-
- [11] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler-Verlag 2010.
- [12] Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren. Aachen: Shaker, 1998.
- [13] Schott, H.: Informationsressourcen und Informationsmanagement für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Düsseldorf: VDI Verlag, 1998.
- [14] Schuh, G.: Effizient, schnell und erfolgreich – Strategien im Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., 2007.
- [15] Schwarz, S.: Wissens- und Informationsmanagement – Change-Management-Perspektiven. In: Keuper, F.; Neumann, F.: Wissens- und Informationsmanagement: Strategien, Organisation und Prozesse. Wiesbaden: Gabler, GWV Fachverlage GmbH 2009, S. 119 / 145.
- [16] VDI 1000: VDI-Richtlinienarbeit - Grundsätze und Anleitungen. Berlin: Beuth, 2010.
- [17] VDI 5610: Wissensmanagement im Ingenieurwesen. Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Berlin: Beuth, 2009.
- [18] Von der Oelsnitz, D.; Hahmann, M.: Wissensmanagement. Strategie und Lernen in wissensbasierten Unternehmen. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH 2003.

Reverse Engineering als Grundlage wissensbasierter Konstruktionen

Dipl.-Ing. Dirk Hofmann, Dr.-Ing. habil. Christine Schöne,
Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer
*Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion;
Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
Technische Universität Dresden*

The article describes a survey and application method to be used within the field of knowledge management in manufacturing enterprises. In particular, the focus is put on the reverse engineering method, which is underlined using an example from the industry.

1 Ausgangssituation

Gepägt durch natürliche Fluktuation, den demographischen Wandel und das daraus folgende Ausbleiben von geeigneten Fachkräften wird es immer schwerer für die Industrie und speziell für traditionelle Branchen dauerhaft ihren Fortbestand mit spezifischen Fachwissen zu sichern [1]. Bekannte Vertreter dieser Branchen sind die Hersteller hochwertiger Holzkunst, Schmuck, Uhrmacher oder der Musikinstrumentenbau. Aber auch industriell verbreitete Bereiche wie der Werkzeug- und Prototypenbau sind davon betroffen. Zum einen nehmen aufgrund fehlenden Nachwuchses, die langjährigen Mitarbeiter ihr Wissen über die Herstellung und Qualität des Produktes mit in den Ruhestand oder zu einem anderen Unternehmen. Zum anderen wird die Attraktivität und Ausnahmestellung solcher Berufe und Branchen meist nicht erkannt. Hinzu kommt, dass die Unternehmen vielfach durch veraltete, größtenteils manuelle Herstellungsmethoden und dadurch hohe Fertigungskosten oftmals unrentabel sind.

Eine Möglichkeit dieses Wissen und die Qualität der Herstellung zu erfassen und auf aktuelle Fertigungsmittel und -techniken anzupassen bzw. als Grundlage für zukünftige Entwicklungen zu verwenden, bietet die Anwendung des Wissensmanagements. Dieses wird u. a. definiert als eine Vorgehensweise zur bewussten und systematischen Identifikation, Sammlung, Bewahrung, Aktualisierung und Schaffung des Wissens in einer Organisation. Dafür gibt es bereits verschiedene Ansätze, die sich dahingehend unterscheiden, wie die genannten Funktionen erfüllt werden (Tabelle 1) [2].

Tabelle 1: Ansätze und Eigenschaften des Wissensmanagement [2]

Ansätze	Eigenschaften und Ziele
Technologieorientierte	Entwicklung von Konzepten wie das Wissen einer IT-gestützten Organisation erfasst, erweitert, genutzt, gespeichert und verteilt werden kann. Wissen wird oft nur in Form von Daten gespeichert, so dass meist der Bezug und die Verbindung zum Wissensträger fehlen.
Humanorientierte	Im Mittelpunkt stehen das Individuum und dessen Fähigkeiten als zentraler Wissensträger. Das Ziel ist es, die verhaltenssteuernden Fähigkeiten des Einzelnen zu unterstützen und damit dessen Potenziale voll auszuschöpfen.
Integrative	Bei diesen Ansätzen wird versucht eine Verbindung zwischen technologieorientierten und humanorientierten Ansatz zu schaffen. Das Ziel ist die Fähigkeit des Einzelnen beim Umgang mit Wissen unter Nutzung der bestehenden informationstechnischen Möglichkeiten auszunutzen.

Um die Anforderungen an die Ausgangssituation ganzheitlich zu erfassen kann basierend auf einem integrativen Ansatz, Wissensmanagement resultierend als Ansatz verstanden werden bei dem sowohl das in den Köpfen der Mitarbeiter vorhandene als auch das in den Daten transferierte und personenunabhängig gespeicherte Wissen berücksichtigt wird. Ein Hilfsmittel bzw. eine Methode zur Generierung dieses Wissens bei teilweise sehr unscharfen Informationen bzw. Voraussetzungen bietet dabei das Reverse Engineering (RE).



2 Prozesskette Reverse Engineering

RE beschreibt den Prozess der 3D-Erfassung eines Objektes, die Aufbereitung der Digitalisierungsdaten zu CAD-Modellen und die Nutzung dieser Daten in der weiteren Prozesskette von der Fertigungsplanung und Herstellung bis hin zur Qualitätskontrolle von Produkten. Durch die anpassbare Prozesskette können dabei aber traditionelle Muster bzw. firmenspezifische und fachbezogene Informationen beibehalten und schnell mit in die Umsetzung neuer Produkte gebracht werden.

Zur Realisierung verschiedener Anforderungen wird die Prozesskette des RE in zwei Schritte unterschieden, einen engeren und einen erweiterten Sinn. Im engeren Sinn bedeuten dabei, die Erfassung der Geometrie eines Physischen Objektes und die Aufbereitung der 3D-Punkteinformationen zu 3D-CAD-Modellen. RE im erweiterten Sinn beschreibt die Nutzung der 3D-CAD-Modelle zum Planungs- und Fertigungsprozess. Dieser beginnt mit der Fertigungsplanung sowie einer Analyse, meist zwischen Werkzeug und Werkstück, über Berechnungen bis hin zur Qualitätskontrolle des gefertigten Bauteils. Dies mündet in einem Flächenvergleich des neuen Werkstücks mit dem ursprünglich gescannten Objekt. Ein wichtiges Merkmal dieser Prozesskette sind die Rücksprünge zu nahezu jedem Element. Diese verdeutlichen die aktive Einarbeitung von Erkenntnissen aus nachfolgenden Schritten und damit einen schnellen und direkten Einfluss auf die Gestaltung und die Eigenschaften des zukünftigen Produktes (vgl. Bild 1) [3].

Unter dem Betrachtungspunkt der Wahrung traditioneller Fertigungsmethoden findet dabei eine humanorientierte Erweiterung statt. Merkmale, wie bspw. ästhetische (historisch bedingt) und qualitätsbestimmende Eigenschaften sowie die Rolle und das Wissen des Mitarbeiters fließen ebenfalls bei der Neugestaltung und -konstruktion der Produkte mit ein.

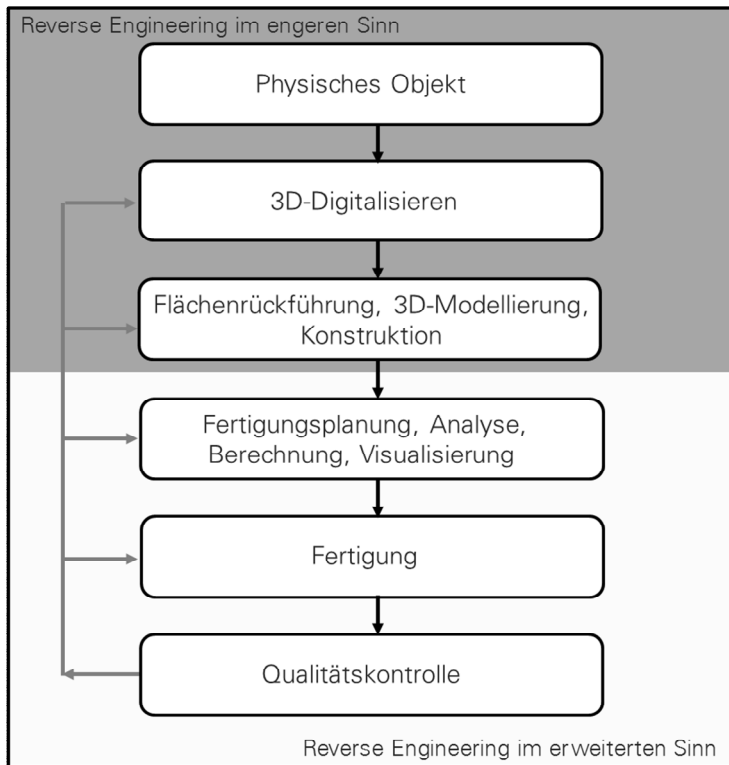


Bild 1: Zweistufige Prozesskette des Reverse Engineering [3]

3 Entwicklung und Konstruktion eines Verdeckes im traditionellen Handzuginstrumentenbau

3.1 Beschreibung der Problemstellung

Im Folgenden soll in Anlehnung an die Prozesskette des Reverse Engineering und unter Absicherung historisch bedingter Kriterien ein Beispiel vorgestellt werden, wie eine Neukonstruktion wissensbasiert erstellt werden kann.

Die Firma Harmona Akkordeon GmbH zählt weltweit zu den ältesten Herstellern von Akkordeons verschiedenster Varianten und Größen. Durch die historisch bedingte Fertigungstradition werden die Akkordeons sowie ihre Bestandteile größtenteils in Handarbeit gefertigt. Jedes Instrument besteht aus ca. 2500 Einzelteilen, welches in rund 5000 Arbeitsgängen hergestellt wird [4].

Durch die Exklusivität des Produktes und somit auch kundenabhängiger Herstellung besteht eine schwankende Nachfrage der Instrumente. Aufgrund des hohen Anteils manueller Fertigung und der daraus folgend geringen Rentabilität sowie den konjunkturbedingt strukturellen Umbrüchen der Firma in den letzten 20 Jahren konnten notwendige Investitionen in die Verbesserung der Fertigungsbedingungen bisher nur sporadisch erfolgen. Die Einzelteile des Akkordeon werden teilweise mit Maschinen und Werkzeugen gefertigt, die über 50 Jahre alt und verschlissen sind. Hinzu kommt, dass Zeichnungen, CAD-Modelle und technologische Unterlagen für den Ersatz oder die Reparatur der Werkzeuge unvollständig sind oder teilweise ganz fehlen. Dieser Umstand hat Auswirkung auf die Qualität und Herstellung der Produkte. Der Arbeiter muss, um die Ansprüche an das Produkt zu erfüllen, noch mehr mit seiner Erfahrung und seinem Wissen ausgleichen. Das bedeutet oft zusätzlich manuelles Nacharbeiten. Um die Herstellungsbedingungen auf aktuelle, wirtschaftlich rentablere Technologien anzupassen, bedarf es nicht nur den Austausch von Maschinen und Werkzeugen. Vielmehr muss dabei die gesamte Prozesskette einschließlich der Denk- und Arbeitsrhythmik des Werkers schrittweise analysiert und schließlich optimiert werden [5].

3.2 Ermittlung konstruktionsrelevanter Parameter

Ein Beispiel ist die Herstellung der Akkordeonverdecke. Diese werden aus ebenen Aluminiumplatinen in einem mehrstufigen Fertigungsablauf durch Tiefziehen hergestellt und anschließend variantenspezifisch beschnitten. Weil dieses Produkt nach einer langen Tradition gefertigt wird und auch in einem zum großen Teil manuell ausgeführten Prozess hergestellt wird, existieren weder 3D-Daten noch maßbestimmende Zeichnungsvorlagen. Deshalb wurden zur vollständigen Erfassung aller technisch relevanten Maße und Merkmale der Verdecke folgende Untersuchungen durchgeführt [6].

1. 3D-Scannen der Verdecke und deren Werkzeuge verschiedener Größen aus dem Sortiment (kleinstes, mittleres und größtes) (vgl. Bild 2)
2. Rückführung der Daten zu CAD-Modellen: Diese Handlung dient dem genauen maßlichen Erfassen der einzelnen Bauteile.

Die beiden Schritte eins und zwei bilden den Prozess des RE im engeren Sinn ab (vgl. Bild 1). Die Qualität der Scandaten ist dabei besonders entscheidend. Auf deren Basis wird der Master eines parametrischen Modells erstellt, mit dem anschließend die einfache Ableitung der Varianten möglich sein soll. Außerdem dienen die Daten als Grundlage für die erweiterte Betrachtung.



Bild 2: Scanprozess einer tiefgezogenen Doppelwanne

Zu diesen erweiterten Untersuchungen zählen:

3. 2D-/3D-Analyse des Systems Werkzeug/Werkstück sowie Werkstück/Werkstück, innerhalb einer Fertigungsreihe sowie bei der Betrachtung von verschiedenen Varianten.

Das Ergebnis dieses Schrittes kennzeichnet technologisch das Zusammenspiel zwischen Stempel und Matrize. Für einen tadellos funktionierenden Prozess sind dabei die Form und Größe des Tiefziehspaltes ausschlaggebend, welcher letztendlich für die Radienbildung und die Übergänge am Verdeck maßgeblich sind.

4. Tiefzieh- /Fließsimulation

Bei diesem Punkt werden das Verhalten und die Eigenschaften des Werkstoffes betrachtet. Besonders der Zuschnitt bzw. das Fließverhalten während des Fertigungsprozesses werden dabei untersucht. Außerdem werden Versuche mit anderen, alternativen Werkstoffen durchgeführt.

5. Untersuchung zur Gestaltung des Werkstückes

Dabei werden die generelle Gestalt des Verdeckes sowie deren fertigungstechnischer Herstellungsprozess untersucht. Ferner werden die für den Fertigungsprozess entscheidenden Flächen speziell an den Radienübergängen des Bauteils betrachtet.

Bei jedem der Schritte drei bis fünf werden neben den technologieorientierten Einflüssen auf den Fertigungsprozess humanorientierte Bestandteile wie die Rolle des Mitarbeiters und seine Erfahrung mit analysiert. Eine Auflistung der bekannten (technisch erfassbaren) und der unbekanntenen Größen ist auszugsweise in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Bekanntes und Unscharfes Wissen beim Fertigungsprozess

Bestandteile des Prozesses	Bekanntes Wissen	Unscharfes Wissen
Rohteil	Zuschnitt; Material; Blechdicke	Fließ-/ Verformungseigenschaften
Werkstück (Doppelhaube, Verdeck)	Geometrie (Verdeck)	Abmaße (während der einzelnen Fertigungsphasen); Radiengestaltung/ -übergänge
Werkzeug	Umformkraft, Gestalt	Abmaße; Rüstvorgang Stempel/Matrize (Ziehspalt - Form, Größe)
Prozess	Anzahl der Fertigungsstufen	Art und Intensität der zusätzlichen manuellen Bearbeitung; Zusammenspiel Stempel/Matrize

Soweit dies möglich ist, fließen die unscharfen Informationen in Form von abgeleiteten Parametern, Handlungsanweisungen für Qualitätsprüfungen o. ä. mit in den zukünftigen Prozess ein. Mithilfe dieser Resultate erfolgt die ge-

naue Definition der Anforderungen an die Neukonstruktion des Verdeckes sowie dessen Varianten. Insbesondere sind das Anforderungen an die Gestalt.

Das Ziel ist der Aufbau (gestalterisch) und die Konstruktion eines Verdeckes, welches dem bisherigen Bauteil optisch und funktionell adäquat ist, aber unter Beachtung aktueller Fertigungsmittel und -methoden. Durch den konstruktiven Aufbau eines parametrischen Modells soll es ebenfalls möglich sein verschiedene Varianten einfach ableiten zu können (Tabelle 3). Außerdem soll dieses Modell als Wissens- und Datenbasis für die Fertigungsplanung sowie zur Qualitätskontrolle dienen. Damit können die Erfahrungen über die Herstellung und Fertigung der Werkstücke in einer einheitlichen Form IT-gestützt bereitgestellt, genutzt sowie entsprechend flexibel angepasst und erweitert werden [7].

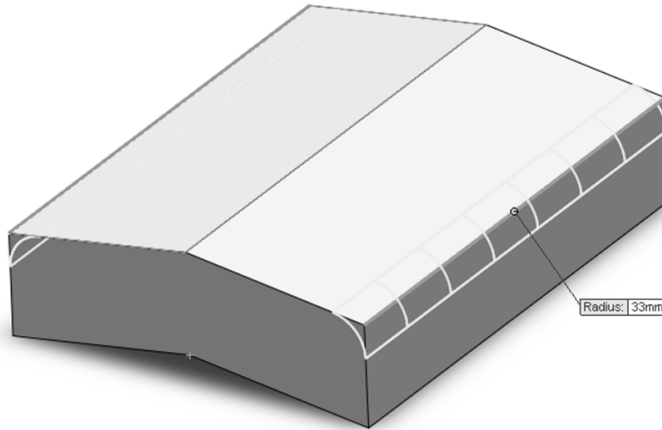
Tabelle 3: Parameterdefinition am Beispiel der Radien

Parameter	Bezeichnung	Abbildung
Feste Verrundungen	Radius 1	
	Radius 2	
	Radius 3	
	Radius 4	
Variable Verrundungen	Radius 5	
	Radius 6	
	Radius 7	
	Radius 8	
	Radius 9	

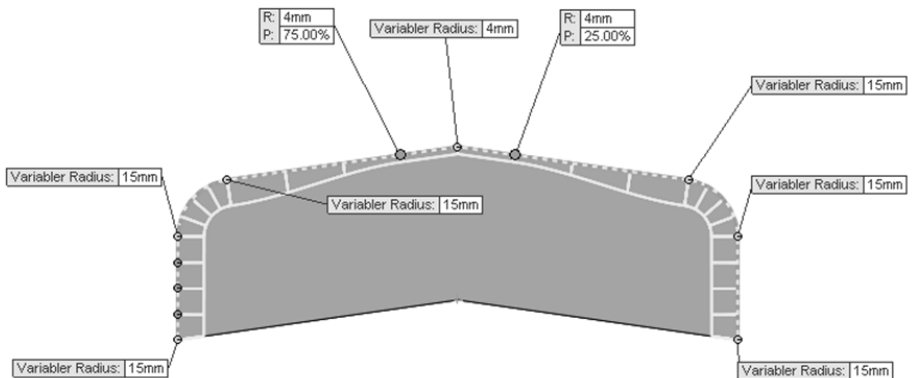
Die Umsetzung der Parameterdefinition sind im Folgenden anhand der Neukonstruktion des Verdeckes auszugsweise, sehr vereinfacht dargestellt.



1. Das Modell beginnt mit einer Skizze. Nach dem Austragen der Skizze zu einem 3D-Modell erfolgt die Abrundung der Längsseiten.



2. An den Seitenflächen kommt ein variabler Radienübergang. Der mittlere Bereich ist mit 4 mm konstruktionsbedingt verlängert, um eine flexible Variantenableitung gewährleisten zu können.



Abschließend wird die Innenkontur gestaltet und die Wandstärke auf 1 mm festgelegt.

4 Zusammenfassung

Der Artikel charakterisiert die Erhebung und Nutzung von Wissen auf Basis unscharfer Informationen in Verbindung mit genauen numerischen Informationen und damit die Anwendung des Wissensmanagements. Dabei wurde zur Erfassung von Daten und Informationen mit der Methode des Reverse Engineering auf einen integrativen Ansatz orientiert. Unterlegt wurde diese Methode mit einem Beispiel aus dem Handzuginstrumentenbau. Ferner wurde die Vorgehensweise beschrieben wie Wissen (technologisch, humanorientiert) zur Herstellung des Verdeckes eines Akkordeons generiert und als Basis für eine Neukonstruktion dienen kann.

Literatur

- [1] Beck, U.; Sommer, W. (2007): "Wissensmanagement unter demografischem Druck". In: wissensmanagement, Heft 1/2007, S. 26-28. Online verfügbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=WIM200701007&DOKV_HS=0&PP=1; 29.05.2012, 13.26 Uhr.
- [2] Köhler, S.: "Kostenorientiertes Wissensmanagement in den Konstruktionsprozessen des Maschinenbaus", Dissertation, Verlag der Gesellschaft für Unternehmensrechnung und Controlling m.b.H., Löbnitz, 2011.
- [3] Schöne, C.: "Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik", Habilitation, Verlag Dr. Hut, München, 2009.
- [4] Harmona Akkordeon GmbH: <http://www.akkordeon-klingenthal.de/>; 24.07.2012; 09.29Uhr.
- [5] Steinmüller, W.: "Informationstechnologie und Gesellschaft: Einführung in die Angewandte Informatik", Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993.
- [6] Schöne, C.; Stelzer, R.: "Reverse Engineering in der Produktentwicklung – Aktuelle Herausforderungen", 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Dresden, 2012, S. 351-364.
- [7] Eigner, M.; Stelzer, R.: "Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für das Product Development und Life Cycle Management", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.

Konzept zur Wissensrepräsentation von Produktstrukturen mit Hilfe von Ontologien

Touba Rahmani, Detlef Gerhard
*Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik;
Technische Universität Wien*

Abstract:

In the development of complex products the integrated information in the different phases of the product development process is a challenge. Depending on the area of development, different information and different views concerning product structure facilitates the work of each. Yet, the lack of contextual relationships within the structures avoids linking the correct data between them. Therefore, similar information must often be entered multiple times and a cross comparison between those information from other domains or an automated comparison of the various activities in concurrent engineering processes become virtually impossible. This paper describes a research approach that ensures networking between different product structures and views that provides a contextual sight. With the use of semantic technologies and ontologies [1] the continuity of information can be achieved through a coherent semantic structure associated with view on different areas of the development process. The ontology serves as a neutral intermediate layer in which semantic web technologies can be used to build queries or filters that provide specific data of heterogeneous sources. They provide data from heterogeneous sources as a result.

Keywords: product development process, product structure, semantic web technologies, ontology

1 Herausforderung / Motivation

Bedingt durch den hohen Komplexitätsgrad innovativer Produkte und das erforderliche Zusammenspiel verschiedener Disziplinen (z.B. Mechanik-Entwicklung, ET/IT-Entwicklung, Berechnung, Simulation) sind Datenmanagement und Kommunikation in den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus' heutzutage zentrale Herausforderungen im Produktentstehungsprozess (PEP). Die verschiedenen am PEP beteiligten Mitarbeiter haben jeweils unterschiedliche Schwerpunkte, Kompetenzen und Informationsbedürfnisse. Spezifische Informationen zu finden wird für den Entwickler - je nach Entwicklungsbereich - häufig dadurch erschwert, dass zwar ein Teil der Datenmenge strukturiert ist, jedoch der größte Teil noch unstrukturiert vorliegt. Strukturierte Sichten auf Produktdaten spielen im Produktentstehungsprozess eine zentrale Rolle. Das erforderliche Zusammenspiel verschiedener oben genannter Disziplinen mit ihren jeweiligen Sichten (z.B. Funktionsstruktur, Bauteilstruktur, Berechnungsstruktur, Organisationsstruktur) ist eine wesentliche Herausforderung. Diese führen zusammen mit einer häufig nur geringen datentechnischen Integration zu einem hohen manuellen Administrations- und Organisationsaufwand.

CAD/CAE umfasst neben der rechnergestützten Konstruktion auch den Einsatz von Berechnungsmethoden und Simulationen. Der Kommunikationsfluss zwischen Berechnung und Konstruktion ist zwar vorhanden, aber beide Bereiche stehen oft selbständig nebeneinander. Bei immer kürzeren Produktlebenszyklen und gleichzeitig höherer Variantenvielfalt sowie wachsenden Qualitätsansprüchen steigen die Anforderungen an den Informationsfluss. CAE-Systeme, mit denen Berechnungen erstellt werden, und konstruktionsbegleitende Berechnungstools in CAD-Systemen sind geeignet, die Integration neuer Ideen in kurzer Zeit in den PEP zu gewährleisten. Die Leistungsfähigkeit dieser Technologien bzw. der Prozess insgesamt wird jedoch durch die überwiegend isolierte Anwendung einzelner Werkzeuge insofern nivelliert, als dass die Informationen meist manuell zwischen den Bereichen ausgetauscht werden. Der Informationsfluss vom geometrischen Modell zum Berechnungsmodell und Funktionsmodell ist aufgrund der beschränkten Kompatibilität von CAD und CAE Systemen nur ungenügend erschlossen. Die Datenverschachtelungen für Produktstrukturen und Komponentenaufbau werden zudem immer komplexer. Modulare Aufbauten, viele Kombinationsmöglichkeiten von Komponenten führen zu einer beachtlichen Variationsvielfalt. Das Datenmanagement stellt dabei eine Herausforderung dar, da nicht abgestimmte Versionsstände bzw. unterschiedliche Datenstände in Konstruktion und Berechnung zu fehlerträchtigen, redundanten Darstellungen oder einer mangelhaften Übernahme von Berechnungsergebnissen führen können.

2 Lösungsansatz

Im Folgenden wird ein Lösungsansatz auf Basis von Semantic Web Technologien bzw. Ontologien zur Beherrschung von Strukturierungsproblemen in der Produktentwicklung vorgestellt. Dabei geht es darum, den verschiedenen Entwicklungsdisziplinen entsprechend ihren Anforderungen optimierte Strukturen zur Verfügung zu stellen bzw. die unterschiedlichen strukturellen Sichten auf die Daten durch eine Ontologie im Sinne eines semantischen Netzes zusammenzuführen. So kann die ständig wachsende Komplexität der unterschiedlichen Produktstrukturen auch mehreren, an der Entwicklung eines Produkts beteiligten Partnern zugänglich gemacht werden.

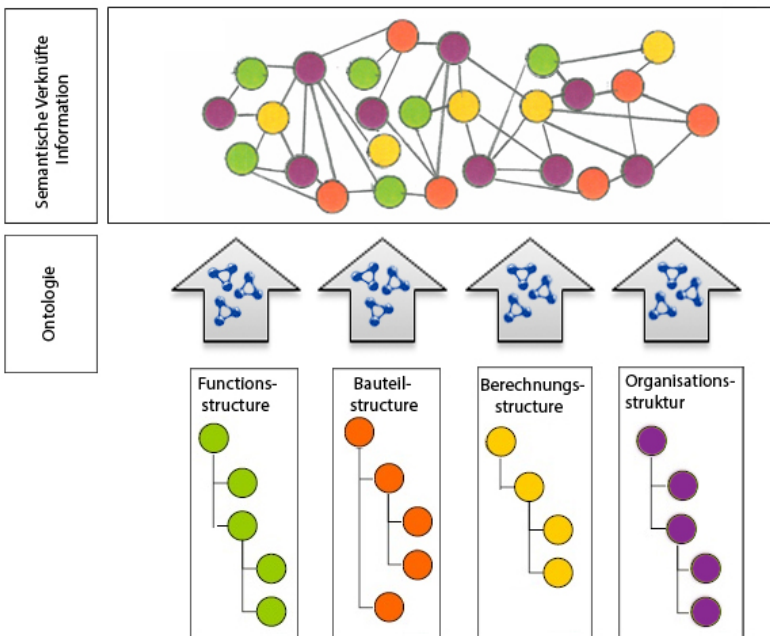


Abbildung 1: Semantische verknüpfte Informationen

Mit Hilfe des Einsatzes von Ontologien können Abfragen über Strukturen und deren Verknüpfungen erstellt werden, um für den Benutzer in den verschiedenen Phasen des PEP die Zusammenhänge von Daten transparent zu machen (siehe Abbildung 1). Darüber hinaus wird mit Hilfe des ontologischen Ansatzes die Analyse von unterschiedlichen Strukturen verbessert bzw. erleichtert. Ein weiterer Grund für die Verwendung von Ontologien im PEP kann

die Möglichkeit zur Erstellung eines generischen Modells der unterschiedlichen Informationsstrukturen als Wissensbasis sein. Damit kann das Wissen wiederverwendet werden.

Im Folgenden wird eine Use Case für den Austausch von Informationen zwischen Konstruktion und Berechnung beschrieben, um beispielhaft zu zeigen, wie der Informationsfluss verbessert werden kann. Die Aufgaben und Ziele einer Berechnungsaufgabe müssen mit denen der Konstruktion abgestimmt werden, um den Entwurfsprozess optimal zu unterstützen. Strukturen und relevante Objekte aus den Bereichen Konstruktion und dem Bereich Berechnung sollen unabhängig von Aufbau und Herkunft durch die Ontologie miteinander vernetzt bzw. verknüpft werden, um Sichten abbilden zu können und die semantischen Verknüpfungen für Recherchen nutzen zu können. Mit dem Use Case werden die Verknüpfung unterschiedlicher Strukturen bzw. Produktionsinformationen, z.B. das Strukturmapping im Bereich Konstruktion und Berechnung, untersucht. Die Erstellung verschiedener Sichten auf die Strukturen in den genannten Bereichen ist eine weitere wichtige Aufgabe dieses Use Case. Dabei sollen verschiedene Filtermöglichkeiten nach Objekten und Attributen untersucht werden, um Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Objekten der beiden Bereiche aufzuzeigen. Schließlich wird eine Vergleichsmöglichkeit der einzelnen Strukturen realisiert.

Die relevanten Informationen dafür aus dem Bereich Konstruktion sind unter anderem Bauteile bzw. die Baustuktur sowie Funktionsbausteine und daraus abgeleitet die Funktionsstruktur; aus dem Bereich Berechnung sind es insbesondere Berechnungsaufgaben bzw. Berechnungsarten. Die Organisationsinformationen wie z.B. Person, Rolle, Projekt oder Softwaregehören zu beiden genannten Bereichen und bilden eine weitere Struktursicht. Alle diese Informationen werden miteinander verknüpft und in Beziehung gesetzt. Werden Teile von der Bauteilstrukturen oder Funktionsstrukturen verändert, dann wird auf die verknüpfte Berechnungsaufgaben, Berechnungsarten und Organisationskategorie eingewirkt, weil die Berechnungen direkt mit weiteren Objekten verknüpft sind. Somit kennt der Kalkulator, die Änderungen die vom Konstrukteur kommen und umgekehrt. So kommunizieren die Bereiche Konstruktion und Berechnung. Dies bietet den Vorteil, bei Veränderungen in der Struktur, die Konstruktion bzw. Berechnung anzupassen, bzw. automatisiert nachzuziehen.

Für den Berechner bzw. Simulation Engineer kann z.B. gezielt eine Abfrage erstellt werden, die über die Auswahl einer Berechnungsart die verknüpften Funktionen aus der Funktionsstruktur und die den Berechnungsmodellen zugeordneten Bauteile aus Sicht der Konstruktion liefert. Grundsätzlich sind

diese Abfragen von den Bedürfnissen der jeweiligen User aus der Berechnung oder Konstruktion abgeleitet. Durch Änderungen an der ausgewählten Berechnungsart ergeben sich Einflüsse auf die dazugehörigen Bauteile aus dem Konstruktionsbereich. Daher wird in diesem Zusammenhang der Konstrukteur bei einer Änderung der Berechnungsart die Auswirkung auf den zugehörigen Bauteile und Funktionen, den Design Engineer informieren. So werden Design Engineer, Simulation Engineer immer auf dem aktuellen Stand gehalten. Die Software Versionen mit denen die Ingenieure arbeiten, haben eventuell ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse. Daher wird bei jeder Änderung der Software Version, mit der das geometrische Modell und das Berechnungsmodell bearbeitet wird, alle Beteiligten, Design Engineer und Simulation Engineer darüber informiert werden, damit ihre Modelle und Berechnungen auf dem neuesten Versionsstand gehalten werden können.

3 Ontologie

Die im folgenden beschriebene Ontologie dient als semantisches Netz, das eine Beschreibung der verwendeten Informationsobjekte für eine strukturierte und gezielte Bereitstellung der Daten darstellt (repräsentiert) und die dafür notwendigen Eigenschaften in den unterschiedlichen Datenquellen für die Objekte referenziert.

Die Schwierigkeit bei der Erstellung einer Ontologie besteht in der „richtigen“ Modellierung. Es existieren zahlreiche Methoden zur Erstellung von Ontologien. Jede Methode hat hierbei ihre Stärke und Schwächen. In diesem Forschungsansatz wurde eine Ontologie entsprechend der Methode von Noy und McGuinness [2] mit Hilfe des Open Source Ontologie-Editor Protégé [3], der die Modellierung in OWL (Web Ontology Language) [4] unterstützt, entwickelt. Die erstellte Ontologie umfasst exemplarisch einen Teil des PEP, nämlich Konstruktion und Berechnung.

Das Vorgehensmodell von Noy & McGuinness zur Erstellung der Ontologie wird in 7 Schritte unterteilt:

1. Festlegung des Umfangs und der Domäne (behandeltes Wissensgebiet) der Ontologie.
2. Die Wiederverwendung von bereits bestehenden Ontologien. Dies stellt eine große Arbeitserleichterung im Erstellungsprozess der Ontologie dar.
3. Spezifizieren der wichtigen Begriffe, über welche in der Ontologie Aussagen getroffen werden sollen, und diese auflisten. Ziel ist es,

eine umfassende Begriffsliste zu erstellen, ohne sich bezüglich Überlappung und Art der Begriffe Gedanken zu machen.

4. Definition bzw. Erstellung der Klassen und Klassenhierarchien.
5. Eigenschaften der Klassen bestimmen.
6. Die Regeln der Eigenschaften festlegen
7. Zu den entwickelten Ontologien konkrete Instanzen zugeordnet, die sie zu einem vollständigen Retrieval-Werkzeug machen.

Hier werden die wesentlichen Domänen, Begriffe, Klassen und Klassenhierarchien, Eigenschaften und Instanzen zu der erstellten Ontologie erläutert:

- Domäne: Konstruktion und Berechnung.
- Begriffe: Bauteile, Funktion, Bauteilstruktur, Berechnung und Konstruktionssoftware, Mitarbeiter, Gruppe, Rolle, Organisation.
- Klassen und Klassenhierarchien: Produkt, Parts und Funktion als wesentliche Klassen für Konstruktion. Berechnungsaufgaben und Berechnungsarten für die Berechnung und noch weitere Klassen wie Person, Rolle, Project und Software. Relationen: hasElement, hasRolle, hasTask, hasSubComponent, hasWorker, hasTask, hasProject, hasProduct usw.
- Eigenschaften der Klassen: Datentyp Eigenschaften für die Klassen Part: Pos. No. (nur innerhalb der Stückliste verwendet), Level (Kennzeichnung der Bauteilebene), PartNumber (Zusammengesetzt aus Zahl + Version + Part Type), Zahl (= eine achtstellige Zahl), PartName zur namentlichen Identifikation eines Bauteils. Weitere Datentyp Eigenschaften, für die Klasse Berechnungsaufgaben: Aufgabe Dauer, Aufgabe LifeCycleStatus (Released, In Work, Obsolete), Aufgabenbeginn Datum. Datentyp Eigenschaften der Berechnungsarten Klassen sind: Name, Type von Arten, ID und die Elemente.
- Instanzen: Berechnungsarten: "Conrod FEM analysis", "Crankshaft dynamics and strength simulation, Rolle: Design Project Leader, Simulation Project Leader, Design Engineer, Simulation Engineer usw.

Das Ergebnis ist eine Ontologie, die ausschnittsweise in Abbildung 2 dargestellt ist.

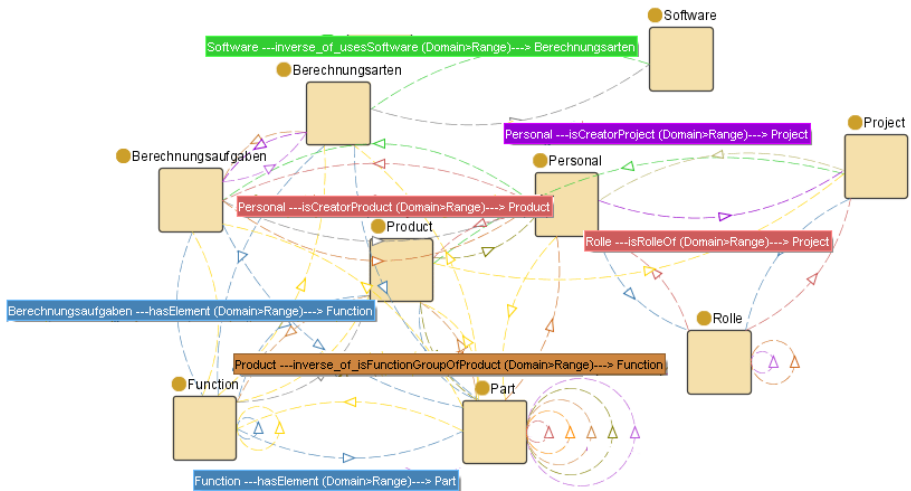


Abbildung 2: Visualisierung der Ontologie (Klassen und Beziehungen) mit Protégé Jambalaja Plugin [8]

Die erstellte Ontologie in RDF besteht aus einem Triple an Informationen: Resource, PropertyType und Literal (Subjekt, Prädikat, Objekt). Resource: Jede Entität in einem RDF-Modell ist eine Instanz dieser besonderen Klasse. Property: Die Basisklasse für Eigenschaften. Ist eine Unterklasse von Resource. Literal: Klasse für Literalwerte, also Zeichenketten etc. Hier wird zu der erstellten Ontologie für Resource, PropertyType und Literal ein Beispiel erwähnt. Das Bauteil (Part) mit Bezeichnung „UPID00001006ACFP388“ als Resource hat ein Prädikat wie „istElementOf“, und hat Objekte wie „Valve_Seats“ und „Ports_Combustion_Chamber“.

4 Verwendete Werkzeuge und Realisierung

Zur Umsetzung des dargestellten Konzepts werden verschiedene Software-Werkzeuge verwendet. Zuerst der Open Source Ontologie-Editor Protégé, der zum Aufbau und zur Beschreibung der Ontologie verwendet wird. Protégé unterstützt die Modellierung in OWL bzw. RDF. Web Ontology Language (OWL) ist eine etablierte Sprache mit großer Verbreitung, welche Teil des semantischen Web Protokollstack des W3C ist [4]. Zur Speicherung der Daten bzw. der erstellten Ontologie in OWL Form kommt die Datenbank MySQL zum Einsatz.

Um aus den entsprechend der Ontologie in der Datenbank gespeicherten Daten an die benötigte Information zu gelangen, werden spezielle Abfragesprachen verwendet, wie beispielweise SPARQL. (SPARQL Protocol And Query Language). Dies ist die wichtigste Abfragesprache für RDF-Daten [6] und dient dazu, sog. Triple-Daten (Triples beschreiben den semantischen Zusammenhang zwischen Subjekt, Prädikat und Objekt entsprechend RDF) aus RDF-Datenbanken abzufragen..

Die softwaretechnische Realisierung erfolgt auf Basis eines bestehenden Frameworks mit Jena – ein Framework zur Realisierung von Applikationen im Bereich von Technologien des Semantic Web – und Joseki, das SPARQL Abfragen an Jena ermöglicht. Es wird hier die erstellte Ontologie in Form von RDF bzw. OWL über Jena in eine MySQL Datenbank importiert und mit Hilfe von Jena wird auch nach Daten der Ontologie gesucht. Jena ist ein Open Source Projekt. Das System ist in Java umgesetzt und enthält Unterstützung für RDF, RDFS, OWL, SPARQL und eine eingebaute Inferenzmaschine [7].

Joseki ermöglicht das Durchsuchen des Jena-Systems mittels SPARQL-Abfragen. Das wird über eine rudimentäre Weboberfläche erreicht, in die SPARQL-Abfragen direkt eingegeben werden können [5]. Die Ergebnisdarstellung erfolgt mittels Listen oder Tabellen. Erforderlich sind ExpertInnen, welche die Formulierung von Abfragen in SPARQL durchführen und die Ergebnisse einer solchen Abfrage interpretieren können. Joseki ist Open Source Software und es ist auf das RDF-Framework Jena optimiert

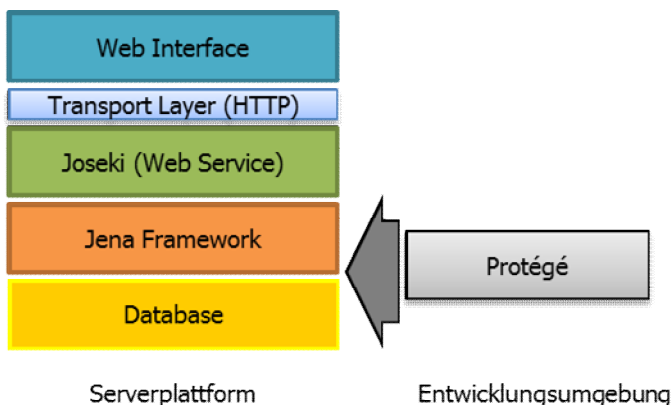


Abbildung 3: Das aktuelle Softwarekonzept



Folgender Ablauf wurde prototypisch umgesetzt. Im ersten Schritt wird eine Fragestellung in SPARQL-Syntax in ein Textfeld eines Webinterfaces eingegeben. Über Joseki wird eine Anfrage formuliert und jena durchsucht die ontologie nach entsprechende knoten der Ontologie. Sodann wird in Joseki eine eindeutige URL generiert. Von dieser URL kann ein Dokument geladen werden, welches - abhängig von der Formulierung der Frage - die entsprechende Antwort enthält. Am Ende werden vom Webinterface die Ergebnisse in Form einer Liste bereitgestellt In Abbildung 3 werden die Entwicklungsumgebung (Protegé) und die Serverplattform des Use-Case gezeigt. Anwendern aus den Bereichen Konstruktion oder Berechnung wird es ermöglicht - unterstützt von vordefinierten SPARQL Abfrage als ein Templates von einem Experten - in der Anfragesprache SPARQL Abfragen zu erstellen). Die Abfragen ergeben gefilterte Sichten, welche aus den Bedürfnissen der jeweiligen User abgeleitet sind, wie z.B. die Bauelemente eines Motormoduls im Entwicklungsprozess., Unterschiedliche Ergebnisse wie Bauteile, laufende Berechnungsaufgaben bzw. Berechnungsarten und -umfänge der entsprechenden Folgeprozesse werden angezeigt. Anwender können durch die Ontologie komplexe Zusammenhänge besser analysieren und Abhängigkeiten leichter erkennen, welches sie besonders in den PEP unterstützt.

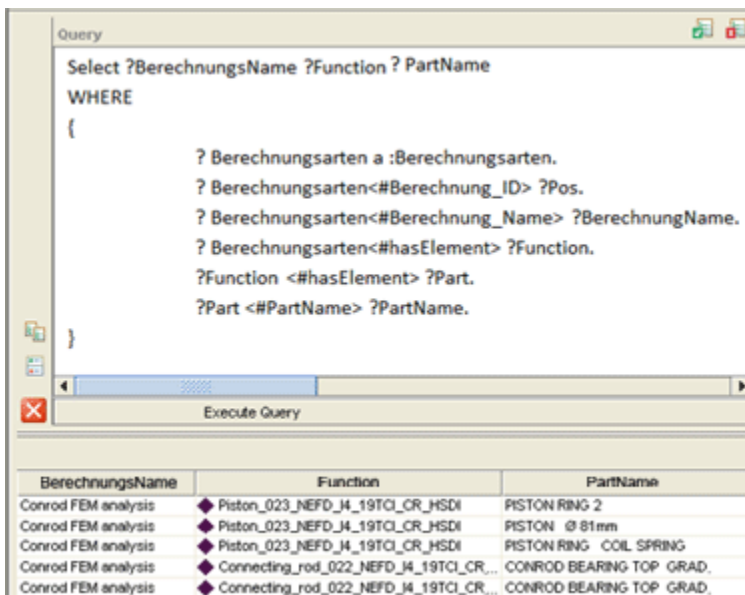


Abbildung 4: Die SPARQL Abfrage und dessen Ergebnis im RDF-Query-Demonstrator

In Abbildung 4 wird exemplarisch eine Abfrage für Berechner gezeigt: Durch die Auswahl einer Berechnungsart aus dem Berechnungsbereich werden dazugehörige Bauteile aus dem Konstruktionsbereich gesucht.

Die Abfrage lautet im Detail: Es wird eine Berechnungsart ausgewählt, Berechnungsarten-Name: Conrod FEM analysis. Dazu werden die verknüpften Funktionen aus der Funktionsstruktur gesucht, im Fall "Conrod FEM analysis" sind dies Funktionen wie "Moment bereitstellen" und "Laufruhe gewährleisten" für "Piston" und "Connecting_rod". Diese Funktionen sind nun verschiedenen Bauteilen zugeordnet. Zu Piston gehören 7 Bauteile und zu Connecting_rod gehören 18 Bauteile.

5 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die exemplarische Erstellung einer Ontologie zur Abbildung eines Ausschnitts des PEP, nämlich Konstruktion und Berechnung. Für die Modellierung der realen Welt in einer Ontologie empfiehlt sich ein iteratives Vorgehen, da die benötigten Zusammenhänge im Vorfeld nur schwer erfassbar sind und die maschinelle Verarbeitbarkeit des Modells nach jeder Entwicklungsphase getestet werden muss. Da die Zusammenhänge im PEP einem netzartigen Schema folgen und Ontologien ein weit verbreitetes Konzept für die Datenmodellierung vernetzter Strukturen sind, bietet sich deren Verwendung für die Modellierung der Produktinformation an.

Der Ontologie-Ansatz kann zudem in unterschiedlichen Disziplinen verwendet werden und ermöglicht die steigende Komplexität der Produkte in der Produktentwicklung besser handhabbar zu machen. Weiters werden unterschiedliche Sichten auf die Produktstruktur erstellt, und damit die Komplexität der Zusammenhänge zwischen Konstruktion und Berechnung verringert. Weiteres wird zielgerichtetes Finden, in einer großen Anzahl von elektronisch verwalteten Informationen, vereinfacht und beschleunigt.

In dieser Arbeit ist eine Umsetzung auf Open Source-Basis erstellt worden. Diese ist noch in einem Prototyp-Stadium und muss weiterentwickelt werden, damit sie direkt für Konstrukteure oder Berechner ohne SPARQL Know-How anwendbar ist: Die jetzige Version der Anwendung kann Bauteile einer Struktur charakterisieren und je nach Anwendungsbereich gefilterte Stücklisten für den PEP generieren. Der semantische Lösungsansatz eignet sich sowohl als Kern einer Plattform für (automatisierte) Anfragen, als auch zur Analyse und als Diskussionsbasis für die Zusammenhänge und Optimierungspotentiale.

6 References

- [1] Thomas, G.: Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. *International Journal Human-Computer Studies* Vol. 43, Issues 5-6, November 1995, p.907-928.
- [2] Natalya N.; Deborah M.: *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*, http://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101-noy-mcguinness.html, 2001, (zuletzt besucht am 31.5. 2012).
- [3] Protegé: <http://protege.stanford.edu/>, (zuletzt besucht am 31.5. 2012).
- [4] OWL: <http://www.w3.org/TR/owl-features/>, (zuletzt besucht am 31.5. 2012).
- [5] Joseki webpage: <http://www.joseki.org/>, zuletzt besucht: 31.5. 2012.
- [6] Libby, M., Andy, S. et al.: Three Implementations of SquishQL, a Simple RDF Query Language. In Ian Horrocks and James A. Hendler, editors, *International Semantic Web Conference*, volume 2342 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 423–435. Springer, 2002.
- [7] Jena semantic Web Framework webpage: <http://jena.sourceforge.net/>, zuletzt besucht: 31.5. 2012.
- [8] Jambalaya webpage; <http://thechiselgroup.org/2004/07/06/jambalaya/>, zuletzt besucht: 31.5. 2012.



Markerlose Bewegungsaufzeichnung und Bewertungsmethoden für die menschenzentrierte Produktentwicklung

Jörg Miehling und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Universität Erlangen-Nürnberg*

Human-centered design focuses on the adaption of product specifications to meet the users' requirements. In order to save development time, reduce product development costs as well as to enhance the products' quality, the virtual product development paradigm emphasizes the use of virtual prototypes instead of physical ones. To meet these objectives a digital human modeling system is needed which is capable of representing the human-product interaction. Up to now it is not possible to accurately model real motion sequences at the computer, thus motion capturing is needed. The presented contribution illustrates a system for the markerless tracking of human body movements, which can be used to drive biomechanical simulations, using Microsoft's Kinect sensor. Additionally further directions for the development of a system to evaluate and visualize the resultant simulation data are outlined.

1 Einleitung und Motivation

In der Produktentwicklung muss heutzutage immer größerer Wert auf die Bedürfnisse und Fähigkeiten der Produktnutzer gelegt werden. Insbesondere ältere Menschen haben ganz spezielle Anforderungen an die Produktergonomie. Aufgrund der wachsenden Lebenserwartung sowie der zunehmenden Überalterung in Deutschland wird dieser Teil der Gesellschaft immer mehr an

Bedeutung gewinnen. Die frühzeitige Berücksichtigung der damit verbundenen Herausforderungen kann in Zukunft einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil begründen. Mit zunehmendem Alter werden vor allem die Mobilität und damit mobilitätserhaltende Produkte zur Unterstützung der eigenständigen Lebensführung immer wichtiger [1]. Bei der sogenannten menschenzentrierten Produktentwicklung müssen deshalb auch diese Belange in die Modellbildung mit einfließen. Im Zusammenspiel mit der virtuellen Produktentwicklung sollen nutzerorientierte Produkte entstehen, deren Entwicklung möglichst ohne Versuche an realen Prototypen (Physical Mock-Up) auskommt. Die frühzeitige, virtuelle Abbildung der Produkteigenschaften (Digital Mock-Up) soll dabei an einem virtuellen Modell (Virtual Prototyping) erfolgen, um die Kosten für die Fertigung realer Produktmodelle und Nutzertests einzusparen, die Durchlaufzeiten zu senken sowie die Produktqualität zu erhöhen. [2]

Zur erfolgreichen Kombination der beiden Paradigmen muss die sogenannte Mensch-Maschine-Schnittstelle virtuell abgebildet werden. Dafür werden digitale Menschmodelle benötigt. Diese müssen in der Lage sein sich so realitätsnah wie möglich bewegen zu können, wofür die biomechanischen Menschmodelle prädestiniert sind. Da jedoch selbst einfach erscheinende Bewegungsabläufe auf einem komplexen Zusammenspiel kinematischer Ketten basieren, können diese noch nicht vollkommen realistisch am Computer animiert werden, weshalb diese aufgezeichnet werden müssen.

Die Aufzeichnung menschlicher und tierischer Bewegungen, das sogenannte *Motion Capturing*, wird vor allem in der Unterhaltungsindustrie zur Animation computergenerierter Figuren eingesetzt. Darüber hinaus kommen die Bewegungsaufzeichnung sowie deren anschließende Analyse aber auch in wissenschaftlichen Disziplinen, wie der Medizin oder der menschenzentrierten Produktentwicklung, vermehrt zum Einsatz. In der Medizin werden vorwiegend Abweichungen vom normalen Bewegungsverhalten und deren Auswirkungen für den betroffenen Patienten analysiert, woraus schließlich individuelle Therapieempfehlungen abgeleitet werden sollen. Bei der menschenzentrierten Produktentwicklung hingegen geht es darum, Produkteigenschaften den Bedürfnissen einer Zielgruppe entsprechend anzupassen. Denkbar sind Ergonomiebetrachtungen, bei denen größtenteils die Erreichbarkeit von Steuerelementen untersucht wird, sowie Analysen der Belastungen des menschlichen Körpers, welche bei der Verwendung der technischen Produkte auftreten. [3]

In diesem Beitrag wird ein System vorgestellt, das die markerlose Aufzeichnung sowie Übertragung von Bewegungen des gesamten menschlichen Bewegungsapparates auf ein digitales Menschmodell ermöglicht, welche wiederum als Eingangsgröße für digitale Menschsimulationen verwendet werden

können. Die daraus resultierenden Ergebnisse sollen schließlich mit Hilfe geeigneter Methoden visualisiert und bewertet werden. Ziel ist die Ableitung von Handlungsvorschlägen für die Entwicklung nutzergerechter Produkte, da der Produktentwickler üblicherweise kein fundiertes Wissen in den Bereichen Biomechanik und Ergonomie aufweisen kann.

2 Optische Verfahren für die Aufnahme von Bewegungen des gesamten menschlichen Bewegungsapparates

Beim Motion Capturing werden optische und nicht-optische Verfahren unterschieden, wobei im Folgenden nur auf die optischen Verfahren eingegangen wird. Die optischen Verfahren arbeiten mit Kameras und können in Systeme, die auf Markern basieren und markerlose Systeme gegliedert werden. Die markerbasierten Systeme zeichnen sich durch sehr hohe Abstraten und Genauigkeiten aus. Da sich die Identifikation der Marker aber oft als schwierig herausstellt und Verdeckungen auftreten können, ist eine aufwändige Nachbearbeitung der gewonnenen Daten unerlässlich. Deshalb sind diese Systeme meist nicht echtzeitfähig. Weiterhin sind die benötigten Kameras sehr teuer. Einen weiteren Nachteil der markerbasierten Systeme stellt das große Datenvolumen, das gespeichert und verarbeitet werden muss, dar. Neben den markerbasierten Verfahren gibt es heute auch Entwicklungen, die ohne das Aufkleben physischer Marker auf den Akteur auskommen. Zwei der gängigsten sind das Time-of-Flight- und das Structured Light-Verfahren. [4]

Time-of-Flight-Kameras ermöglichen die direkte Aufnahme eines Tiefenbildes in Echtzeit auf Basis des Lichtlaufzeitverfahrens. Sie beinhalten einen PMD-Sensor (Photomischdetektor) sowie eine Beleuchtungseinheit. Durch Messen der vergangenen Zeit vom Aussenden des Lichtes bis zum Auftreffen auf den Bildsensor wird schließlich die Entfernung für jeden Bildpunkt berechnet. Nachteile dieser Kameraart sind jedoch die geringe laterale Auflösung und der noch sehr hohe Preis. [5]

Structured Light ist ein Verfahren, das ein bekanntes Lichtmuster auf eine Szene projiziert. Als Muster kommen hierbei Streifen, auch bekannt als Streifenprojektion, Gitter oder auch einfache Punktmuster zum Einsatz. Die Structured Light-Systeme bestehen aus einem Laser- oder LCD-Projektor und Kameras. Der Aufbau ist exemplarisch in Bild 1 dargestellt. Der Projektor dient der Beleuchtung der Szene mit dem Muster. Trifft das Lichtmuster auf eine Oberfläche, wird es geometrisch verzerrt, sofern es aus einem anderen Blickwinkel betrachtet wird. Dieses verschobene Muster wird von einer oder mehreren Kameras aus einer vorbestimmten Perspektive aufgezeichnet. Das aufgenommene Muster wird mit dem bekannten ausgesendeten Lichtmuster

verglichen, wobei aus den resultierenden Verschiebungen durch aktive Triangulation die Tiefeninformation berechnet wird. Bei diesem Verfahren müssen die optischen Komponenten, die Kameras und Projektoren, genauestens ausgerichtet sein, um gute Ergebnisse erzielen zu können. [5]

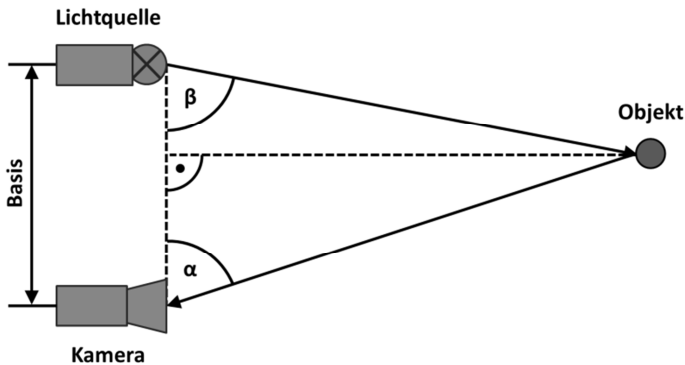


Bild 1: Prinzip der aktiven Triangulation

3 Werkzeug zur markerlosen Bewegungsaufzeichnung

Das erarbeitete markerlose Bewegungserfassungssystem verwendet die kostengünstige Spielesteuerung Microsoft Kinect als Eingabegerät in Verbindung mit den Open-Source-Bibliotheken OpenNI und Primesense NITE, die der Interpretation des Datenstromes aus dem Kinect-Sensor dienen. Bei dem biomechanischen Menschmodell, auf das die aufgenommenen Bewegungen übertragen werden, handelt es sich um ein OpenSim-Ganzkörpermodell. Im Folgenden wird kurz auf die verwendeten Hard- und Softwarekomponenten eingegangen.

3.1 Hard- und Softwarekomponenten

3.1.1 Microsoft Kinect

Microsoft Kinect [5] ist eine für die Spielekonsole Xbox 360 entwickelte Sprach- und Gestensteuerung. In letzter Zeit findet sie immer mehr Aufmerksamkeit unter Programmierern und in der Wissenschaft für unterschiedlichste Einsatzzwecke, von der Robotersteuerung bis hin zu medizinischen Anwendungen. Die Kinect besitzt eine RGB-Farbkamera, einen Infrarotsensor, einen laserbasierten Infrarotprojektor sowie ein Array aus vier Mikrofonen. Die Daten werden über eine USB-Schnittstelle an eine Xbox 360 oder einen PC über-

tragen. Die RGB-Kamera erfasst Videos mit bis zu 640 x 480 Pixeln bei maximal 30 Bildern pro Sekunde. Die Erzeugung des Tiefenbildes beruht auf der PrimeSense Light Coding-Technologie, die dem Structured Light-Verfahren zuzuordnen ist. Der Infrarotprojektor strahlt kontinuierlich dasselbe Punktmuster, im Englischen *Speckle Pattern* genannt, mit 633 x 495 Punkten, in den Raum aus. Das von den angestrahlten Oberflächen reflektierte Licht wird dann vom Infrarotsensor (monochromer CMOS-Sensor) aufgezeichnet. Das Referenzmuster, mit dem das aufgenommene Punktmuster aus den Infrarotbildern verglichen wird, ist in der Hardware gespeichert. Die korrespondierenden Punkte werden mit Hilfe von Kreuzkorrelation gefunden. Aus den Verschiebungen wird schließlich ein Tiefenbild mit maximal 640 x 480 Pixeln errechnet, wobei auch hier die maximale Wiederholungsrate 30 Bildern pro Sekunde entspricht.

3.1.2 OpenNI und PrimeSense NITE

OpenNI [6] ist eine, von PrimeSense ins Leben gerufene, Non-Profit-Organisation, die darauf ausgelegt ist die Kompatibilität und Interoperabilität von Geräten, Programmen und Middleware für die natürliche Interaktion (Natural Interaction) zu gewährleisten. Natural Interaction (NI) beschreibt Mensch-Maschine-Schnittstellen, die auf den Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung beruhen. Der Fokus liegt dabei auf dem Hören und dem Sehen. Alltägliche Szenarien wären die Erkennung von Sprache und Handgesten zum Aktivieren und Steuern von Geräten oder auch das Tracking des gesamten Körpers für Spieleanwendungen. Für die Realisierung dieser Ziele hat OpenNI das gleichnamige Open-Source-Framework herausgegeben, welches eine einheitliche Programmierschnittstelle (API) für Treiber und Middleware beliebiger Anbieter enthält. Es ermöglicht die Kommunikation mit Modulen, wie 3D-Sensoren, RGB-Kameras, Infrarot-Kameras und Audiogeräten. Das OpenNI-Framework erlaubt zum Beispiel auch die Kinect am PC zu verwenden und auf deren Audio-, Video- und Tiefensensoren zuzugreifen. Zusätzlich bietet OpenNI aber auch komplexere Lösungen an, um die mit den Sensoren aufgenommenen Daten verstehen und interpretieren zu können, wie etwa das visuelle Tracking.

NITE [7] ist eine von PrimeSense bereitgestellte, auf dem OpenNI-Framework aufbauende Middleware zur Verfolgung menschlicher Bewegungen, welche vor allem das Handtracking erweitert. Sie definiert Standardgesten, wie etwa Wink-, Klick und Kreisbewegungen, wobei auch weitere benutzerdefinierte Gesten implementiert werden können. In Verbindung mit OpenNI ermöglicht PrimeSense NITE aus den Tiefenbildern ein Vektorskelett mit 15

Gelenkknoten zu berechnen und auf die gefilmte Person zu legen, wodurch ein Motion Capturing in Echtzeit realisierbar ist.

3.1.3 OpenSim

OpenSim [8] ist eine frei verfügbare Software für die Erstellung und Simulation biomechanischer Modelle des muskuloskeletalen Systems. Diese Modelle ermöglichen neben der geometrischen Darstellung des menschlichen Körpers auch die Abbildung des dynamischen Verhaltens des Muskelskelettsystems. Das Skelett setzt sich dabei aus den Knochen zusammen, welche als starre Körper modelliert werden und über die Gelenke miteinander verbunden sind. An diesem Mehrkörpersystem setzen die Muskeln an, die als Aktuatoren dienen.

3.2 Skalierung

Ein System zum markerlosen Tracking menschlicher Bewegungen ist nur dann sinnvoll anwendbar, wenn auch eine Möglichkeit besteht, die anthropometrischen Daten des Akteurs auf ein Menschmodell zu übertragen. Wird eine Bewegung einer Person mit abweichenden Körpermaßen auf ein standardisiertes Modell übertragen, ergeben sich ganz andere Analysedaten, als mit einem auf die entsprechende Person skalierten Menschmodell, weshalb die Skalierung unverzichtbar ist.

Das implementierte System macht sich die Fähigkeit von OpenNI zunutze, Tiefenbilder aus dem Kinect-Sensor auszulesen. Nach Einnahme der sogenannten Kalibrierpose startet automatisch die Kalibrierung. Dabei wird versucht, ein Vektorskelett in den dem Akteur zugeordneten Umriss hineinzulegen. Für die im Vektorskelett enthaltenen Gelenkpunkte werden dann jeweils die Positions- und Orientierungsparameter bereitgestellt, welche in Bezug auf das globale Koordinatensystem, das dem Infrarotsensor der Kinect entspringt, angegeben werden.

Das Skalierungswerkzeug berechnet zunächst die Segmentlängen im Vektorskelett. Diese entsprechen dem euklidischen Abstand der zugehörigen Gelenkpunkte. Aus diesen Daten und den aus dem generischen OpenSim-Modell bekannten Gelenkabständen werden die Skalierungsfaktoren für die einzelnen Körperteile ermittelt. Die so gewonnenen Daten werden anschließend in eine für OpenSim lesbare Skalierungsdatei geschrieben.

In Bild 2 ist links das generische OpenSim-Modell und auf der rechten Seite exemplarisch ein skaliertes Modell zu sehen.

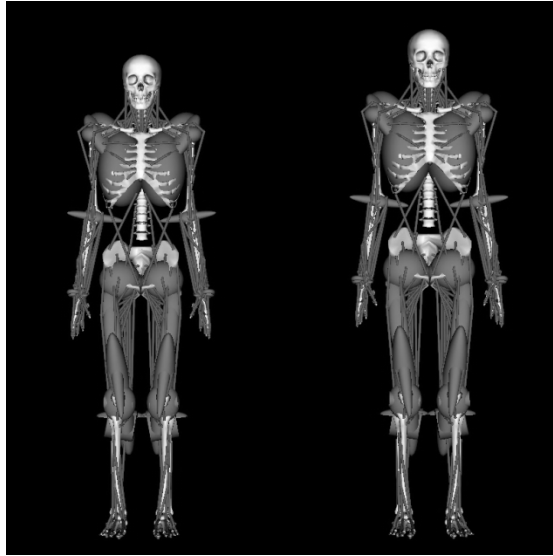


Bild 2: OpenSim-Modell unskaliert (links) bzw. skaliert (rechts)

3.3 Bewegungsaufzeichnung

Das Bewegungsaufzeichnungsmodul zeichnet zunächst die Bewegungsparameter auf, berechnet daraus die Gelenkwinkel, bereinigt und filtert diese und überführt schließlich die gewonnenen biomechanischen Daten in eine für OpenSim lesbare Datenstruktur. Bild 3 zeigt den Prozess der Bewegungsaufzeichnung bildlich, wobei im Folgenden die Einzelschritte genauer betrachtet werden.

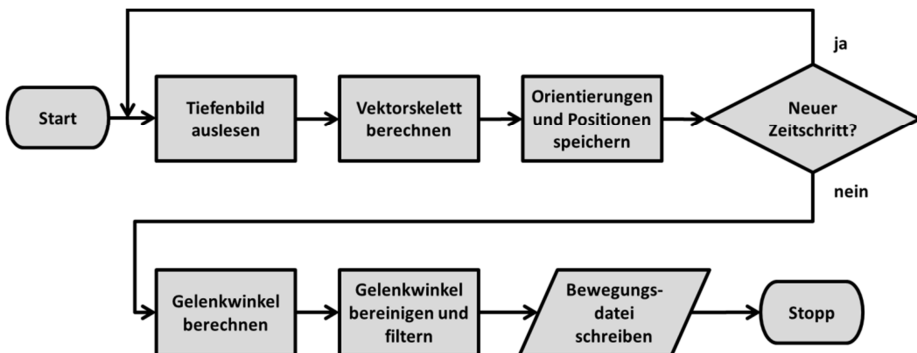


Bild 3: Ablauf der Bewegungsaufzeichnung

3.3.1 Aufzeichnung der globalen Gelenkorientierungen sowie der Translation

Das Bewegungsaufzeichnungsmodul speichert zunächst die Gelenkorientierungen sowie die Translation der Gesamtperson für jeden Zeitschritt unabhängig vom nachher verwendeten Menschmodell in einer dafür geeigneten Datenstruktur ab. Die Gelenkorientierungen werden von OpenNI als 3x3-Matrizen und die Translationen als Vektoren, welche die drei kartesischen Koordinaten der entsprechenden Gelenkpunkte enthalten, ausgegeben. Die Translation sowie die Orientierung der Gesamtperson werden am Rumpf erfasst. Für die anderen Gelenke werden die Positionen im Raum nicht benötigt, da sich diese aus den jeweiligen Rotationen und Segmentlängen ergeben.

3.3.2 Berechnung der Gelenkwinkel

OpenSim kann, wie die meisten anderen digitalen Menschmodelle auch, nicht mit den globalen Gelenkorientierungen aus dem Vektorskelett umgehen, da die Körperteile der biomechanischen Menschmodelle größtenteils mittels aufeinanderfolgender Rotationen bewegt werden. In OpenSim können bis zu drei Drehungen um die lokalen, körperfesten Koordinatenachsen der Körperteile miteinander kombiniert werden. Die Drehreihenfolge hängt dabei von den Drehwinkeln, den sogenannten Eulerwinkeln, ab. Hier setzt die Transformation der von OpenNI ausgegebenen Orientierungen auf die entsprechenden Gelenkwinkel von OpenSim an. Unter Berücksichtigung der Drehfolge und der lokalen Verdrehung zwischen zwei hintereinander geschalteten Gelenken können die Eulerwinkel berechnet werden. Bei der Verwendung von Eulerwinkeln muss darauf geachtet werden, dass die Drehachsen orthogonal zueinander sind, was beim verwendeten OpenSim-Modell erfüllt ist.

Die Eulerwinkel beschreiben drei aufeinanderfolgende Rotationen. Damit können Orientierungen im dreidimensionalen Raum mit nur drei Parametern eindeutig angegeben werden. Bei Eulerwinkeln ist zu beachten, dass die Drehungen nicht um die globalen Koordinatenachsen, sondern im körperfesten, mitbewegten Koordinatensystem erfolgen. Ein und dieselbe Orientierung kann auch als aufeinanderfolgende Drehungen um die globalen Koordinatenachsen beschrieben werden. Dies entspricht jedoch nur der Umkehrung der Drehreihenfolge der Eulerwinkel und hat keinerlei Einfluss auf die Lösung. Es ist zu beachten, dass ein Satz Eulerwinkel immer mit einer speziellen Rotationsreihenfolge einhergeht und nicht isoliert betrachtet werden darf. Eine Drehung um dieselben Winkel, aber in einer anderen Rotationsreihenfolge, würde zu einer völlig anderen Raumorientierung führen. [4]

Im Folgenden wird kurz auf die Zerlegung der globalen Orientierungen in deren Eulerwinkel eingegangen. Eine Drehung um die körperfeste x-Achse, die anfangs noch mit der globalen x-Achse zusammenfällt, gefolgt von einer Drehung um die z- und schließlich um die y-Achse des mitgedrehten, körperfesten Koordinatensystems wird zum Beispiel als XZY-Eulerwinkel bezeichnet. Dies entspricht genau der Drehreihenfolge beim Hüftgelenk, welche exemplarisch in Bild 4 dargestellt ist. Die erste Abbildung zeigt die Ausgangsstellung. Im zweiten Teilbild wurde der Oberschenkel um den Winkel $\alpha = 60^\circ$ um die körperfeste x-Achse gedreht. Darauf folgt in der dritten Darstellung eine Rotation um die mitgedrehte, körperfeste z-Achse mit dem Winkel $\beta = -30^\circ$ und schließlich noch eine Drehung um die y-Achse mit dem Winkel $\gamma = 40^\circ$.

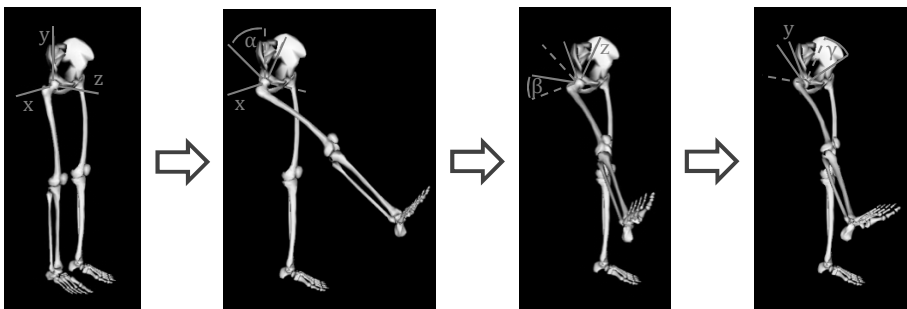


Bild 4: Eulerwinkel des Hüftgelenks

Die für jedes Gelenk zu jedem Zeitschritt gespeicherten Drehmatrizen geben, wie schon erwähnt, die Gelenkorientierungen in Bezug auf das globale Kinect-Koordinatensystem an. Die Gelenkwinkel in OpenSim beziehen sich jedoch immer nur auf die Verdrehung in Bezug auf das in der Hierarchie vorherige Gelenk. Aus den Drehmatrizen des aktuellen und des vorhergehenden Elements kann die lokale Verdrehung, die zwischen diesen beiden Elementen stattfindet, berechnet werden. Da die Drehmatrix orthogonal ist, entspricht ihre Inverse ihrer Transponierten. Die Rotationsmatrix für die lokale Verdrehung zwischen dem Gelenk e und seinem Vorläufergelenk p ergibt sich dann zu:

$$R_{e,p} = R_p^{-1} \cdot R_e = R_p^T \cdot R_e$$

Die Gesamtrotation für die Drehreihenfolge XZY folgt beispielsweise der Beziehung: [4]

$$R_{XZY}(\alpha, \beta, \gamma) = R_X(\alpha) \cdot R_Z(\beta) \cdot R_Y(\gamma)$$

Die Drehmatrizen für die Einzeldrehungen können [4] entnommen werden. Durch Ausnutzen der beiden genannten Zusammenhänge werden schließlich die Eulerwinkel berechnet.

3.3.3 Bereinigung, Filterung und Schreiben der Bewegungsdaten

Abschließend werden die Daten, wie schon erwähnt, bereinigt, gefiltert und in eine für OpenSim lesbare Bewegungsdatei geschrieben.

Die Bereinigung ist notwendig, da die Drehungen aufgrund der verwendeten atan2-Funktion in der Gelenkwinkelberechnung auf Werte von $-\pi$ bis π abgebildet werden und deshalb beim Überschreiten der Ränder Sprünge auftreten.

Weiterhin sind biomechanische Rohdaten, aufgrund der Digitalisierung, immer mit Fehlern überlagert. Werden die verrauschten Rohdaten für Bewegungsanalysen verwendet, können die Fehler, beispielsweise bei Ableitungen, so groß werden, dass die Ergebnisse nutzlos sind. Es gibt Fehler, die anhand eines gewissenhaften Durchlaufs durch die Bewegungsaufzeichnung verhindert oder minimiert werden können, aber auch solche, die nicht zu verhindern sind. Die Bewegungen des Menschen folgen größtenteils tiefen Frequenzen, wobei der Rauschanteil meist hochfrequent ist, weshalb sich die Filterung mit Tiefpassfiltern anbietet. Bei deren Verwendung muss eine geeignete Grenzfrequenz gewählt werden. Alle Frequenzen darüber werden abgeschnitten, um den hochfrequenten Rauschbereich zu eliminieren. Wird die Frequenz zu hoch gewählt, kann dies zur Folge haben, dass Rauschen zurückbleibt, während bei der Wahl einer zu niedrigen Grenzfrequenz Teile der eigentlichen Bewegung mit abgeschnitten werden können. Für die Filterung menschlicher Bewegungen werden meist Grenzfrequenzen zwischen 4 Hz und 8 Hz gewählt. Zu beachten ist dabei zusätzlich, dass die Abtastfrequenz mindestens viermal so groß sein sollte als die Grenzfrequenz, damit eine erfolgreiche Filterung gewährleistet werden kann. [4]

Das beschriebene System verwendet einen Butterworth-Tiefpassfilter vierter Ordnung. Ein großer Vorteil von Butterworth-Filtern ist deren einfache Anwendung und deren begrenzter Rechenaufwand, weshalb sie die meistverwendetsten Filter in der Biomechanik darstellen. Diese Filter haben zwar einen relativ flachen Übergangsbereich zwischen den zu filternden und nicht zu filternden Frequenzen, was aber durch die Wahl höherer Ordnungen verbessert werden kann. [4]

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte System eignet sich hervorragend zum markerlosen Tracking menschlicher Bewegungen. Es ermöglicht die Aufzeichnung der Bewegung von 15 Gelenken und beinhaltet drei translatorische und 19 rotatorische Freiheitsgrade, womit die größeren Körperteile des OpenSim-Modells animiert werden können. Der Vorteil des vorgestellten Verfahrens gegenüber bestehenden Methoden ist die Zeitersparnis im Vorfeld sowie bei der Nachbearbeitung der gewonnenen Daten. Weiterhin entfällt der meist hohe Kalibrieraufwand. Dennoch ist kritisch anzumerken, dass die Auflösung des Tiefenbildes der Microsoft Kinect nicht hoch genug ist, um Bewegungen kleinerer Körperteile, wie etwa der Finger, aufzunehmen. Das vorgestellte Trackingsystem stellt im Vergleich zu den meisten aufwändigeren Verfahren eine kostengünstige Alternative dar, wenngleich es mit deren Genauigkeit und Abtastrate oft nicht mithalten kann. Dies könnte sich aufgrund des schnellen Fortschritts in diesem Bereich demnächst ändern. Jedoch ist dies auch nicht unbedingt notwendig, da die aus Menschsimulationen resultierenden Analysewerte eher als Tendenzen und nicht als absolute Werte interpretiert werden sollten. Zur Bewertung und Visualisierung der Simulationsergebnisse erscheint die Implementierung eines Konstruktionsassistenzsystems sinnvoll.

Ein solches Konstruktionsassistenzsystem soll es dem Produktentwickler ermöglichen, Mensch-Produkt-Interaktionen ohne großen Aufwand virtuell abzubilden und deren Ergebnisse ohne einschlägige Erfahrungen in den Bereichen Biomechanik und Ergonomie analysieren zu können. Es soll den Produktentwickler damit bei der Entscheidungsfindung im gesamten Produktentwicklungsprozess sowie bei der Optimierung nutzerorientierter Produkte unterstützen. Das angestrebte Konstruktionsassistenzsystem soll die Mensch-Produkt-Interaktion in die CAD/CAE-Umgebung integrieren [9] und schließlich die produktabhängigen Bewegungsabläufe für die dynamische Menschsimulation bereitstellen. Die in einigen CAD/CAE-Systemen integrierten Analysen verwenden nur relativ einfache Mannequins und beschränken sich auf die Evaluierung statischer Posen, wie etwa bei der RULA-Analyse (Rapid Upper Limb Assessment). Durch Hinzunahme individualisierter biomechanischer Menschmodelle, die Leistungseinbußen, wie etwa verminderte Maximalkräfte oder Einschränkungen in der Beweglichkeit, berücksichtigen, sollen mit Hilfe von Bewertungsmethoden Handlungsanweisungen für den Produktentwickler abgeleitet und schließlich die Ergebnisse visualisiert werden. Das Augenmerk soll dabei auf der Bewertung der Muskelaktivitäten, der Reaktionskräfte, der Gelenkmomente sowie der verrichteten mechanischen Arbeit liegen, die der Mensch aufbringen muss, um die gewünschte Bewegung ausführen zu können. [10]

Literatur

- [1] Krüger, D.; Eilmus, S.; Schmidt, J.; Wartzack, S.; Krause, D.; Paetzold, K.: "Notwendigkeit für eine Methodenplattform zur Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse", 22. DfX-Symposium, Tutzing, 2011, S. 265-276.
- [2] Krüger, D.; Stockinger, A.; Wartzack, S.: "A haptic based Hybrid Mock-Up for mechanical products supporting human-centered design", Proceedings of the 18th International Conference on Design 2011 (ICED11), Vol. 10, 2011, S. 331-340.
- [3] Jackèl, D.; Neunreither, S.; Wagner, F.: "Methoden der Computeranimation", Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [4] Manal, K.T.; Buchanan, T.S.: "Biomechanics of Human Movement", In: Kutz, M. (Hrsg.): "Biomedical Engineering and Design Handbook. Fundamentals", Vol. 1, 2nd Edition, The McGraw-Hill Companies, New York, 2009, S. 125-151.
- [5] Dal Mutto, C.; Zanuttigh, P.; Cortelazzo, G.: "Time-of-Flight Cameras and Microsoft Kinect", Springer-Verlag, Berlin, 2012.
- [6] OpenNI: "OpenNI User Guide v3", www.openni.org, 2011.
- [7] PrimeSense Ltd.: "Prime Sensor NITE 1.3 Controls Programmer's Guide", www.primesense.com, 2010.
- [8] 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, 2007, S. 1940-1950.
- [9] Schmidt, J.; Krüger, D.; Eilmus, S.; Paetzold, K.; Wartzack, S.; Krause, D.: "Design for Mobility - A Methodical Approach", Proceedings of the 12th International Design Conference DESIGN 2012, Dubrovnik, 2012, S. 1101-1110.
- [10] Lämkuhl, D.; Berlin, C.; Örtengren, R.: "Digital Human Modeling: Evaluation Tools", In: Duffy, V.G. (Hrsg.): "Handbook of Digital Human Modeling - Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering", CRC Press, Boca Raton, 2009, S. 1-22.

Modellierung und Simulation des Hand-Arm-Systems bei stoßartiger Anregung

Sven Matthiesen, Sebastian Mangold, Tobias Schäfer
IPEK Institut für Produktentwicklung;
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Most common models of hand-arm systems describe the mechanical response by low accelerations and short movements. The focus of this paper is on impacts (over 4.000 m/s^2) on human hand-arm systems, which are caused by a bolt setting device. To investigate the effects of different operators on the behavior of the power tool, a two-degree-of-freedom model of hand-arm-systems is developed to predict mechanical interactions of the hand-arm-system with the power tool. The simulation model gets stimulated with the input parameter movement force, which results from setting nails into the ground. To develop an accurate model of the hand-arm-system, the force between hand and tool is needed, beside movement, velocity and acceleration of devices masses. Because of the very short time period it is not possible to measure this force directly without influencing the overall system. Therefore a model of a powder actuated tool has also been developed to simulate the overall system. The motion of the device in the heavy impact phase is tracked by a high-speed-camera and time-synchronized acceleration sensors and compared with simulated motions. Based on this data a robust and easy model of a hand-arm system is presented.

Abkürzungsverzeichnis

c	Federkonstante	t	Zeit
d	Dämpferkonstante	x	Weg in x-Richtung

F	Kraft	Δl	Abstand, welcher das Handpolster repräsentiert
$F_{Anpress}$	Vom Benutzer aufgebraachte Kraft, um das Gerät auf den Boden anzupressen	$(\)_{21}; (\)_{1G}$	Element zwischen Masse 1 und 2 oder Griff
F_{Griff}	Kraft zwischen Griff und Hand	$(\)_{GG}; (\)_{GM}$	Element zwischen Gehäuse und Griff oder Magazin
$F_{Anregung}$	Für die Gerätebewegung verantwortliche Kraft	$(\)_{Griff}; (\)_{Magazin}; (\)_{Gehäuse}$	Griff, Magazin oder Gehäuse des Gerätes
g	Gravitationskonstante	$(\dot{\ }); (\ddot{\ })$	Ableitung in der Zeit
m	Masse		

1 Einleitung

Um auf personal- und kostenintensive Versuche in der Geräteentwicklung zu verzichten, werden Prüfstände benötigt, die mechanisch in gleicher Art wie der Mensch mit dem Gerät wechselwirken und damit wirkungsäquivalent zum menschlichen Hand-Arm-System sind. Diese Prüfstände müssen in der Lage sein, die durch unterschiedliche Anwender entstehenden Einflüsse abbilden zu können. Nur wenige Forscher beschäftigen sich derzeit mit der Nachbildung der Wechselwirkungen des Hand-Arm-Systems mit einem Gerät, um einen realisierbaren Prüfstand ableiten zu können. Die bestehenden Modelle sind nur für stationär vibrierende Geräte, wie beispielsweise Kettensägen [1] oder Bohrhämmer [2] gültig. Neben diesen weit verbreiteten vibrierenden Geräten existieren aber auch Geräte, welche durch vereinzelte große Impulse mit dem Hand-Arm-System in großer Auslenkung wechselwirken (Bspw. Bolzensetzgeräte oder Hochdruckreiniger während des Auslösezeitpunkts). Mit Hilfe von Bolzensetzgeräten können Kassettendächer aus Blech mittels eines Nagels, direkt ohne Vorbohren auf Stahlträger befestigt werden. Durch eine pyrotechnische Explosion innerhalb des Gerätes beschleunigt der Griff solcher Bolzensetzgeräte mit über 4000 m/s^2 und wird anschließend durch die Hand des Menschen abgebremst. Für solche stoßartig anregenden Geräte ist bislang noch kein Prüfstand vorhanden. Das Ziel dieser Untersuchung ist die Entwicklung eines mechanischen Ersatzmodells, mit dessen Hilfe die Wechselwirkungen zwischen Hand-Arm-System und einem Bolzensetzgerät vorhergesagt werden können. Mit der Vision eines realisierbaren Prüfstandes wird dieses Modell möglichst einfach modelliert, um es anschließend auch als technisches Ersatzmodell aufbauen zu können. Der Einfluss verschiedener Anwen-

der und Arbeitspositionen auf die Parameter des Modells wird untersucht werden.

2 Stand der Forschung

Bei handgehaltenen Arbeitsmaschinen (engl. power tools) bilden Mensch, Gerät und Anwendung ein Gesamtsystem, in dem der Mensch als wichtige Komponente maßgeblich die Funktion des Gerätes beeinflusst. In der Gerätebranche werden, aufgrund dieser untrennbaren Wechselwirkungen und der damit verbundenen mechanischen Rückwirkungen auf das Gerät, Lebensdauer- und Variantentests oft mit Versuchspersonal durchgeführt. Insbesondere ist dies der Fall, wenn die Auswirkung des Menschen auf das Gerät nicht explizit bekannt und kritisch für die Gerätefunktion eingestuft wird. Diese Systemtests sind einerseits personal- und somit kostenintensiv, aber vor allem einer großen Streuung durch wechselndes Versuchspersonal während eines Tests und der damit nicht reproduzierbaren Testumgebung unterworfen. Für den Entwickler ist es deshalb wünschenswert einen reproduzierbaren Prüfstand für Variantenentwicklung zu nutzen, der wirkungsäquivalent einen Anwender abbildet. Dazu muss im ersten Schritt das Hand- Arm-System modelliert und das Modell validiert werden, um es dann technisch nachbauen zu können. Um die Wirkung des Menschen auf Geräte nachbilden zu können, beschäftigen sich Forscher schon seit den 50er Jahren damit das menschliche Hand-Arm-Systems mit seinen dynamischen Eigenschaften durch ein beschreibbares mechanisches Ersatzmodell nachzubilden [3]. Aber auch in jüngerer Zeit ist die Nachbildung des Hand-Arm-Systems ein aktuelles Thema. So fordert der Verein Deutscher Ingenieure [4] die Anwendung solcher Ersatzmodelle bei der Bestimmung der Schwingungsemission, der Dauerprüfungen und der Parameteroptimierung von Geräten, um die Schwingungsbelastung auf den Menschen zu reduzieren. Nach Dong [5], verfolgen die meisten Forscher den Ansatz die Wirkung des Hand-Arm-Systems in linear aufgebauten Feder-Masse-Dämpfer-Systemen, wie dies beispielhaft in Bild 1 dargestellt ist, nachzubilden. Einen Überblick über bestehende Konfigurationen solcher linearen Modelle bietet beispielsweise Rakheja [6].

Die Rückwirkung des Hand-Arm-Systems auf ein vibrierendes Gerät, wird meist in dem Verhältnis der aus einer Bewegung resultierenden Kraft und einer Bewegungsgröße ausgedrückt [5].

- Dynamische Steifheit: Quotient aus Kraft und Auslenkung
- Mechanische Impedanz: Quotient aus Kraft und Geschwindigkeit
- Scheinbare Masse: Quotient aus Kraft und Beschleunigung

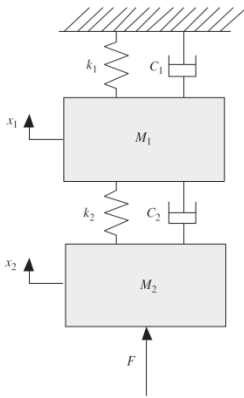


Bild 1: Beispielhaftes linear aufgebautes Hand-Arm-Modell [7]

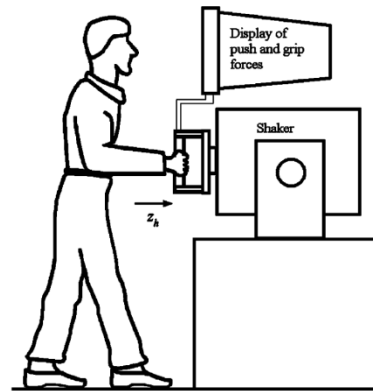


Bild 2: Beispielhafter Messaufbau zur Bestimmung der menschlichen Impedanz [8]

Die Qualität eines Modells wird an der Genauigkeit gemessen, mit welcher das Modell eine dieser Größen im Bezug zum realen Hand-Arm-System vorhersagt. Die zu messenden Bewegungsgrößen zur Modellierung sind Weg, Geschwindigkeit oder Beschleunigung – als auch die Kraft, welche an der Hand wirkt. Diese zur Erstellung eines Hand-Arm-Modells notwendigen Parameter werden somit direkt am Menschen gemessen. Aufgrund der komplexen Anregung durch das reale Gerät ist die Messung der Interaktion zwischen Gerät und Anwender schwierig. Viele Forscher greifen deshalb zur Bestimmung der Messgrößen auf eine Ersatzanregung zurück. Ein auf diesem Shaker angebrachter Griff wird hierfür mit einem breiten Spektrum von Frequenzen beaufschlagt. Sowohl die Kraft am Griff, als auch eine Bewegungsgröße des Griffs (meist die Beschleunigung) werden zeitgleich in Betrag und Phase erfasst. Ein beispielhafter Messaufbau ist in Bild 2 dargestellt. Die so gemessenen Größen sind immer nur für definierte Randbedingungen unter definierten Amplituden und Frequenzanregungen gültig [9]. Insbesondere eine von der untersuchten Armhaltung abweichende Haltung, sowie eine Änderung der Ankopplungskräfte an das Gerät führen zu unterschiedlichen Reaktionen des Hand-Arm-Systems [10]. Ein lineares Modell, welches auf diesen Daten basiert, ist somit ohne eine Anpassung von Parametern nur für eine Arbeitshaltung gültig.

Neben den zahlreichen Untersuchungen zur Wechselwirkung bei Anregung durch Vibration, beschäftigen sich einige wenige Forscher (beispielsweise [11] [12]) mit den entstehenden Wechselwirkungen bei einer impulsartigen Anregung. Das Hauptinteresse der Forscher liegt dabei in der Untersu-

chung und der Vermeidung von Verletzungen, wie diese beispielsweise bei einem Sturz auf die Hände auftreten. Diese Forscher verwenden oftmals sogenannte ballistische Pendel, um reproduzierbare Untersuchungsbedingungen zu schaffen. Eine pendelartig aufgehängte Masse trifft mit einer definierten Geschwindigkeit auf die ausgestreckten Arme des Probanden oder der Proband selbst pendelt mit ausgestreckten Armen gegen eine starre Wand. Die Formulierung der Antwort des Hand-Arm-Systems mittels mechanischer Impedanz, wie bei Vibrationen beschrieben, ist jedoch nicht üblich, wobei die gemessenen Parameter die gleichen sind. Es wird die Kraft an der Hand, als auch die Bewegungsgrößen der Hand gemessen. Modelle, welche zur Untersuchung von Stürzen und deren Folgen gebildet werden, sind oft kompliziert aufgebaut und eignen sich aus diesem Grund nicht für die Anwendung in Prüfständen für Geräte.

3 Modellierungsmethode

In der hier vorgestellten Untersuchung, wird die mechanische Rückwirkung des Anwenders auf eine impulsartige Anregung als Ersatzmodell nachgebildet. Das Modell muss das reale Hand-Arm-System ausreichend vereinfachen, um einen Prüfstand erstellen zu können und dabei die Wechselwirkungen zwischen Hand- Arm und Gerät ausreichend genau abbilden. Um dies zu erreichen, wird die Wirkung des Hand-Arm-Systems als linear aufgebautes Modell mit möglichst wenigen Massen, Feder- und Dämpferelementen nachgebildet. Die Bewegungsgrößen der Handschnittstelle und die Kraft zwischen Hand und Griff müssen hierfür bekannt sein. Bei Untersuchungen mit niedriger Beschleunigung und geringen Auslenkungen werden diese Größen in einem Ersatzversuch mittels Anregung durch einen Shaker ermittelt. Da es kein Anregungssystem gibt, welches mit über 4000 m/s^2 beschleunigt, kann das Bolzensetzgerät nicht substituiert werden. Eine direkte Messung der Kraft zwischen Gerätegriff und Hand ist schwierig ohne den Griff und damit das Gesamtsystem zu verändern. Kraftmessfolien, welche das Gesamtsystem nur geringfügig beeinflussen würden, sind wegen den geringen Abtastraten ungenügend. Andere Messprinzipien, wie beispielsweise das Einbringen einer Kraftmessdose zwischen Gerät und Hand, können mit wesentlich höheren Abtastraten arbeiten. Durch die notwendige Veränderung des Griffes für die Anbringung solcher Sensoren und somit veränderten Steifigkeiten stören diese jedoch das Gesamtsystem aus Mensch und Gerät. Eine direkte Kraftmessung am Griff ist aus diesen Gründen nicht möglich. Darum ist es notwendig das Gesamtsystem, bestehend aus Rückwirkungsmodell des Menschen und Gerätemodell, zu modellieren. Sind alle Parameter des Gerätemodells bekannt, so ist auch die Anregung des Hand-Arm-Systems vollständig bekannt. Die zentrale Idee ist, die Bewegungsgrößen des Gerätes zu messen, um hie-

raus auf die Wirkung des Anwenders rückschließen zu können. Eine Veränderung der mechanischen Wirkung auf das Gerät führt zu Veränderungen in der beobachteten Gerätebewegung. Verantwortlich für diese Veränderung ist beispielsweise der Anwender selbst, seine Arbeitsposition oder die Kraft mit der er das Gerät über den Griff auf den Boden anpresst. Diese Kraft, im folgenden Anpresskraft genannte, führt zu einer Vorspannung der Armmuskulatur und somit zur veränderten Rückwirkung des Armes. Die Bewegungsgrößen werden über ein einflussfreies Motion-Tracking-System mittels High-Speed-Kameras aufgezeichnet.

Die mechanische Wirkung des Menschen wird, wie in Bild 3 dargestellt, als lineares mechanisches Ersatzsystem nachgebildet. Es besteht aus zwei punktförmigen Massen, welche über lineare Feder- und Dämpferelemente gekoppelt sind. Die Verbindungsstelle zwischen Anwender und Gerät ist im Modell als zweistufiges Feder-/ Dämpferelement modelliert. Das ständig in Kontakt stehende Element repräsentiert die weiche Kopplung durch das Fettpolstergewebe der Hand (c_{1G}, d_{1G}). Das verzögert wirkende Element (c_{1G2}, d_{1G2}) bildet, parallelgeschaltet zum ersten, die Kopplung bei zusammengedrücktem Fettpolster der Hand und somit die Impulsleitung durch die Knochenstruktur des Handgelenkes, nach. Die Anpresskraft des Benutzers wird als eine statisch, auf die erste Masse wirkende, Kraft modelliert.

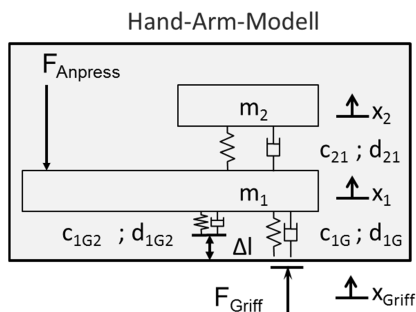


Bild 3: Struktur des Hand-Arm-Modells

$$\begin{aligned}
 F_{\text{Griff}(t)} = & (m_1 + m_2)g + m_2 \ddot{x}_2(t) + F_{\text{Anpress}(t)} + m_1 \ddot{x}_1(t) + c_{1G}(x_{1(t)} - x_{\text{Griff}(t)}) + \dots \\
 & + d_{1G}(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_{\text{Griff}(t)}) + \begin{cases} 0; \text{für } (x_{\text{Griff}(t)} - x_{1(t)}) < \Delta l \\ c_{1G2}(x_{1(t)} - x_{\text{Griff}(t)}) + d_{1G2}(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_{\text{Griff}(t)}); \text{für } (x_{\text{Griff}(t)} - x_{1(t)}) \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Die in Formel 1 beschriebene Kraft $F_{Griff(t)}$ ist für veränderte, am Gerät gemessene, Bewegungsgrößen verantwortlich. Jede Veränderung in der mechanischen Wirkung des Menschen auf das Gerät muss sich zwangsläufig in einer veränderten Kraft widerspiegeln.

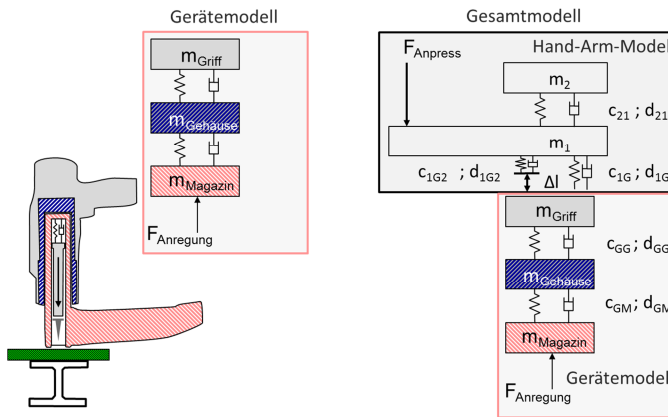


Bild 4: Geräteersatzmodell (links) und mechanisches Rückwirkungsmodell des Menschen (rechts) mit dem des Gerätes verbunden (Gesamtmodell)

Das Gerät ist in Bild 4 links schematisch und als mechanisches Ersatzmodell dargestellt. Die Massen dieses Ersatzsystems können gemessen werden. Die Konstanten der Feder-/ Dämpferelementen sind nicht bekannt und werden in einem Vorversuch durch die Beobachtung des Schwingungsverhaltens ohne Anwendereinfluss ($F_{Griff} = 0$) ermittelt. Die Kraft ($F_{Anregung}$), welche die Bewegung des Systems hervorruft, kann durch Gleichung 2 berechnet werden. Das freigeschnittene Geräteersatzmodell mit den drei Hauptmassen ist in Bild 5 dargestellt.

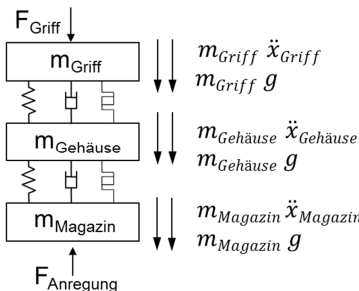


Bild 5: Freigeschnittenes Geräteersatzmodell

$$F_{Anregung(t)} = m_{Magazin} (\ddot{x}_{Magazin(t)} + g) + m_{Gehäuse} (\ddot{x}_{Gehäuse(t)} + g) + m_{Griff} (\ddot{x}_{Griff(t)} + g) \quad (2)$$

4 Messmethode und Ergebnis

Für die Bestimmung der Parameter des Geräteersatzmodells und des Hand-Arm-Modells müssen die Bewegungsgrößen der Gerätemassen bekannt sein. Der zurückgelegte Weg der Gerätemassen wurde mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera (SpeedCam MegaVis HS) der Firma Weinberger in Kombination mit der Trackingsoftware TEMA von IMAGE SYSTEMS gemessen. Die benötigten zeitlichen Ableitungen der Massenbewegungen wurden durch zweifache numerische Differentiation errechnet. Um die Daten der High-Speed-Wegmessung mit einem geeigneten Glättungsfilter aufzubereiten, wurden die errechneten Beschleunigungen mit Beschleunigungssensordaten überprüft. Die Tiefpassfilterung des Beschleunigungssignals dieser Sensoren wurde mit 3 kHz so gewählt, dass die zweifache Integration den real gemessenen Weg wiedergibt. Das verwendete Filter- und Rechenschema ist in Bild 6 dargestellt. Sowohl errechnete als auch real gemessene Beschleunigungs- und Wegmessungsdaten stimmen mit der gewählten Filtermethode gut überein. Die nicht direkt messbare Geschwindigkeit ist sowohl durch Integration der Beschleunigungsdaten als auch durch Differentiation der Wegmessungsdaten errechenbar. Die errechneten Daten stimmen auch hier gut überein.

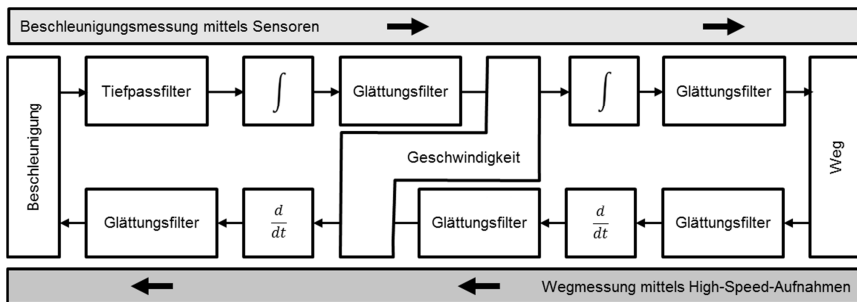


Bild 6: Verwendetes Filter und Rechenschema

Das Gerät wird für die Bestimmung der Parameter ($d_{GG}, c_{GG}, d_{GM}, c_{GM}$) freistehend auf dem Boden, durch einen pneumatischen Zylinder ausgelöst. Die Bewegungen der drei Hauptmassen beim Rücksprung werden mittels High-Speed-Kameras erfasst. Die unbekannt Parameter des Drei-Massen-Feder-Dämpfer-Systems werden in der Parameter Estimation Toolbox des Pro-

gramms MATLAB[®] durch den Abgleich der vorhergesagten Bewegungsgrößen des Gerätemodells mit den gemessenen Werten an den drei Massen iterativ ermittelt. Die berechnete Kraft ($F_{Anregung}$), welche zur Bewegung des Gerätes führt, kann nach Gleichung 2 bestimmt werden und ist in Bild 7 dargestellt. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass bei dem Verbrennungsprozess im Gerät eine Kraft von annähernd 17000 N entsteht, welche innerhalb einer Millisekunde zur Beschleunigung des Gerätes führt. Die gefundenen Geräteparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

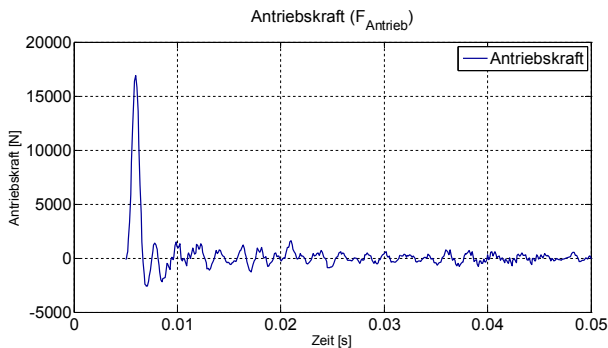


Bild 7: Antriebskraft, welche für die Gerätebewegung verantwortlich ist

Tabelle 1: Parameter des Gerätemodells

$m_{Magazin}$ [kg]	$m_{Gehäuse}$ [kg]	m_{Griff} [kg]	d_{GG} [Ns/m]	c_{GG} [N/m]	d_{GM} [Ns/m]	c_{GM} [N/m]
2,2	2,3	0,44	299,8	8E+5	630,2	5E+5

Das Ersatzmodell der mechanischen Wirkung des Menschen ist, mit dem nun vollständig bekannten, Ersatzmodell des Gerätes am Griff verknüpft. Durch die Beobachtung des Schwingungsverhaltens des Gerätes mit Anwender kann nun auf die Wirkung des menschlichen Arms in der Anwendung zurückgeschlossen werden. Auch hierbei wurden wieder die Bewegungsgrößen des Geräte-Drei-Massen-Schwingers mittels High-Speed-Tracking ermittelt. Die Parameter des Hand-Arm-Modells ($c_{21}, d_{21}, c_{1G}, d_{1G}, c_{1G2}, d_{1G2}, m_1, m_2$) wurden ebenfalls iterativ mittels der Parameter Estimation Toolbox in MATLAB[®] bestimmt. Als zu minimierende Zielfunktion dieser Optimierung, wurde die Abweichung zwischen simulierter und gemessener Geschwindigkeit der Gerätemassen genutzt.

Um den Einfluss verschiedener Anwender auf die Hand-Arm-Modell Parameter zu untersuchen, wurden Versuche mit zwei Anwendern durchgeführt. Beide Anwender pressten das Gerät mit einer Kraft von 20 N vor dem Auslösen auf den Untergrund. Trotz verschiedener körperlicher Statur der Anwender ist es möglich allein durch eine Variation der Hand-Arm-Modellmassen die mechanische Wirkung der beiden Anwender nachzubilden. Die Feder- und Dämpferkonstanten können konstant bleiben. Die Masse m_1 variiert um 0,4 kg und m_2 um 0,5 kg. Die gemessene und simulierte Geschwindigkeit von Gehäuse und Griff ist für einen Anwender exemplarisch in Bild 8 dargestellt. In beiden Grafiken wird deutlich, dass die simulierten und errechneten Geschwindigkeiten gut übereinstimmen. Die Auswirkungen einer variierten Anpresskraft von 20 N auf 100 N kann durch das Modell ebenfalls vorhergesagt werden. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass das gefundene Hand-Arm-Modell die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Hand und Griff in ausreichender guter Art und Weise vorhersagen kann.

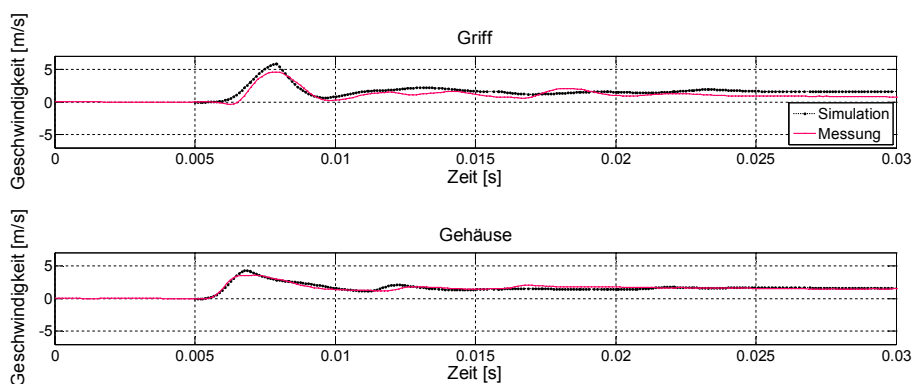


Bild 8: Vergleich zwischen simulierter und gemessener Gerätegeschwindigkeit

5 Zusammenfassung und Ausblick

Forscher beschäftigen sich meist mit der Vorhersage und Abbildung der mechanischen Wechselwirkungen bei niedrigen Auslenkungen und Beschleunigungen. Es sind keine Studien bekannt in denen die Rückwirkung des Hand-Arm-Systems auf Geräte mit hohen Beschleunigungen, welche zu großen Auslenkungen führen, wie diese bei Bolzensetzgeräten auftreten, untersucht werden. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die prinzipielle Struktur mit Punktmassenschwinger von Modellen für kleine Beschleunigungen auch für große Beschleunigungen verwendet werden kann. Mit der hier vorgestellten Methode konnte weiter gezeigt werden, dass durch die Modellierung des

Gesamtsystems aus Anwender und Gerät, die Messung der Kraft zwischen Hand und Griff entfallen kann. Durch die Beibehaltung des Gesamtsystems in der Simulation können außerdem potentiell störende Effekte, welche bei Ersatzanregungssystemen auftreten können, vermieden werden.

In weiteren Studien sollen die Auswirkungen verschiedener Arbeitspositionen und mehrerer Anwender auf die gefundenen Parameter des Hand-Arm-Modells untersucht werden. Das gefundene Modell ist bislang nur in Hauptrückstoßrichtung zum Menschen wirkungsäquivalent. Nachfolgende Studien sollen die Wirkung quer zu dieser Richtung sowie die Drehung um das Handgelenk berücksichtigt. Wünschenswert wäre ein biologisch motiviertes Hand-Arm-Modell, welches bei hohen Beschleunigungen in allen Arbeitspositionen wirkungsäquivalent zum Menschen ist.

Literatur

- [1] Byström, B.-O.; Nilsson, A. and Olsson, E.: "Development of artificial hands for use in chain saw vibration measurement," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 82, pp. 111-117, 1982.
- [2] Hansson, J.-E. and Kihlberg, S.: "A test rig for the measurement of vibration in hand-held power tools," *Applied Ergonomics*, vol. 14, pp. 11-18, 1983.
- [3] Cronjäger, L.; Jahn, R.; and Riederer, H.: "Entwicklung eines Versuchsstandes zur reproduzierbaren Messung der Vibration schlagender handgeführter Maschinen," Westdeutscher Verlag, Opladen, 1984.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3831, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2006.
- [5] Dong, R. G.; Rakheja, S.; Schopper, A. W.; Han, B. and Smutz, W. P.: "Hand-transmitted vibration and biodynamic response of the human hand-arm: A critical review," *Critical reviews in biomedical engineering*, vol. 29, pp. 393-439, 2001.
- [6] Rakheja, S.; Wu, J.; Dong, R. and Schopper, A.: "A COMPARISON OF BIODYNAMIC MODELS OF THE HUMAN HAND-ARM SYSTEM FOR APPLICATIONS TO HAND-HELD POWER TOOLS," *Journal of Sound and*

Vibration, pp. 55-82, 2002.

- [7] Marcotte, P.; Boutin, J. and Jasinski, J.: "Development of a hand–arm mechanical analogue for evaluating chipping hammer vibration emission values," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, pp. 1968-1980, 2010.
- [8] Marcotte, P.; Aldien, Y.; Boileau, P.-É.; Rakheja, S. and Boutin, J.: "Effect of handle size and hand–handle contact force on the biodynamic response of the hand–arm system under zh-axis vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 283, pp. 1071-1091, 2005.
- [9] Rakheja, S.; Gurram, R. and Gouw, G. J.: "Development of linear and nonlinear hand-arm vibration models using optimization and linearization techniques," *Journal of Biomechanics*, vol. 26, pp. 1253-1260, 1993.
- [10] Keppler, V.: "Biomechanische Modellbildung zur Simulation zweier Mensch-Maschinen-Schnittstellen," Eberhard-Karls-Universität, Tübingen, 2003.
- [11] DeGoede, K. M.; Ashton-Miller, J. A.; Schultz, A. B. and Alexander, N. B.: "Biomechanical factors affecting the peak hand reaction force during the bimanual arrest of a moving mass," *Journal of biomechanical engineering*, vol. 124, pp. 107-112, 2002.
- [12] Burkhart, T. A. and Andrew, D. M.: "Activation level of extensor carpi ulnaris affects wrist and elbow acceleration responses following simulated forward falls," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 20, pp. 1203-1210, 2010.

Numerische Untersuchung der Einflüsse von Streuungen auf Versagenskriterien von Composite Strukturen

Markus Kellermeyer¹ und Sandro Wartzack²

(1) CADFEM GmbH;

(2) Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg

Abstract: The following paper gives an overview for methods used for robustness evaluation of failure criterias of composite structures. Due to the scatter of the input parameters that is given by nature - such as the fiber angles - failure criterias are subjected to scatter, too. The paper shows the methods used for the robustness evaluation, the prerequisites to a numerical model and how such a workflow can be set up in a parametric environment. The focus will be on the failure criterias "Max. Stress", "Tsai-Hill" and "Puck". With a benchmark, relations between the parameters are shown.

1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe gewinnen angesichts der heutigen Anforderungen an Gewicht und der damit verbundenen Kosten immer mehr an Bedeutung. Dabei helfen ihre Eigenschaften der deutlich höheren Festigkeiten und Steifigkeiten bei gleichzeitig geringerem Gewicht die Herausforderung anzugehen. Unterschiedliche Materialeigenschaften in unterschiedliche Richtungen erlauben es dem Ingenieur, das Design optimal auf Belastungsfälle abzustimmen. Allerdings darf an Faktoren wie Sicherheit und Zuverlässigkeit nicht gespart werden. Versagen solcher Werkstoffe ist

zwar mathematisch definierbar, jedoch angesichts der teils schwer kontrollierbaren auftretenden Streuungen u.a. durch die Produktionsprozesse oder auftretenden Belastungen schwer greifbar. Besonders bei hart an die Grenze optimierten Bauteilen kann dies zu hohen Ausfallwahrscheinlichkeiten führen. Eine Bewertung dieser Streuungen bereits in der Vorentwicklung ist daher notwendig, um vor der Produktion diese Einflüsse erkennen und entsprechend darauf reagieren zu können. Dazu eignen sich aus Kostengründen numerische Simulationen. Variablen wie Schichtanzahl, Faserwinkel, Schichtreihenfolge und Schichtdicken lassen sich variabel definieren und liefern nach der Berechnung der entsprechenden Physikdomäne Ergebnisse zum Versagen. Techniken der Robustheitsbewertung ermöglichen eine Aussage über die Wichtigkeit der streuenden Eingangsparameter sowie der Zusammenhänge mit den Versagenskriterien.

Zur Umsetzung einer solchen numerischen Simulation ist eine batchfähige Prozesskette notwendig, um automatisiert eine definierte Anzahl an Berechnungen durchzuführen. Eine leistungsfähige Plattform muss dafür eine durchgängige und lückenlose Parametrisierung in allen Bereichen anbieten sowie die Bandbreite der geforderten Physikdomänen abbilden und verknüpfen können.

Für die Robustheitsbewertung werden die vordefinierten Parameter in gegebenen Grenzen mit Hilfe einer Sampling Methode variiert. Diese ist der in der Realität auftretenden Streuung entsprechend ausgelegt. Als Ergebnis werden über die berechneten Ausgangsgrößen Wahrscheinlichkeitsfunktionen gefittet und anschließend deren Sigma-Level sowie die größten Einflüsse durch die Inputparameter abgeschätzt. Sie liefern eine Aussage über die Sicherheit des Produkts.

2 Verwendete Methoden der Robustheitsbewertung

Samplingmethoden bilden die Basis für eine Robustheitsbewertung. Zum Einsatz kommen hier zumeist die Methoden Plain Monte Carlo (PMC) oder Latin Hypercube Sampling (LHS), welche entsprechend definierten Verteilungsfunktionen aufgebaut werden. Diese erzeugen Samples, welche Ergebnisse liefern, die mit statistischen Mitteln auf Korrelationen untersucht werden und Maße wie Mittelwerte und Variationskoeffizienten für die Bewertung liefern.

Die Berechnung der Samples ist je nach Modellgröße der zeitaufwändigste Anteil. Deswegen wird bei deren Ermittlung häufig auf Antwortflächenmodelle zurückgegriffen, welchen eine geringere Anzahl an berechneten

Samples zugrunde liegt. V.a. aber in nichtlinearen Aufgabenstellungen ist dies sehr gefährlich, da die Qualität dieser ‚Softdesigns‘ maßgeblich von der Qualität der Antwortflächen abhängig ist. Dies kann zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Aus diesem Grund wird bei dieser Betrachtung mit ‚Harddesigns‘ gerechnet – also mit den Ergebnissen, welche tatsächlich aus der numerischen Simulation resultieren.

Bei der Auswertung wird darauf geachtet, ob die Variationskoeffizienten der Ausgangsgrößen zu groß werden, die Mittelwerte zu nah am kritischen Versagensbereich liegen, aber auch ob plötzliche Änderungen bei den Antwortgrößen auftreten. Die für diese unerwünschten Effekte verantwortlichen streuenden Eingangsgrößen werden durch die Korrelationen ermittelt.

Um die Prognosefähigkeit des Modells zu validieren, wird mit dem „Coefficient of Prognosis“ (CoP) gearbeitet. Hierbei werden die Samples in ein Set für die Erstellung des Metamodells und in ein Set zum Testen dieses Metamodells unterteilt. Dies geschieht mehrmals in jeweils anderer Aufteilung, so dass letztlich jedes Sample für die Erstellung des Metamodells und zur Bestimmung der Prognosefähigkeit verwendet wird [6]. Sollte der CoP niedrig sein, wäre dies ein Indiz dafür, dass entweder die Anzahl der berechneten Samples noch zu niedrig ist, oder dass z.B. Effekte wie Netzrauschen die Prognosefähigkeit vermindern. Auf beides kann dann durch mehr Samples bzw. feinerer Netzauflösung reagiert werden.

Eine Bewertung macht bei dieser Art der Robustheitsbewertung im 2-Sigma Bereich (evtl. 3-Sigma Bereich) Sinn. Sollen Aussagen im höheren Sigtabereich getroffen werden, so sind weitere Techniken der Zuverlässigkeitsanalyse notwendig, was in dieser Betrachtung allerdings noch außen vorgelassen wird.

3 Samplingmethoden

Alles Nächstes sollen die in Kapitel 2 erwähnten Samplingmethoden nochmal genauer erläutert werden. Quellen sind hierbei [3], [4], [5] und [6]. Das Plain Monte Carlo Sampling benutzt einen stochastischen Compiler. Dabei werden N unabhängige Nummern u_i , $i=1,2,\dots,N$ in einem gleichmäßigen Intervall $[0,1]$ erstellt. Diese werden anschließend über die Inverse der kumulativen Verteilungsfunktion in einen beliebigen Verteilungsfunktionstyp übertragen:

$$x_i = F_X^{-1}(u_i)$$

Das Latin Hypercube Sampling ist eine Erweiterung des Plain Monte Carlo Samplings und hat zum Ziel, die Anzahl der notwendigen Samples zu reduzieren. Hierbei wird zunächst der Wertebereich einer Verteilung in N sich nicht überlappende Klassen mit je gleichen Wahrscheinlichkeiten aufgeteilt. Aus jeder Klasse wird eine kumulative Wahrscheinlichkeit gepickt und über die Inverse der kumulativen Wahrscheinlichkeit in einen neuen Raum transformiert. Diese Werte einer jeden Variablen werden mit den Werten der anderen Variablen zufällig gepaart. Damit wird eine vollständige Abdeckung des Wertebereichs einer jeden Variablen sichergestellt. Um störende lineare Korrelationen zu vermeiden, wird noch eine ‚Cholesky Decomposition‘ verwendet. Benötigt werden dafür mindestens so viele Samples wie streuende Parameter vorliegen.

4 Versagenskriterien

Die Wahl der zu vergleichenden Versagenskriterien fiel auf Puck, max. Spannung sowie Tsai-Hill. Entscheidend war hierfür die Häufigkeit der Verwendung in der Praxis. (Quelle: [1] und Diskussionsrunde auf der NAFEMS Konferenz: "Berechnung und Simulation - Anwendungen, Entwicklungen, Trends", 8. - 9. Mai 2012,)

Im Folgenden sollen sie genauer beschrieben werden.

Max. Spannung:

$$\frac{\sigma_{11}}{X} = 1; \quad \frac{\sigma_{22}}{Y} = 1; \quad \frac{\tau_{12}}{S} = 1$$

Ein Versagen wird eintreten, wenn eine der drei Spannungskomponenten den entsprechenden Grenzwert in diese Richtung überschreitet. Wichtig ist festzuhalten, dass die 3 Spannungskomponenten unabhängig voneinander betrachtet werden. Tritt eine hohe Spannung in eine Richtung auf, wird sie bei dieser Betrachtung keinen Einfluss auf eine der beiden anderen Komponenten haben. [1]

Tsai-Hill:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)\left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1$$

Bei Tsai-Hill wird die Interaktion zwischen den Versagensmoden berücksichtigt. Dafür sorgt der Term $\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)\left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)$

Puck:

$$\frac{\sigma_{11}}{X_f} = 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_m}\right)^2 - \frac{1}{3} \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X_m Y_m} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_i}\right)^2 = 1$$

$$\frac{\sigma_{22}}{Y_i} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_i}\right)^2 = 1$$

Das Puck Kriterium bildet die Physik ab, welche der tatsächlichen Versagensart zugrunde liegt. Es wird ein Teilkriterium für den Faserbruch und eines für den Zwischenfaserbruch (zwischen Matrix und Faser) verwendet. [7]

5 Voraussetzungen eines numerischen Modells

Damit eine sinnvolle Robustheitsbewertung gelingen kann, sollten numerisch unerwünschte Nebeneffekte wie z.B. Netzrauschen minimiert werden. Dazu wird der in Kapitel 2 angesprochene CoP verwendet. Auch verfälschende Lockingeffekte sollten weitestgehend ausgeschlossen werden können. Dies geschieht durch eine geeignete Elementwahl und Wahl der Randbedingungen [8]. Das Ergebnis zum CoP wird in Kapitel 8 aufgegriffen.

6 Benchmark und Parametrisierung

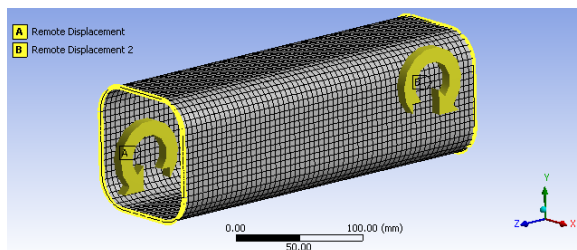


Bild 1: Belastungsfall

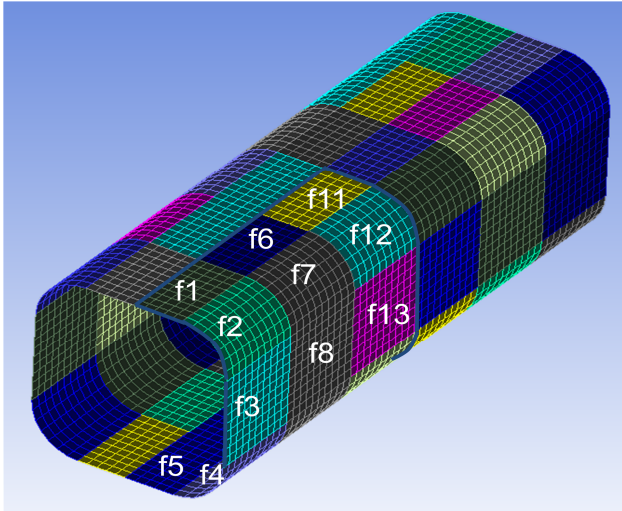


Bild 2: Bereichsunterteilung für die Auswertung

Für die Untersuchung wird das in Bild 1 gezeigte Schalenmodell verwendet. Es beinhaltet ebene sowie gekrümmte Zonen. Die Diskretisierung wurde so angepasst, dass numerisches Rauschen möglichst unterbunden wurde. Die Belastung und Lagerung wurde symmetrisch gewählt (um die x-y-Ebene und um die y-z-Ebene), um die Betrachtung der Ergebnisse auf ein Viertel des Modells zu beschränken. Bei der gewählten Lagerung und Belastung sind keine ergebnisverfälschenden Lockingeffekte zu erwarten. Es wurden Schalenelemente mit 6 Freiheitsgraden pro Knoten gewählt, geeignet für Anwendungen mit großen Rotationen und großen Verzerrungen. Auch die Änderung der Schalendicke bei entsprechender Belastung wird berücksichtigt. Der Schalentyp erlaubt den Aufbau geschichteter Strukturen und arbeitet nach der Reissner-Mindlin Theorie. Die Faserwinkel im Stackup wurden parametrisiert definiert. Die ideale Ausrichtung der Fasern geschah entsprechend der Belastung. Eine Aufteilung in Zonen wie in Bild 2 dargestellt erlaubt die Bewertung unterschiedlicher Orte. Durch das Beschränken auf diese Bereiche werden die Ergebnisse verständlicher und besser zuordbar. Nach der Berechnung wurden Versagenskriterien in den Layern der Elemente ausgewertet und anschließend die Extremwerte einer jeden Zone ermittelt. Diese bilden die Ausgangsparameter.

7 Beschreibung der Prozesskette

Für die in Kapitel 1 genannten Voraussetzungen wurde eine Prozesskette in ANSYS Workbench, ANSYS Composite Prepost (ACP) und optiSLang aufgebaut (Bild3). Dabei erfüllen die Tools in der Kette folgende Funktionen:

- ANSYS Workbench:
 - Bereitstellen des Solvers für die Physikdomäne
 - Diskretisierung
 - Definition der Randbedingungen
- ANSYS Composite Prepost:
 - Wahl des Lagenaufbaus (Anzahl der Layer, Layerdicken, Layerreihenfolge, Faserwinkel) basierend auf der in ANSYS Workbench gewählten Diskretisierung
 - Definition des Materials und der Versagensgrenzen
 - Festlegen der Versagenskriterien für die Auswertung
- optiSLang:
 - Definition der Eingangsstreuungen
 - Erstellung des erforderlichen Samplings
 - Verknüpfung der Prozesse
 - Robustheitsbewertung

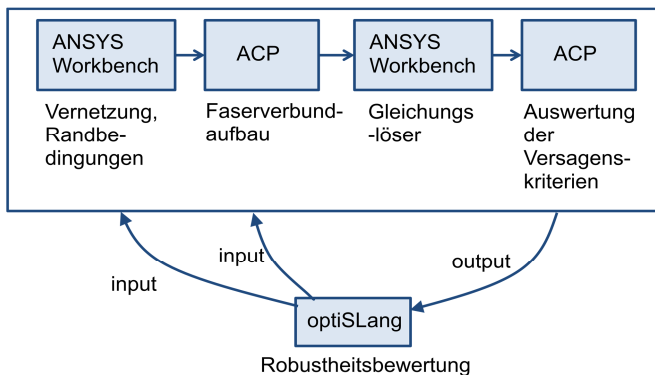


Bild 3: Ablaufschema der Prozesskette

8 Ablauf und Ergebnisse

Nach Wahl der Eingangsstreuungen nach Tabelle 1 wird ein mehrdimensionales Latin Hypercube Sampling gemäß [3] erstellt. Bild 4 zeigt exemplarisch den Anthill Plot zwischen den streuenden Winkeln von Layer1 und Layer2. Tabelle 1 zeigt den Aufbau des Stackups.

Tabelle 1: Aufbau des Stackups

Layer	Winkel - Mittelwert	Verteilung	Standardabweichung
Layer 1	0°	Normal	5
Layer 2	45°	Normal	5
Layer 3	135°	Normal	5
Layer 4	90°	Normal	5
Layer 5	135°	Normal	5
Layer 6	45°	Normal	5
Layer 7	0°	Normal	5

Nach Berechnung von 100 Samples wird über den „Coefficient of Prognosis“ die Prognosefähigkeit der Ausgangsgrößen bewertet. Dabei zeigt sich, dass alle Versagenskriterien in allen Bereichen eine gute Prognosefähigkeit besitzen. Dies ist nochmal in Tabelle 2 exemplarisch für das Puck Kriterium zusammengefasst.

Tabelle 2: Prognosefähigkeit des Puck-Kriteriums

Zone	Prognosefähigkeit (CoP)
Zone 1-5	85% 63% 79% 86% 86%
Zone 6-10	82% 79% 80% 91% 91%
Layer 11-15	88% 84% 65% 93% 93%



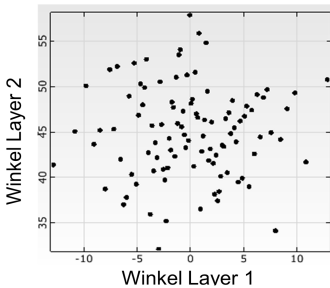


Bild 4: Anthillplot Eingangsparemeter - Eingangsparemeter

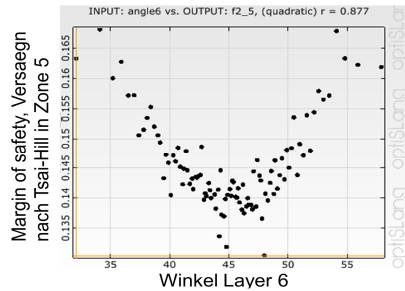


Bild 5: Anthillplot Eingangsparemeter - Ausgangsparemeter

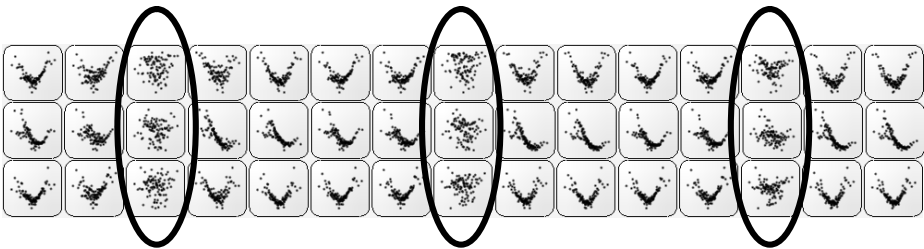


Bild 6: Anthillplots für Winkel 6 vs. Versagen nach Puck (Spalte1), Tsai-Hill (Spalte2) und max. Spannung (Spalte3) in den Zonen 1-15

Erkenntnisse:

- Puck weist zu den Versagenskriterien „Tsai-Hill“ und „Max. Spannung“ keine ersichtlichen Korrelationen auf.
- Die Ergebnisse von „Tsai-Hill“ und „Max. Spannung“ korrelieren linear sehr stark.
- Die Korrelationen zwischen den Faserwinkeln und Versagenskriterien sind teilweise quadratisch.
- Bei Puck kann beobachtet werden, dass der Scheitelpunkt der quadratischen Korrelation versetzt zum Mittelwert liegt. Bei Tsai-Hill und Max. Stress liegt dieser genau im Mittelwert
- Layer 6 (45°) zeigt starke quadratische Korrelationen für horizontalen und gekrümmten Bereiche. Für die vertikalen Bereiche lassen sich

-
- kaum Korrelationen erkennen (Bild 6)
- Der Variationskoeffizient ist bei Puck sehr viel höher als bei „Tsai-Hill“
und „Max. Spannung“.

Literatur

- [1] Schürmann, Helmut: „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2005, 2007
- [2] Sun, C. T., Quinn, B. J., Tao, J., and Oplinger, D. W., "Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates" DOT/FAA/AR-95/109, 1996
- [3] McKay, M., Beckman, R. & Conover, W.: "A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code", Technometrics, 1979
- [4] Will, J.: "optiSLang – the optimizing Structural Language", optiSLang help, 2012.
- [5] Bucher, C.: "Computational Analysis of Randomness in Structural Mechanics", CRC. Press, 2009
- [6] www.dynardo.de, Seminar: Robustheitsbewertung und Robust Design Optimierung mit optiSLang
- [7] www.cadfem.de, Präsenz-Seminar: Simulation von Composites mit ANSYS Composite PrepPost
- [8] www.ansys.com, ANSYS V14.0 Hilfe, 2012
- [9] www.even-ag.ch, ANSYS Composite PrePost V14.0 Hilfe, 2012

Untersuchungen von varianten Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten

Olaf Rasmussen, Benedikt Plaumann und Dieter Krause
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)
Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)

In this paper new research approaches based upon the opportunities of a new unique testing rig are presented. The Hexapod test rig at the TUHH enables researchers to excite large test specimens of for example aircraft cabin interiors under various transient and stationary periodic dynamic loads in all six degrees of freedom. The research projects treat the lack of dynamic parameters of material and structure behavior for better simulation based predictions in dimensioning of these lightweight products. Also the aspect of different product variants in dimensioning is targeted. As of great importance for such experimental parameter determination, the experimental design with the adoptions necessary in practice and their influence on the outcome are a research topic.

1 Eine neue Prüfanlage für Versuche unter dynamischen Lasten

Im Jahr 2008 hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) einen gemeinsamen Großgeräteantrag des *Instituts für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe*, des *Instituts für Zuverlässigkeitstechnik* sowie des *Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik* bewilligt. Hierbei wurde eine neuartige Großprüfanlage für Versuche mit Leichtbaustrukturen gefördert, die durch mehrachsige Prüfungen großer Bauteile dazu beiträgt, die Wissenslücke zwischen kleinskaligen Materialversuchen im Labor und realen Bauteilen zu schließen. Im Januar 2012 erfolgte dann die Übergabe des Prüfstandes inkl. neuer Prüfhalle an die beteiligten Institute. Der servohydraulische Prüfstand

weist eine Hexapod-Kinematik auf, so dass bei höchstmöglicher Steifigkeit Bewegungen in allen sechs Raumrichtungen realisiert werden können. Die sechs hydrostatisch gelagerten Gleichgangzylinder erlauben im Zusammenspiel mit einer Zentralhydraulik, welche 750 l/min bei bis zu 300 bar liefert, Verfahrensgeschwindigkeiten von bis zu 1m/s sowie Kräfte von bis zu 500kN (vertikal) bzw. 200kN (horizontal). Durch die Verwendung eines neuartigen iterativen Reglersystems ist es möglich, Schwingfrequenzen von bis zu 30Hz mit hoher Präzision zu fahren. Das System ermittelt hierbei die Übertragungsfunktion des Prüfstandes inkl. Prüfaufbau anhand der vorgegebenen Anregungssignale und optimiert für den jeweils nächsten Durchgang die Stellgrößen. Um hierbei eine optimale Entkopplung der Prüfstandsschwingungen vom Gebäude zu erreichen, steht der Hexapod auf einem 350 Tonnen schweren Schwingfundament, welches seinerseits über 14 Luftfedern gelagert ist. Aufgrund des in Bild 1 ersichtlichen geometrischen Aufbaus verfügt der Prüfstand über zwei separate Prüfräume, die für unterschiedliche Arten von Versuchen verwendet werden können. Zum einen lassen sich unterhalb der ringförmigen Plattform Testobjekte zwischen Hexapod und Fundament verspannen. Die hohe Steifigkeit des Prüfstands und die hohen erzeugbaren Kräfte erlauben hier beispielsweise quasistatische und dynamische Versuche an hochfesten CFK-Bauteilen. Im oberen Prüfraum (oberhalb der Plattform) ist Platz, um beispielsweise – wie in Bild 1 dargestellt – große räumliche Leichtbaustrukturen unter realitätsnahen Schwingbelastungen zu testen.



Bild 1: Hexapod-Prüfanlage mit vollbestückter Flugzeugbordküche

2 Problemstellung und Untersuchungsfokus

Bei der Auslegung von Kabineninterieur sind unter anderem dynamische Lasten zu berücksichtigen; diese haben mehrere verschiedene Ursachen. Neben den Lasten aus Flugmanövern und Turbulenzen gibt es auch noch Bedin-



gungen, bis zu denen bei einer Notlandung ein Losreißen der Kabinenmonumente nicht stattfinden darf. In beiden Fällen zeigt sich ein transientes Belastungsprofil. In diesem Artikel wird allerdings näher auf periodisch-stationäre Lasten eingegangen, siehe Bild 2.

Belastung	Belastungsart
Flug (Manöver und extreme Turbulenzen)	dynamisch, transient bis annähernd statisch
Emergency Landing	dynamisch, transient
Turbine Blade Loss Windmilling	dynamisch, periodisch
Externe Erregung (Luft und Boden, z.B. Unebenheiten bei Start und Landung)	dynamisch, transient bis periodisch

Sicherheit

Komfort

Bild 2: Dynamische Belastungen von Flugzeugkabinenmonumenten.

Diese können auftreten, wenn Teile von Turbinenschaufeln eines Strahltriebwerkes verloren gehen und die resultierende Unwucht eine Schwingeregung verursacht. Zwar kann der Pilot das Triebwerk abschalten, allerdings wird das Schaufelrad weiter durch die einströmende Luft angetrieben. Dieser Fall wird als Sustained Engine Imbalance (SEI) oder Turbine Blade Loss Windmilling bezeichnet und stellt in der Auslegung einen sicherheitskritischen Fall dar, welcher per Nachweis abgesichert werden muss. Ein komfortgetriebener Auslegungsfall ist die Schwinganregung, welche durch Unebenheiten der Start- und Landebahn beim Beschleunigen des Flugzeugs am Boden verursacht werden. Hierbei sollten z.B. Monitorbefestigungen nicht allzu stark schwingen, um den Passagierkomfort gerade bei Passagieren mit Flugangst zu erhöhen.

2.1 Leichtbau durch detailliertere mechanische Analyse mit exakteren Modellen

Soll eine Konstruktion im Leichtbau optimal ausgenutzt werden, so sind bei der Auslegung exakte Modelle zur Prognose des Verhaltens sehr hilfreich. Es kann häufig auf viele iterative Tests für das „Herantasten“ im Trial-and-Error-Verfahren an eine ideale Lösung verzichtet werden. Allerdings sind Versuche zu Beginn der Auslegung zum grundlegenden Verhalten und zum Nachweis am Ende notwendig. Aber die iterationsreichen Zwischenschritte werden so in die virtuelle Produktentwicklung verlagert. Wie ein solcher rechnerischer Nachweis einer detaillierten mechanischen Analyse für den Leichtbau aussehen kann, findet sich in [1].

Hinsichtlich des hier vorgestellten Anwendungsfalls von Flugzeugkabinenmonumenten, welcher aus ökonomischen und ökologischen Gründen stark leichtbaugetrieben ist, kann folgendes beobachtet werden: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen der dynamischen Lasten sind zwar sicherlich im Detail für zu identifizierende besonders kritische Kleinkomponenten zu führen. Für komplette größere zusammengesetzte Strukturen, wie beispielsweise Flugzeugbordküchen, ist dies aber praktisch kaum möglich, schon allein wegen der benötigten Prüflingszahl für aussagekräftige Statistiken. So gewinnt bei der Betrachtung größerer Strukturen das grundsätzliche Schwingverhalten deutlich an Wichtigkeit. Erst wenn zuvor das Schwingverhalten mit etwaigen Resonanzphänomenen identifiziert wurde, kann eine Aussage zu besonders beanspruchten Stellen der Konstruktion getroffen werden. Resonanzverstärkungen können Beanspruchungen lokal um ein Vielfaches vergrößern.

Ein Lösungsansatz ist der, dass man die Steifigkeit des Systems so stark erhöht, dass Resonanzfrequenzen erst außerhalb von (bekannten) kritischen Anregungen liegen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine Erhöhung der Steifigkeit häufig auch eine Erhöhung der Masse mit sich bringt. Erhöht sich die Masse im gleichen Maße wie die Steifigkeit, bleibt die Resonanzfrequenz allerdings gleich. So muss bei diesem Lösungsansatz die Steifigkeit deutlich mehr erhöht werden, als zusätzliche Masse hinzugefügt wird. Dieser Vorgang muss dann soweit getrieben werden, dass hinreichend mehr Steifigkeit als Masse hinzugefügt wurde – was unter Leichtbaugesichtspunkten äußerst nachteilig ist. Aus Mangel an genauen Kenntnissen zum Verstärkungsverhalten im Resonanzbereich wird dieses Vorgehen aber leider häufig angewandt, auch bei Flugzeugkabinenmonumenten.

Die andere Alternative setzt eine hinreichend genaue Kenntnis des Verstärkungsverhaltens im Resonanzbereich voraus. Dazu wird insbesondere der Parameter der kritischen Dämpfungsrate oder auch „Lehr'sches Dämpfungsmaß“ für die Berechnung benötigt. Dies ist allerdings für derartige Strukturen nicht bekannt. Es fehlen dabei sowohl Daten zum grundsätzlichen Materialverhalten bei den vorliegenden Anregungen und dem Einfluss von Anbindungen und Verbindungsfugen bei größeren zusammengesetzten Monumenten. Selbst wenn globale Tests eine globale Dämpfungsrate für die relevanten Resonanzen eines speziellen Monuments mit einer speziellen Konfiguration ergeben, so ist dennoch interessant, wie sich andere Varianten desselben Monuments diesbezüglich verhalten. Ist allerdings das Schwingverhalten im Resonanzbereich bekannt, so können detaillierte Berechnungen zeigen, ob die Resonanzfrequenz bei den vorkommenden Anregungen überhaupt zu kritischen Situationen führt. Stark belastete Teile der Konstruktion können mit diesen Erkenntnissen entsprechend ausgelegt werden.

2.2 Auswirkungen von varianten Produktstrukturen auf die Auslegung

Allerdings bleibt weiterhin das Problem der Varianten in der Auslegung. Wenn der Worst-Case-Fall von Kombinationen der Anforderungen nicht klar und einfach vorab definierbar ist, entstehen weitere Iterationen in der Auslegung.

Die denkbar ungünstigste Lösung ist es, wenn jede Variante Auslegung und Nachweis vollständig durchlaufen muss. Bei den hier vorgestellten Kabinenmonumenten wäre ein solches Vorgehen zudem in der Realität extrem teuer. So sind beim Projektpartner Diehl Service Modules produzierte Flugzeugbordküchen so stark individualisiert, dass nur selten mehrere Stück einer Variante gebaut werden. Ein völlig unabhängiger Nachweis mit diversen Nachweistests zur Sicherheit würde bedeuten, dass jede ausgelieferte Küchenvariante alle Sicherheitstests in Realität durchläuft. Das würde ein Vielfaches an produzierten Exemplaren pro Variante bedeuten. In der Praxis wird dieses durch konservative Ähnlichkeitsanalysen mit Worst-Case-Identifikation und starken Vereinfachungen so weit simplifiziert, dass Tests ausgewählter Exemplare für mehrere Varianten gelten. Um hierbei noch genügend Sicherheit zu gewährleisten, werden häufig hohe Zuschläge verwendet. Dies gilt insbesondere für die Auslegung bei dynamischen Lasten.

Der durch Varianten bei ungünstiger Auslegung bedingte Mehraufwand in der Entwicklung durch zahlreiche zusätzliche Auslegungsiterationen stellt insbesondere im Leichtbau ein Problem dar. So liegt beim Fehlen von präzisen Prognosen aus Berechnungen die Versuchung nahe, aus Zeitgründen auf eine intensive Optimierung zu verzichten und Entwicklungen einfach mit hohen Zuschlägen zu versehen, die garantiert unproblematisch in der weiteren Auslegung und dem anschließenden Nachweis sind.

Als einfaches Beispiel für die Auswirkungen von Variantenvielfalt seien die oberen Anbindungen einer Flugzeugbordküche an die Primärstruktur aufgeführt, siehe Bild 3. Bei der Leichtbau-Auslegung (siehe auch [2]) sind 32 verschiedene Lastfälle gegeben, 15 verschiedene äußere Geometrien sind auf Grund von Schnittstellenpositionen notwendig und 10 auslegungsinterne Materialvariationen sind im vorliegenden Fall betrachtet worden. Dies führt ohne weitere Einschränkung zu 4800 verschiedenen Simulationen, die für die Auslegung durchgeführt werden müssten. Dabei werden hier aus Gründen der Einfachheit des Beispiels nur quasi-statische Lastfälle aufgeführt. Das grundsätzliche Problem der „Variational Complexity“ wird beispielsweise in [3] im Kontext von Komplexitätsmanagement näher behandelt.

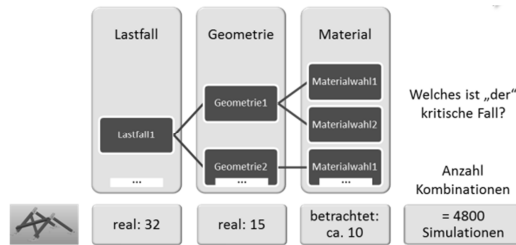


Bild 3: Theoretische Simulationen in Auslegungsiterationen am Beispiel eines Upper Attachments.

2.3 Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen

Den auf dem Hexapod durchgeführten Versuchen unter dynamischen Lasten gehen diverse Untersuchungsreihen von Kabineninterieur und einfachen Sandwichplatten auf Ein-Achs-Shakern am Institut PKT voraus. Es konnten weiterhin erste Vorversuche mit einer Flugzeughordküche der Firma Diehl Service Modules GmbH (ehemals Mühlenberg) durchgeführt werden, siehe Bild 1. Die Bordküche wurde in mehreren Beladungskonfigurationen dynamischen Gleitsinus-Anregungen bei Befestigung an den vorgesehen oberen und unteren Anbindungen ausgesetzt. Die Kräfte an den neun Anbindungsschnittstellen und die Beschleunigungen an verschiedenen Messpunkten wurden jeweils in drei translatorischen Freiheitsgraden aufgenommen. Die Gleitsinus-Frequenzgänge wiesen eine gleichmäßige konstante maximale Beschleunigungsamplitude auf. Mehrere maximale Beschleunigungslevel wurden für alle Beladungskonfigurationen durchgeführt. Die Gleitsinus-Frequenzgänge wurden von 3 bis 25Hz gefahren. Der Anstieg der Anregungsfrequenz betrug $\frac{1}{2}$ Oktave pro Minute; ein kompletter Durchlauf dauerte also ca. 6 Minuten. Aufgrund der Verwendung des bereits in Kapitel 1 erwähnten iterativen Reglers gingen jedem Messlauf drei Iterationsläufe (mit steigender Amplitude) voraus.

3 Ansätze zur Verbesserung der Auslegung von varianten Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten

Im Folgenden werden zwei eng miteinander verknüpfte Forschungsvorhaben vorgestellt, die die beschriebenen Untersuchungen nutzen. Zunächst wird ein Forschungsansatz erläutert, der untersucht inwieweit bei der Versuchsdurchführung notwendige Vereinfachungen, Abstraktionen oder Ersatzkomponenten das Ergebnis beeinflussen. Der zweite Ansatz versucht auf Basis dieser Versuche durch eine Substrukturierung der beschriebenen Leichtbau-

monumente in der Untersuchung das dynamische Verhalten besser abbilden zu können, insbesondere wenn eine hohe Variantenanzahl zu berechnen ist.

3.1 Optimierte Entwicklung von Testumgebungen

Trotz der fortschreitenden Entwicklungen im Bereich der virtuellen Produktentwicklung sind Realversuche zur Validierung und Optimierung von Simulationsmodellen weiterhin unerlässlich. Bei Untersuchungen von komplexen Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten, wie sie beispielsweise im Flugzeuginterieurbereich vorkommen, sind vielfältige Anforderungen an die spezifische Testumgebung zu berücksichtigen. Obwohl es in der Literatur viele Beispiele für die Optimierung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses technischer Produkte gibt (siehe z.B. [8]), so fehlt es doch an konkreten Hinweisen, was bei der Entwicklung von dynamischen Prüfaufbauten /-szenarien zu beachten ist. Insbesondere bei dynamischen Versuchen gilt es, eine Vielzahl von Einflussfaktoren zu berücksichtigen, so dass eine Generalisierung auf den ersten Blick schwierig erscheint. Gerade hier wäre daher eine Strategie, welche den Aufwand für gesicherte Aussagen über die Eignung der Testumgebung verringert, von Vorteil. Bei den weiter verbreiteten quasistatischen Bauteiltests sind die dynamischen Eigenschaften von Anbindungs- und Belastungsstruktur hingegen nicht von Interesse, da hier andere Qualitäten, wie beispielsweise statische Steifigkeit, im Vordergrund stehen.

Durch die Entwicklung neuartiger Prüfstände, wie beispielsweise des in Kapitel 1 beschriebenen Hexapods, welche sich durch erhöhte Komplexität der durchführbaren Tests ebenso wie durch größere prüfbare Bauteile sowie ggf. mehrachsige Prüfmöglichkeiten auszeichnen, rücken die dynamischen Eigenschaften jedoch verstärkt in den Fokus. Insbesondere am Beispiel von großen, flächigen Strukturen, welche nahe ihrer Eigenfrequenz angeregt werden und bei denen die Masse der Beladung¹ in der Größenordnung der Masse der eigentlichen Struktur liegt, lässt sich erkennen, dass der Einfluss des dynamischen Verhaltens von Nicht-Prüflingskomponenten auf die Versuchsergebnisse keinesfalls zu vernachlässigen ist. Ebenso gilt dies für Hilfs- und Anbindungsstrukturen. Sofern diese bei dynamischen Versuchen mitbewegt werden, ist eine möglichst leichte Ausführung erstrebenswert. Gleichzeitig ergibt sich daraus und aus der teilweise benötigten großen räumlichen Aus-

¹ Als Beladung werden hier (oftmals stark variante) Komponenten betrachtet, die nicht zur Struktur eines Bauteils zählen, aber zur statischen und dynamischen Belastung von Struktur und Anbindung beitragen (vgl. Bild 4).

dehnung dieser Strukturen eine nicht zu vernachlässigende Nachgiebigkeit. Im Gegensatz zu quasistatischen Versuchen lassen sich diese Strukturen im dynamischen Fall also nicht mehr idealisiert als ideal steif betrachten bzw. ganz von der Betrachtung ausschließen. Stellt man nun parallel zu den Versuchen auch Simulationsversuche per FEM an, so werden Anbindungselemente dort üblicherweise als ideal steif betrachtet. Ebenso werden Lasten durch Beladung üblicherweise über Punktmassen abgebildet. Bei quasistatischen Versuchen lässt sich dies in guter Näherung argumentieren; bei dynamischen Versuchen mit nicht zu vernachlässigendem Einfluss von Last und Anbindung muss man aber darüber nachdenken, wie man das Zusammenspiel von Simulation und Realversuch möglichst optimal gestaltet. Es lassen sich zwei grundlegende Fälle unterscheiden:

- Die Versuchsumgebung soll möglichst gut an den ideal steifen Fall angenähert werden. Dies ergibt dann Sinn, wenn der Realversuch primär der Validierung des Simulationsmodells dient.
- Die Versuchsumgebung soll so nahe wie möglich an die realen Einsatzbedingungen des Prüflings angenähert werden. Diese Variante kommt zum Einsatz, wenn beispielsweise die Belastbarkeit eines Bauteils überprüft werden soll und eine eventuelle Simulation nur eine untergeordnete Rolle spielt.

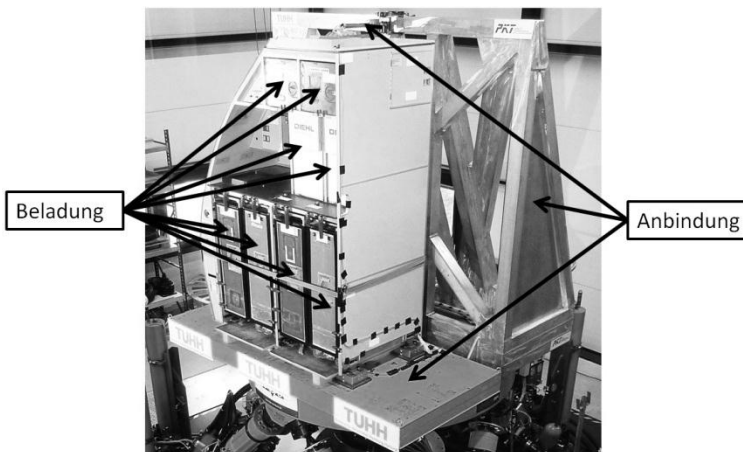


Bild 4: Galley auf Hexapod mit Beladungs- und Anbindungselementen

Somit ergeben sich auch unterschiedliche Anforderungen an die beiden betrachteten Bereiche *Beladung* und *Anbindung* (vgl. Bild 4), welche zusammen die Prüflingsumgebung bilden. Bei der Anbindungsstruktur stellt sich

primär die Frage, inwieweit diese als ideal angesehen werden kann bzw. welche Unsicherheiten bestehen, wenn versucht wird, die reale Prüflingsumgebung nachzuempfinden. Dies ist gerade bei komplizierten Umgebungsstrukturen, wie sie beispielsweise im Flugzeuginterieurbereich vorliegen, nur mit hohem Aufwand zu erreichen, da durch externe Sachzwänge wie Prüfstandsbaubereich, maximales Gewicht etc. häufig wenig Gestaltungsspielraum bleibt. Daher bietet es sich an, die Anbindung auf eine hohe Steifigkeit hin zu optimieren, da dieses Verhalten besser einschätzbar und numerisch abbildbar ist. Letztendlich muss anhand des voraussichtlichen Einflusses auf das Ergebnis noch entschieden werden, ob und in welchem Grad die Anbindung in die Simulation mit einbezogen wird.

Ist die Auslegung von Anbindungsstrukturen oftmals stark eingeschränkt, so herrscht bei der Gestaltung der Beladung eine größere Freiheit. Soll nicht die Originalbeladung verwendet werden, was oftmals aus unterschiedlichen Gründen nicht sinnvoll erscheint, so müssen Ersatzmassen herangezogen werden. Abgesehen von erforderlichen Schnittstellen zur Prüflingsstruktur sowie eventuellen Einschränkungen bezüglich der physikalischen Eigenschaften der verwendeten Ersatzkörper kann dabei oftmals aus einer Vielzahl von Alternativen gewählt werden. Möchte man eine idealisierte Abbildung der Prüflingsumgebung erzielen, so wird man versuchen, die Beladung so auszuwählen, dass sie – außer der Veränderung der globalen Eigenfrequenzen – keinen Einfluss auf das dynamische Verhalten hat. Insbesondere lokale Eigenfrequenzen von Beladungselementen sind daher ebenso zu vermeiden wie übermäßige Trägheitseinflüsse. Man wird also versuchen, dem Ideal der Punktmasse möglichst nahe zu kommen. Soll hingegen die reale Prüflingsumgebung abgebildet werden, so müssen die dynamischen Eigenschaften der realen Beladung wie Eigenfrequenzen und Dämpfungsverhalten – zumindest im interessierenden Frequenzbereich – bekannt sein, da es sonst nicht möglich ist, deren Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems einzuschätzen. Bei Verwendung einer Ersatzbeladung muss abgewogen werden, welche Abweichungen tolerierbar sind bzw. wie diese ggf. zu kompensieren sind. Auch Eigenschaften, wie Verfügbarkeit oder Handling, haben einen Einfluss auf die Beladungsauswahl. Am Beispiel der in Bild 4 gezeigten Flugzeuggalley wird ersichtlich, dass die reale Beladung – Speisen und Getränke – die teils langwierigen Versuchsreihen nicht überstehen würden, ohne für umfangreiche Hygieneprobleme zu sorgen. In Bild 5 ist gezeigt, wie eine Alternative zu einem mit Speisen gefüllten Ofen für dynamische Tests aussehen kann. Mit diesen Ersatzdummies (Holzboxen, welche mit Papierblöcken und Wasserflaschen gefüllt wurden) wurden beispielsweise umfangreiche Windmillingversuche an der in Bild 4 dargestellten Flugzeuggalley durchgeführt. Auch die an-

deren Beladungselemente der Galley wurden mittels Papierblöcken und Wasserflaschen belastet.



Bild 5: Mit Wasserflaschen befüllte hölzerne Dummies als Ersatz für Öfen

Hierbei bleibt aufgrund fehlender Vergleichbarkeit oder Erfahrungswerte die Frage, ob und wie sehr die ermittelten Messdaten von den Daten einer mit Speisen etc. beladenen Galley abweichen. Aufgrund von Zeit-, Kosten- und – wie bereits erwähnt – Hygienegründen war diese Anpassung allerdings unabdingbar.

Beim Entwickeln einer neuen oder angepassten Prüfumgebung wird man somit immer Kompromisse eingehen müssen. Die notwendigen Vereinfachungen sollen aber nach Möglichkeit das Ergebnis qualitativ nicht beeinflussen, und wenn doch, so sollte zumindest der Einfluss bekannt sein. Die Auswirkungen dieser Vereinfachungen auf die Ergebnisgüte bei dynamischen Großversuchen soll anhand von Versuchen auf der neuen Hexapod-Prüfanlage untersucht werden, um daraus Erkenntnisse für eine optimierte Entwicklung zukünftiger Teststrukturen bzw. Prüflingsumgebungen abzuleiten. Insbesondere die Vergleichbarkeit der dynamischen Einflüsse von Beladungskomponenten aus dem Flugzeuginterieurbereich soll hierbei betrachtet werden. Es ist geplant, Versuche mit unterschiedlichen Beladungskonfigurationen zu untersuchen, um so eine Einschätzbarkeit der Ergebnisänderung abzuleiten, wodurch eine qualifiziertere Aussage zur Zulässigkeit bestimmter Vereinfachungen und Anpassungen ermöglicht werden soll.



3.2 Systemanalyse und -synthese für die Auslegung varianter Leichtbaustrukturen

Um für eine Auslegung unter dynamischen Lasten präzise Berechnungen zur Verfügung zu haben und damit unnötig hohe Sicherheitszuschläge zu reduzieren, wird der im Folgenden vorgestellte Ansatz entwickelt. Er unterstützt die Auslegung bei dynamischen Lasten insbesondere bei variantenreichen Produktstrukturen, bei denen ein besonders hoher Aufwand durch zahlreiche Auslegungsiterationen der unterschiedlichen Varianten entsteht. Auch lässt sich der tatsächliche Sicherheitszuschlag bei genauerer Kenntnis des Verhaltens auch korrekter bestimmen. Zuvor ist dieser tatsächliche Sicherheitszuschlag meistens unbekannt, wenn nicht umfangreiche Tests durchgeführt worden sind. Bei dem Vorgehen wird versucht, den Grundgedanken der Modularität auch auf die für die Auslegung wichtige Berechnung anzuwenden. So soll das Gesamtmodell aus mehreren verschiedenen und unterschiedlich kombinierbaren Modulen bestehen, welche in der jeweiligen Kombination das Gesamtverhalten der jeweiligen Variante beschreiben.

Um die Kombinierbarkeit der Module auch in mechanischen Simulationen zu ermöglichen, ist allerdings die Reduktion des Systemverhaltens in geeignete Modelle notwendig. Im vorgestellten Ansatz wird daher das Systemverhalten einer Einheit (z.B. eines Moduls) auf sein Verhalten bezüglich der Schnittstellen reduziert. Die betrachtete Einheit wird dabei als „Black Box“ betrachtet. Das heißt, dass ihre innere Struktur nicht betrachtet wird, nur ihr Beitrag auf das Verhalten an den Schnittstellen wird berücksichtigt.

In Bild 6 ist ein sogenanntes SISO (Single Input, Single Output) System eines dynamischen Systems mit Eingang und Ausgang dargestellt.



Bild 6: Single-Input-Single-Output-System eines dynamischen Systems

Die Reduktion des Systemmodells auf das Verhalten bezüglich definierter Schnittstellen ermöglicht es, in der Simulation auf eine vollständige Ausgestaltung des Modells der Variante zu verzichten. So kann der Rechen- und Modellierungsaufwand reduziert werden. Eine wechselnde Kombination von voll

ausgestalteten Modulen in FEM-Simulationen ist zwar möglich, aber bedeutet immer einen hohen Anpassungsaufwand, insbesondere an den Schnittstellen.

Der Ablauf des – noch in der Entwicklung befindlichen – Ansatzes ist bildlich in Bild 7 dargestellt.

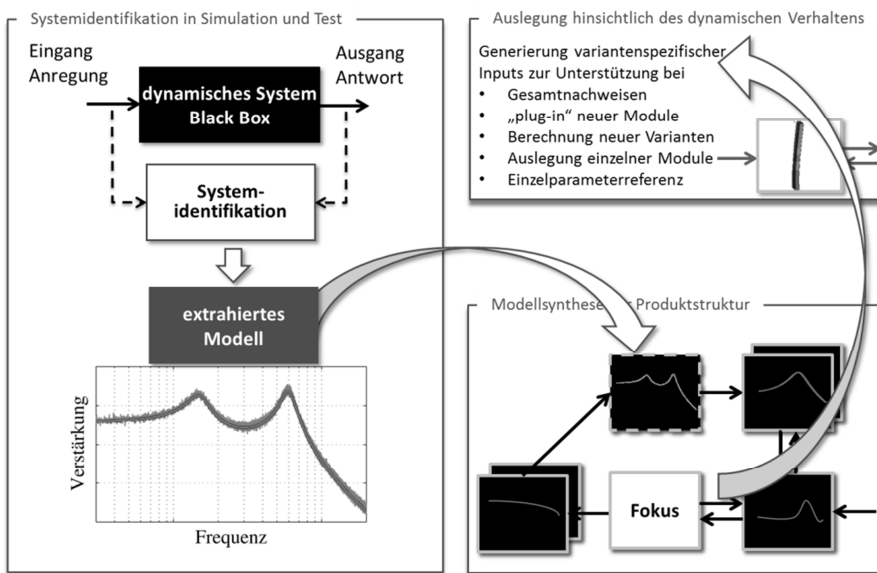


Bild 7: Ansatz zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von variantenreichen Leichtbaustrukturen.

Zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens (Bild 7 links) eignet sich eine aus der Regelungstechnik bekannte Übertragungsfunktion. So werden in der Systemanalyse mit Hilfe von z.B. aus der Regelungstechnik oder Schwingungslehre bekannten Verfahren der Systemidentifikation die Übertragungsfunktionen für alle bekannten Module bestimmt. Dies kann natürlich in Schwingversuchen geschehen, ist aber – je nach Entwicklungsstadium – genauso auch in Simulationen mit nur virtuell existierenden Modulen möglich.

Werden die Module mit ihrem Verhaltensbeschreibungen entsprechend ihres tatsächlichen Aufbaus kombiniert (Bild 7 unten rechts), so kann die Auslegung im Wesentlichen durch zwei Aspekte unterstützt werden

- Gesamtnachweise für unbekannte Varianten: Das Verhalten von nicht getesteten Varianten oder bislang nicht im Detail voll ausmodellierten Simulationen kann simuliert werden.
- Auswirkungen des Einzelmoduls in Entwicklung auf das Gesamtverhalten: Wird ein Modul neu entwickelt und durchläuft eine iterative Auslegung, so kann das Simulationsmodell des Moduls als Plug-In in das Gesamtmodell von Black Boxes eingegliedert werden und es kann das resultierende Verhalten des Gesamtmodells bestimmt werden. Da die inneren Strukturen in diesen Modul bekannt sind, spricht man hier von einem „White Box Modell“.

Die Definition der die Module verbindenden Schnittstellen hat einen erheblichen Einfluss auf die Modellierung und damit auch auf das Ergebnis. Auch wenn die Module mit ihren Systemgrenzen im Rahmen einer Modularisierung (z.B. nach [4], [5]) festgelegt wurden, so sind die verbindenden Flüsse, welche ein dynamisches Verhalten an den Schnittstellen beschreiben, geeignet und detailliert festzulegen. Als erster Ansatzpunkt wird dabei zunächst den Kraftpfaden gefolgt. Eventuell relevante Rückwirkungen sind ebenfalls abzubilden. Für diesen Teil der Systembildung soll in Zukunft eine geeignete methodische Vorgehensweise entwickelt werden.

Im Folgenden werden die beiden relevanten Abschnitte der Systemanalyse und der Systemsynthese detaillierter vorgestellt.

3.2.1 Systemanalyse mit Methoden der Systemidentifikation

Der erste große Block des Ansatzes dient der Bestimmung einer geeigneten Beschreibung des hier relevanten dynamischen Verhaltens. Dazu können mehrere Verfahren der Systemidentifikation verwendet werden. Bei periodischen quasi-stationären Anregungen ist häufig das Verstärkungsverhalten bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen interessant, da es das grundlegende Schwingverhalten des Systems beschreibt. Um die Antwort des Systems in Abhängigkeit der Anregung am Eingang abzubilden, eignet sich eine Übertragungsfunktion.

Diese wird aufgestellt, indem die Systemantwort X_{OUT} durch die Anregung am Eingang X_{IN} geteilt wird. Da eine Frequenzabhängigkeit des Verhaltens der Betrachtung zu Grunde liegt, wird diese Bestimmung im Frequenzbereich durchgeführt. Die Übertragungsfunktion kann als Verstärkung über der Anregungsfrequenz dargestellt werden, wie z.B. auch aus sogenannten Bode-Plots bekannt. Als Beispiel ist in Bild 8 die Bestimmung der Übertragungsfunktion eines einfachen Sandwichpanels dargestellt.

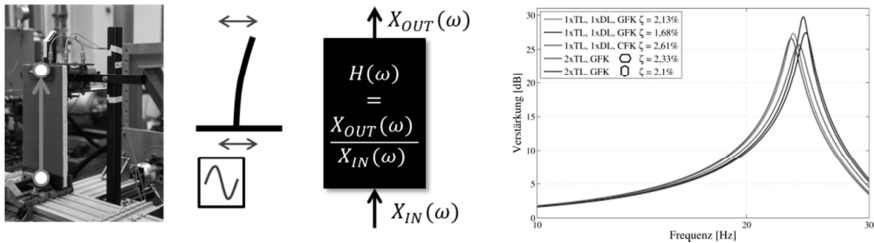


Bild 8: Identifikation der Übertragungsfunktion eines Sandwichpanels.

Monumente der Flugzeugkabinen werden häufig aus solchen Panels hergestellt. Sie bestehen aus einem Kern von Aramidpapierwablen und Deckschichten aus faserverstärkten Kunststoffen. Die Übertragungsfunktion soll für das dargestellte Panel eine Übertragung der Fußpunktanregung an das obere Panelende beschreiben. So entsteht ein gut zu beschreibendes SISO-System. Für eine Betrachtung im Frequenzbereich müssen Ein- und Ausgangssignale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert werden. Anschließend kann das Ausgangssignal durch das Eingangssignal geteilt werden, um die Übertragungsfunktion zu berechnen. Diese systembeschreibende Übertragungsfunktion kann nun mit anderen Signalen als Eingangssignal versehen werden; das Modell beschreibt dann das resultierende Antwortverhalten. Nähere Informationen zur angewandten Systemidentifikation finden sich in [6] und ein guter Überblick des generellen Vorgehens in [7].

3.2.2 Systemsynthese - Abbildung der Kombinatorik mit reduzierten Systemmodellen

Die universellen Beschreibungen des Systemverhaltens durch eine Übertragungsfunktion können miteinander verknüpft werden. Der Ausgang eines Systems ist dann mit dem Eingang eines anderen verknüpft. Werden so die Module eines Produkts als Subsysteme eines Gesamtsystems entsprechend miteinander verknüpft, so kann das Verhalten des Gesamtsystems in Abhängigkeit seiner Anregung beschrieben werden, siehe Bild 7 unten rechts. Variante Module können einfach ausgetauscht werden und das geänderte Schwingverhalten des Gesamtsystems kann für die neue Variante schnell berechnet werden. Die bisherigen Beispiele beschränken sich auf SISO-Systeme mit einfachem Aufbau in der Praxis. Ein deutlich komplexeres System, wie eine voll ausgestattete Flugzeugbordküche mit Trolleys, Staufächern, auswechselbaren Staukisten, Getränkeautomat und Öfen, zeigt ein Verhalten, welches nur eingeschränkt und mit starken Vereinfachungen auf lineare SISO-Systeme reduziert werden kann. Wahrscheinlich werden zukünftige Analysen

der bisher durchgeführten Testergebnisse aus diesem Grund auf MIMO-Systemen (Multiple Input, Multiple Output) oder auch Mehrgrößensystemen basieren, wie in Bild 9 dargestellt. Ein MIMO System hat mehrere Ausgänge und unterschiedlich angeregte Eingänge, siehe auch [6] und folgende Bände.

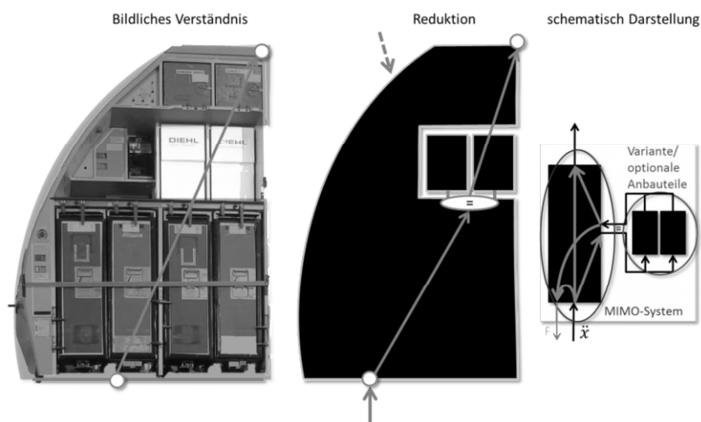


Bild 9: Modellreduktion einer Flugzeugbordküche mit einem MIMO-System.

3.3 Ausblick auf zukünftige Untersuchungen

Die im Rahmen von ersten Tests auf dem Hexapod durchgeführten Untersuchungen von einer Flugzeugbordküche mit variierender Beladung geben zwar interessante Aufschlüsse über das globale Schwingverhalten, allerdings sind detaillierte Betrachtungen (z.B. Beitrag einzelner Komponenten) nur bedingt möglich. Deswegen wird der Ansatz zunächst am Beispiel von Kabinentrennwänden (sog. Partitions) weiter untersucht. Diese weisen in der Produktion des Kooperationspartners Diehl Service Modules eine erhebliche Variantenzahl auf mit ihren varianten oder optionalen Anbauteilen, wie Bildschirmen, Literaturtaschen, Babykörbchen und vielem mehr. Die intramodularen Beziehungen lassen sich voraussichtlich noch leichter mit SISO-Systemen darstellen, für die ein breiterer Satz an Identifikationsverfahren existiert. Auch ist die Modellierung in FEM-Simulationen für solche Produkte noch deutlich besser zu bewerkstelligen, was Fehlereinflüsse reduziert. Aufgrund der im Vergleich zur kompletten Galley reduzierten Komplexität lässt sich auch der Einfluss von unterschiedlichen Beladungskomponenten besser ermitteln. So kann eine Durchgängigkeit von den bisher durchgeführten Versuchen an Sandwichpanels und deren Anbindungen hin zu daraus aufgebauten Partitions mit varianten und optionalen Anbauteilen erzeugt werden. Spätere Versuche bauen so auf validen Erkenntnissen bisheriger Kleinversuche auf, welches

eine Modellsynthese eines Gesamtsystems aus kleinen Einheiten unterstützt. Am Ende der Entwicklung der Ansätze stehen Untersuchungen zur Validierung. Auch sollte bewertet werden, inwieweit derzeitige normative Vorgaben mit Nachweisen auf Basis von modularen Modellen erfüllt werden können, oder ob weitere Nachweisteile notwendig sind. In jedem Fall kann der letztgenannte Ansatz aber während der zahlreichen Iterationsschleifen bei der Auslegung unterstützen, da zügig Vorhersagen zum dynamischen Verhalten bei auslegungsinternen Parametervariationen bereitgestellt werden. Hierzu benötigt es aber zuverlässige Aussagen zur Genauigkeit von Versuchen mit erzwungenen Adaptionen zwischen realer Einsatzumgebung und Test.

Literatur

- [1] Schürmann, H.: „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [2] Krause, D.; Plaumann, B.; Gumpinger, T.; Jonas, H.: „Flexible Positionierung von modularen Kabinenmonumenten durch innovative Anbindungen in Leichtbauweise“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress - DLRK2011, Bremen, 2011.
- [3] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: „Structural Complexity Management“, Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [4] Krause, D., Kipp, T., Bles, C.: „Modulare Produktstrukturierung“ in: Steinhilper, R.; Rieg, F. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [5] Krause, D.; Eilmus, S.: “Methodical Support for the Development of Modular Product Families.”, pp. 35-45 in Birkhofer, H.: “The Future of Design Methodology”, Springer Berlin, 2011.
- [6] Isermann, R.: „Identifikation dynamischer Systeme 1 - Grundlegende Methoden“, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [7] Van der Auweraer, H.: „Structural dynamics modeling using modal analysis: applications, trends and challenges“, Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Re-discovering Measurement in the Age of Informatics – IMTC2001, 2001.
- [8] Lindemann, U.: “Methodische Entwicklung technischer Produkte“, Springer, Berlin, 2005.

Ansatz zur crashsicheren Auslegung von Leichtbaukonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Fügestellen

Klein Daniel, Lindner Christian, Wartzack Sandro
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg*

Particularly in the automotive sector the importance of lightweight constructions is increasing. The reasons for this development vary from more strict limitations of the exhaust of carbon dioxides to an increased ecological awareness. Nevertheless basic requirements like crashworthiness must also be considered as vehicle safety is one of the most important arguments for customers purchase decision. To solve this contradiction of a light but also safe construction an approach to develop crashworthy lightweight construction is presented and the impact of join connections on the crashperformance is observed.

1 Einleitung

Die Bedeutung des Leichtbaus hat in den letzten Jahren und Jahrzehnten gerade im Automobilbau enorm zugenommen. Die Ursachen sind sehr unterschiedlich und reichen von härteren Restriktionen des CO₂-Ausstosses [1] bis hin zu einem gesteigerten ökologischen Bewusstsein der Kunden [2]. Speziell auch im Hinblick auf die Elektromobilität ist eine möglichst leichte Fahrzeugstruktur eine der essentiellen Anforderungen, da das Gewicht des Fahrzeugs direkten Einfluss auf den Energiebedarf und damit die Reichweite hat [3]. Neben dem Gewicht darf aber unter anderem die Crashesicherheit der Fahrzeuge nicht vernachlässigt werden. Nach der Zuverlässigkeit des Fahr-

zeugs ist die Fahrzeugsicherheit das wichtigste Kriterium für Kunden bei der Kaufentscheidung, wie eine Umfrage des ADAC gezeigt hat [4]. Doch hier zeichnet sich ein scheinbarer Widerspruch ab. Auf der einen Seite müssen die Fahrzeuge immer leichter werden, auf der anderen Seite muss die Crashsicherheit weiter erhalten bleiben bzw. sogar noch verbessert werden. Als Beispiel, wie dieser Zielkonflikt gelöst werden kann, soll anhand eines Elektrofahrzeugs ein Ansatz vorgestellt werden, wie eine Rahmenstruktur erzeugt werden kann, die zum einen ein gutes Crashverhalten zeigt, zum anderen aber auch ein geringes Gewicht hat. Ausgehend von einer Topologieoptimierung zum Auffinden der Baustuktur wird eine Parameteroptimierung zur gezielten Einstellung des Deformationsverhaltens durchgeführt. Abschließen wird die Lage der Fügstellen festgelegt und der Einfluss der Fügeposition aufgezeigt.

2 Geometrieerstellung

Zu Beginn der Produktentwicklung sind die essentiellen Anforderungen an die Konstruktion bekannt und es ist Aufgabe des Entwicklers die ideale Geometrie zu finden, die allen diesen Anforderungen gerecht wird. Eine Möglichkeit den Produktentwickler bei der Wahl eines idealen Designs zu unterstützen, stellt die Topologieoptimierung dar, deren Bedeutung in den letzten Jahrzehnten enorm zugenommen hat [6].

2.1 Herausforderung und Vorgehen bei der Entwicklung der Rahmenstruktur

Trotz des Bedeutungsgewinns ist die Topologieoptimierung in ihrer Anwendung beschränkt, da lediglich lineare Probleme mit den aktuell verfügbaren Topologieoptimierungs-Algorithmen gelöst werden können. Nicht-lineare Probleme wie Material-Nicht-Linearitäten oder gar Crashvorgänge, bei denen neben den Material- noch Geometrie- und Kontakt-Nicht-Linearitäten auftreten, können nicht gelöst werden. Zwar existieren einige Ansätze zur Optimierung von Strukturen für den Crash (z.B. [7],[8]), doch auch hier beschränkt sich die Anwendung auf kleine akademische Beispiele und in keinem kommerziellen Solver ist derzeit ein nicht-linearer Topologieoptimierungsalgorithmus implementiert. Dennoch kann auch bei der Entwicklung crashsicherer Konstruktion der Einsatz von Topologieoptimierung von Vorteil sein, wie im Folgenden gezeigt wird. Betrachtet wird ausschließlich ein Fahrzeug im Frontcrash mit 50 km/h (siehe Abbildung 1). In diesem Fall prallt das Fahrzeug frontal gegen ein stehendes, ideal starres Hindernis.

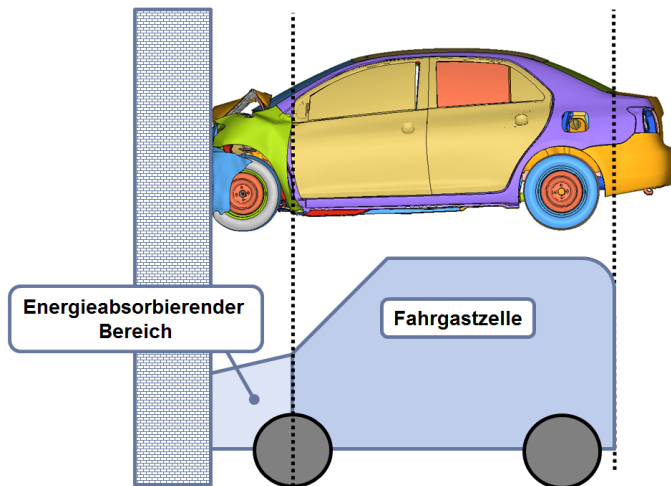


Abbildung 1: Funktionsbereiche des Fahrzeugrahmens

Um den Insassen hier ausreichend Schutz zu bieten, muss die Rahmenstruktur zweierlei Funktionen übernehmen. Zum einen muss sie im Bereich der Insassen und der Batterie möglichst steif sein, auf der anderen Seite muss die Struktur aber auch die entstehende Energie im Frontbereich kontrolliert aufnehmen können. Möglich ist die Entwicklung einer Rahmenstruktur mit den beschriebenen Eigenschaften über zwei Teilschritte. Zunächst wird eine Topologieoptimierung mit dem Ziel einer möglichst steifen Struktur durchgeführt. In einem zweiten Schritt in Abschnitt 3 wird diese sehr steife Geometrie über eine Parameteroptimierung so modifiziert, dass die Energieabsorption der Struktur vorzüglich im Frontbereich stattfindet.

2.2 Topologieoptimierung

Der erste Schritt bei der Topologieoptimierung ist die Definition eines diskretisierten Bauraumes bzw. eines sogenannten Design-Raums. Dieser legt fest, welcher Bereich für die Erstellung des Bauteils verwendet werden kann. Der Design-Raum wird zudem mit Randbedingungen versehen, die die Crash- sowie Betriebslasten möglichst gut wiedergeben. Hierfür wurden für den alltäglichen Betrieb vor allem Torsionslasten, die beim Überfahren von Hindernissen entstehen, aufgebracht (siehe Abbildung 2). Bei der Modellierung der Crash-Lasten muss auf eine Vereinfachung zurückgegriffen werden

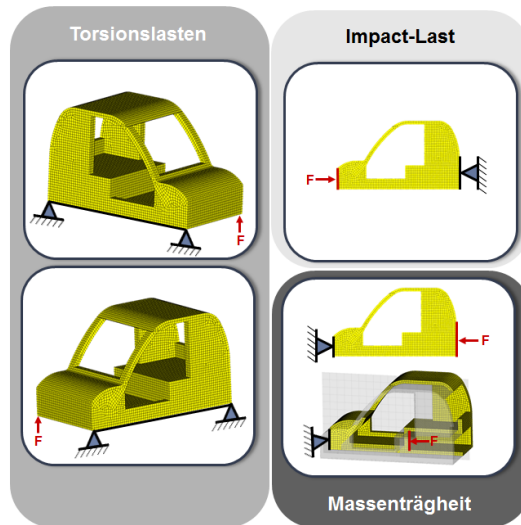


Abbildung 2: Berücksichtigte Randbedingungen

Zwar handelt es sich beim Crash um einen hochdynamischen Vorgang, der zu veränderlichen Lasten mit unterschiedlichen Lastangriffspunkten führt, die Berücksichtigung solcher Lasten ist aber mit der verwendeten Topologieoptimierungssoftware OptiStruct nicht möglich. Deshalb werden die Impact-Lasten als statische Lastfälle berücksichtigt. Der Aufschlag im Frontbereich wird als Flächenlast modelliert, wobei der hintere Teil des Bauraums als fest eingespannt betrachtet wird. Die Massenträgheit der Konstruktion wird mit einer statischen Last am Heck, sowie einer festen Einspannung im Frontbereich wiedergegeben und auch die Massenträgheit der Batterie wird aufgrund der großen Masse berücksichtigt. Damit sollen auch die entstehenden Massenkräfte der Rahmenstruktur und der Batterie an der Fahrgastzelle vorbei in den Deformationsbereich eingeleitet werden. Mit dem Ziel einer möglichst geringen Nachgiebigkeit C , mit

$$C = F \cdot U$$

wobei F die Knotenkraft des Elements und U die jeweilige Verschiebung darstellt, ergibt sich die in Abbildung 3 gezeigte Struktur. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Torsionslasten, die dazu führen, dass sich vor allem im Mittelteil Zwischenstreben ausbilden und die Konstruktion verwindungssteif gestalten.

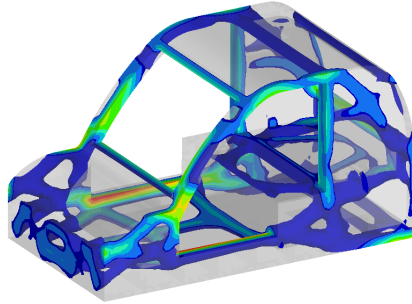


Abbildung 3: Ergebnis der Topologieoptimierung

Die Impact-Lasten rufen eher massive Lastpfade im Front- und Heckbereich hervor. Dieses noch sehr abstrakte Gebilde gilt es in einem weiteren Schritt in eine Rahmenkonstruktion zu überführen, bevor mit der Parameteroptimierung begonnen werden kann.

2.3 Überführen der Ergebnisse in eine Rahmenkonstruktion

Die Überführung der Ergebnisse der Topologieoptimierung in eine Rahmenkonstruktion muss manuell erfolgen. Verwendet wird hierzu das von B & W entwickelte Tool EFX, das es erlaubt, die Rahmenkonstruktion über Linien darzustellen und automatisch die Volumenmodelle der einzelnen Profile und die Schnittstellen erzeugt.

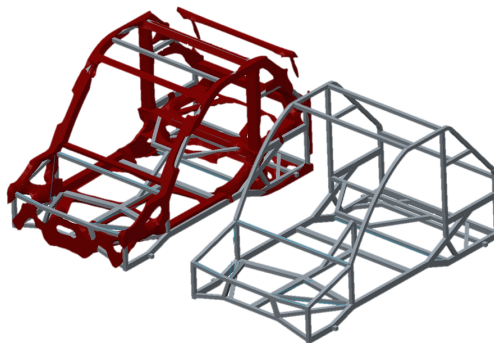


Abbildung 4: Die abgeleitete Rahmenkonstruktion

Die große Schwierigkeit bei der Überführung der Ergebnisse der Topologieoptimierung liegt in der Beachtung von Fertigungsrestriktionen. So können bei-

spielsweise nicht alle Verstrebungen in der realen Rahmenkonstruktion so nachgebildet werden, wie sie in der Topologieoptimierung errechnet wurden, da dies unter Umständen zu nicht fertigmachen Knotenpunkten an der Schweißkonstruktion führt. Daher kommt es an einigen Stellen zu geringfügigen Abweichungen, wobei versucht wurde möglichst viele Lastpfade aus der Topologieoptimierung zu übernehmen.

3 Parametervariation zur Optimierung des Energieabsorptionsverhaltens

Ziel der Topologieoptimierung war es, die Nachgiebigkeit der Elementknoten gering zu halten. Damit konnte eine Rahmenstruktur erzeugt werden, die beim ersten Impuls zwar zu einem sehr steifen Verhalten führt, der genaue Ort der Energieabsorption im Crash ist damit aber noch nicht festgelegt, wie gezeigt werden kann. Zur Absicherung des Crashverhaltens wurde ein FE-Modell der Rahmenstruktur aus Kapitel 2.3 erzeugt (siehe Abbildung 5).

3.1 Untersuchung des Crashverhaltens

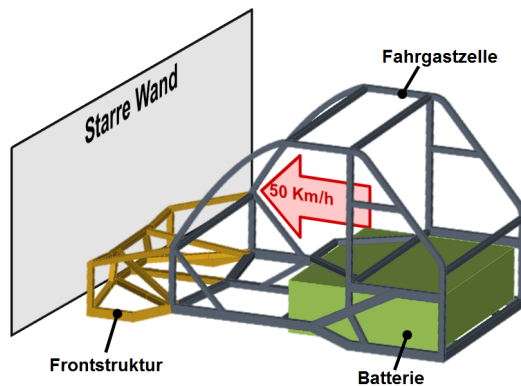


Abbildung 5: FE-Modell zur Crashsimulation

Die Rahmenstruktur trifft bei diesem Crash-Szenario mit 50 km/h auf eine ideal starre Wand. Um die Massen von Batterie und Antrieb zu berücksichtigen wurde ein Zusatzgewicht von 390 kg im unteren Bereich der Fahrgastzelle angebracht und über ideale steife Verbindungen an der Fahrgastzelle befestigt. Zudem wurde zur Vereinfachung der Berechnung an die Frontstruktur und die Fahrgastzelle das gleiche elastisch-plastische Materialmodell für Aluminium vergeben. Das Ergebnis der Simulation (siehe Abbildung 6) zeigt ein-



deutig, dass sich die entwickelte Struktur im ersten Moment des Aufschlags sehr steif verhält und es kaum zu Deformationen, aber sehr großen Beschleunigungen kommt.

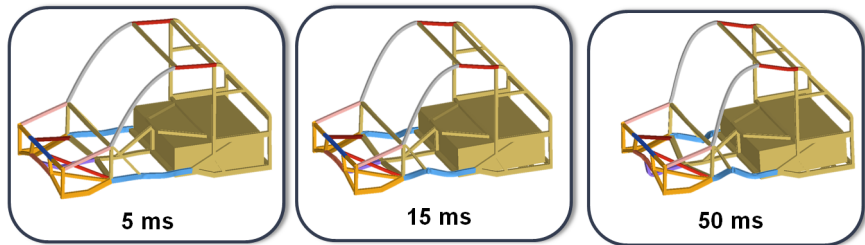


Abbildung 6: Ergebnis der Untersuchung des Crashverhaltens

Im weiteren Verlauf bilden sich erhebliche Deformationen im Bereich der Fahrgastzelle aus, welche bei realen Fahrzeugen unter allen Umständen zu vermeiden sind, da eine Deformation der Fahrgastzelle gleichzeitig eine Minimierung des Überlebensraums für die Insassen bedeutet. Eine Optimierung des Deformations- und damit des Crashverhaltens kann aber über eine Parameteroptimierung im Frontbereich erfolgen. Zwar wurden mit der aus der Topologieoptimierung abgeleiteten Rahmenstruktur alle Lastpfade bereits festgelegt, doch über eine Variation der Profildicke besteht eine weitere Möglichkeit das Deformationsverhalten günstig zu beeinflussen.

3.2 Optimierung des Crashverhaltens mittels Parametervariation

Die Parameteroptimierung hat zum Ziel einen Steifigkeitsunterschied zwischen der Fahrzeugfront und der Fahrgastzelle über unterschiedliche Profildicken zu erzeugen, sodass es beim Crash im Frontbereich und nicht in der Fahrgastzelle zu einer Deformation kommt. Die Schwierigkeit besteht darin, diesen Steifigkeitsunterschied zwischen Fahrzeugfront und Fahrgastzelle so einzustellen, dass sich einerseits die Front kontrolliert deformiert und die Fahrgastzelle intakt bleibt, andererseits aber die Energieabsorption ausreichend groß ist, um keine Intrusion in die Fahrgastzelle zuzulassen. Nach einigen Iterationen kann bei manueller Variation der Profildicken das Deformationsverhalten deutlich verbessert werden, wie Abbildung 7 zeigt.

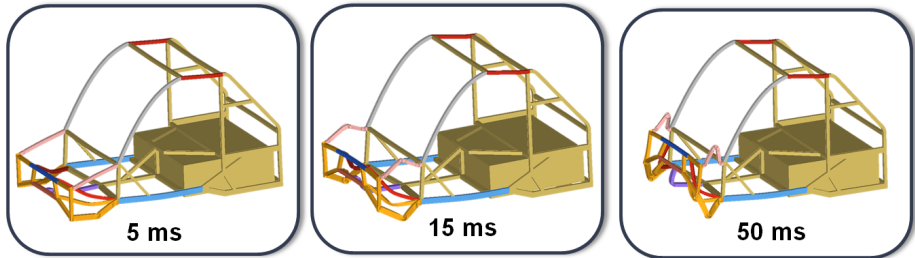


Abbildung 7: Crashverhalten nach der Parameteroptimierung

Da die Fahrzeugfront aufgrund der geringeren Profildicken auch eine deutlich geringere Steifigkeit besitzt, kommt es zu einer gezielten Deformation, ohne dass die Fahrgastzelle nennenswert beschädigt wird. Damit wird die entstehende Energie vor allem im Front-Bereich und nicht in der Fahrgastzelle absorbiert. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass auch die Variation der eingesetzten Werkstoffe zu einer Optimierung des Deformationsverhaltens führen kann. Aufgrund des erhöhten Aufwands wird in diesem Beitrag allerdings darauf verzichtet.

4 Bedeutung der Fügestellen für das Energieabsorptionsverhalten der Rahmenstruktur

Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass über eine Topologieoptimierung und eine anschließende Parameteroptimierung das Deformationsverhalten der Rahmenstruktur so eingestellt werden kann, dass sich eine sehr steife Fahrgastzelle sowie eine kontrolliert deformierende Frontstruktur ergibt. Dabei wurde immer davon ausgegangen, dass sich die Fügestellen ideal verhalten und zu keinem Zeitpunkt versagen. In der Realität zeigt sich allerdings häufig, dass die Fügeverbindungen der begrenzende Faktor bei der Crashperformance der Fahrzeugstruktur sind [5]. Deshalb sollen in diesem Abschnitt Fügestellen definiert und der Einfluss der Fügeverbindungen auf die Konstruktion näher betrachtet werden.

4.1 Positionierung der Fügestellen

Bei der Positionierung der Fügestellen müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beachtet werden. So müssen die Fügestellen abhängig vom gewählten Fügeverfahren gut, teilweise sogar beidseitig, zugänglich sein. Auf der anderen Seite müssen die Fügestellen aber auch so positioniert werden, dass sie richtig beansprucht werden. Welchen Einfluss die korrekte Positionie-

rung der Fügestellen auch auf die Crashperformance bzw. das Energieabsorptionsvermögen der Rahmenstruktur und damit auf die crashgerechte Gestaltung hat, soll im Folgenden gezeigt werden. Dazu werden zwei Modelle mit unterschiedlich positionierten Schweißnähten im energieabsorbierenden Frontbereich erzeugt. Einmal wird der schlimmste Fall erzeugt, dass alle Fügeverbindungen im Frontbereich im Spannungsmaximum zu Beginn des Aufschlags liegen und einmal werden die Fügestellen möglichst außerhalb der Spannungsmaxima erzeugt. Alle Fügestellen werden mit einem Versagenkriterium belegt, das sich an der Fließgrenze des Grundwerkstoffs orientiert. Damit wird der Idealfall angenommen, dass eine Schweißverbindung die Festigkeit des Grundwerkstoffs annimmt. Als Referenz für beide Modelle dient die generierte Rahmenstruktur aus Kapitel 3, da hier keine Fügeverbindungen vorhanden sind und damit den besten Fall darstellen, dass keine Verbindung während des Crashes versagt.

4.2 Energieabsorptionsverhalten bei unterschiedlicher Positionierung der Fügeverbindungen

Es zeigt sich für die Energieabsorption über dem entstehenden Deformationsweg der in Abbildung 8 dargestellte Verlauf.

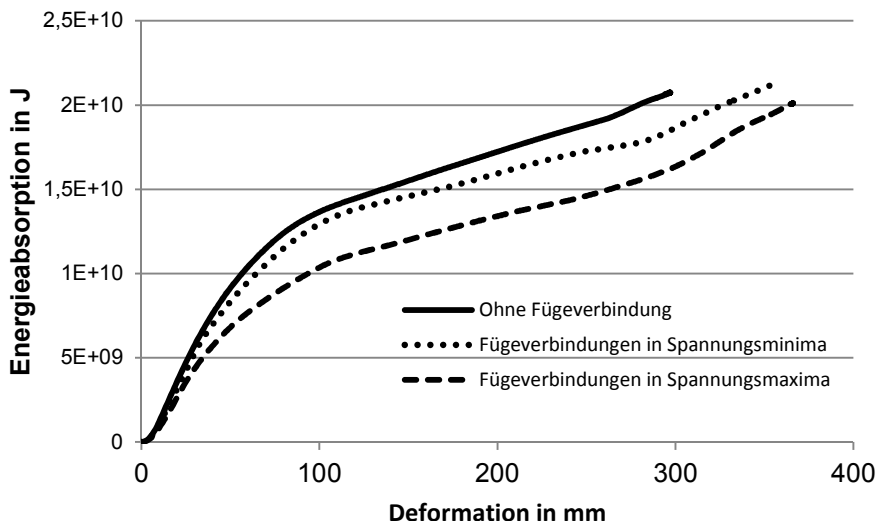


Abbildung 8: Energieabsorption bei unterschiedlicher Fügestellenposition

Zu Beginn zeigen alle drei Varianten ein nahezu identisches Energieabsorptionsverhalten. Erst ab etwa 30 mm Intrusion beginnt sich die Kurve der Variante mit den Fügstellen in den Spannungsmaxima deutlich von den anderen beiden abzulösen. Die Ursache für diese Differenz ist mit dem Versagen der ersten Fügstellen zu begründen. Sobald eine Fügstelle nicht mehr in der Lage ist Kräfte zwischen den Bauteilen zu übertragen, ist eine Energieabsorption der Struktur nur noch stark eingeschränkt möglich. Im Bereich von 100 mm bis zum Ende des Crashvorgangs bleibt die Differenz zwischen den einzelnen Varianten in etwa gleich. Die Fügstellen haben ab diesem Zeitpunkt anscheinend keinen Einfluss mehr, da die einzelnen Profile aufgrund der Deformation an vielen Stellen abseits der Fügeverbindungen in Kontakt treten und quasi einen Formschluss erzeugen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Absatz vorgestellt, wie basierend auf einer Topologieoptimierung und einer anschließenden Parameteroptimierung eine crashsichere Leichtbaustruktur erzeugt werden kann. Durch die Topologieoptimierung entstand ein Rahmen, der unter Ausnutzung der idealen Lastpfade, ein sehr steifes Verhalten zu Tage legt. Wie die Simulation jedoch zeigen konnte, kommt es im Crash zu einer Deformation im Bereich der Fahrgastzelle, was unter Beachtung allgemeiner Regeln bei der Auslegung crashsicherer Fahrzeuge, nicht zu tolerieren ist. Deshalb wurde in einer anschließenden Parametervariation gezielt ein Bereich in der Front des Fahrzeugs eingestellt, der der Energieabsorption im Crash dient. Damit wurde das Crashverhalten noch einmal entscheidend verbessert. Am Ende dieses Beitrags wurde zudem auf die Bedeutung der Fügeverbindungen bei der crashsicheren Auslegung näher eingegangen. Demnach hat die korrekte Platzierung der Fügeverbindungen vor allem zu Beginn des Crashvorgangs einen entscheidenden Einfluss auf das Energieabsorptionsvermögen der Struktur.

5.1 Optimierung des Crashverhaltens über einen Optimierungsalgorithmus

In diesem Beitrag wurde die Parameteroptimierung manuell durchgeführt, da ausschließlich das Deformationsbild als Stellgröße diene. Sollten allerdings bestimmte Zielgrößen, wie etwa ideale Beschleunigungskurven in der Fahrgastzelle oder ideale Verlaufskurven für die Intrusion im Frontbereich vorhanden sein, kann auch ein Optimierungsalgorithmus zum Einsatz kommen. Dazu werden die Profildicken im FE-Modell parametrisiert und zusammen mit den Zielkurven dem Optimierer übergeben. Über diverse Optimierungsmethoden (siehe hierzu [9]) können die Parameter so eingestellt werden, dass sich eine

möglichst gute Übereinstimmung zwischen Zielgrößen und FE-Modell ergibt. Zudem könnte in diese Optimierungsrechnung eine Formoptimierung mit einbezogen werden, bei der auch die Positionen und Abmaße variiert werden. Damit wäre neben den Dicken- und Werkstoffparametern auch die Geometrie bis zu einem gewissen Grad variabel und könnte in Richtung erhöhter Energieabsorption verändert werden. Auch könnten beim Einsatz eines Optimierungsalgorithmus mehrere Lastfälle, z.B. Betriebslastfälle oder Seitenaufprall, mit in die Parametervariation einbezogen werden.

5.2 Visualisierung des Kraftflusses zur Optimierung der Fügstellen

In Abschnitt 4.2 konnte gezeigt werden, dass die Position der Fügstellen erheblichen Einfluss auf das Energieabsorptionsverhalten und damit die Crashperformance hat. Dabei hat sich gezeigt, dass die Positionierung außerhalb der Spannungsmaxima günstig ist. Eine weitere Möglichkeit zur belastungsgerechten Positionierung der Fügstellen bietet die Visualisierung des Kraftflusses. Basierend auf der Theorie von KELLY [10] ist es möglich den Kraftfluss, oder korrekterweise den Impulsstrom, in Bauteilen und auch Baugruppen zu visualisieren, wie anhand des allgemein bekannten Kerbeeinflusses bei Wellen in Abbildung 9 gezeigt wird.

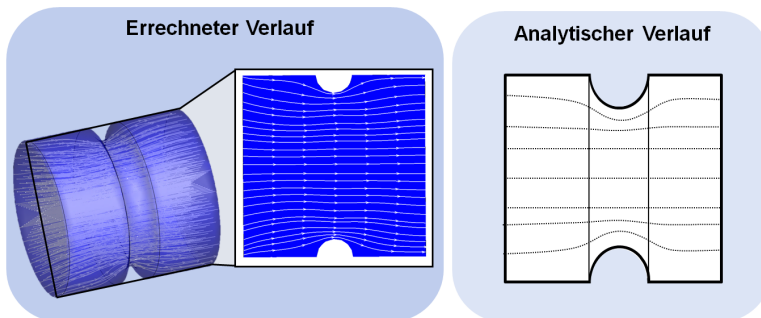


Abbildung 9: Errechneter und analytischer Kraftfluss nach [11]

Exemplarisch für diese Methode dargestellt ist der errechnete Verlauf des Kraftflusses in einer gekerbten Welle sowie die analytischen Verlaufslinien nach [11]. Es ist einfach zu erkennen, dass sich der gedachte Verlauf gut mit dem errechneten deckt. Durch diese besondere Visualisierung der Bauteilbelastung können konstruktive Regeln sowohl für die Gesamtkonstruktion als auch die Fügstellen im Sinne einer kraftflussgerechten Konstruktion abgeleitet werden und so die Belastbarkeit der einzelnen Fügstellen bzw. die Crashperformance im Gesamten erhöht werden.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt: „Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Personenwagen“, <http://www.bmu.de/verkehr/downloads/doc/print/43842.php>, 16.12.2011
- [2] „Die umweltbewussten PKW-Käufer“, tns infratest, Seven One Media, 2007
- [3] Eckstein, L.; Schmitt, F.; Hartmann, B.: „Leichtbau bei Elektrofahrzeugen“, ATZ, 11/2010
- [4] ADAC: „Trendforschung im PKW-Markt 1993 – 2011 eine ADAC Verlag-Studie“, 2011
- [5] Sommer, S.: „Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Punktschweißverbindungen unter monoton ansteigender Belastung“, Shaker Verlag, Aachen, 2009
- [6] Hoffmann, M., Höltkemeier, K.-U.: „Topologieoptimierung in der Produktentwicklung Einführung – Anwendungsmöglichkeiten – Zukunftsperspektive“; http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/digitale_konstruktion/berechnen/articles/114084/, 20.07.2012
- [7] Witowski K.; Erhart, A.; Schumacher, P.; Müllerschön, H.: „Topology Optimization for Crash“, 12th LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2012
- [8] Patel, N. M.: “Crashworthiness Design Using Topology Optimization”, Dissertation, Notre Dame (Indiana, USA), Juli 2007
- [9] Deb, K.: “Optimization For Engineering Design – Algorithms and Examples”, Eighth Printing, Neu-Dehli, 2005
- [10] Kelly, D. W.; Tosh, W.: “Interpreting load paths and stress trajectories in elasticity”, Engineering Computations, Vol.17 Iss:2, S. 117-135, 2000
- [11] Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: „Rohloff/Matek Maschinenelemente“, Vieweg+Teubner Verlag, 2009

Erfahrungsbasierte Unterstützung des Entwicklungsprozesses mit Fokus auf Verbindungsauslegung

Martin Eigner, Joscha Ernst und Daniil Roubanov
*Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung;
TU Kaiserslautern*

The manufacturing costs of a product are much more determined by engineering than by production. To reduce these costs it is necessary to engage the understanding and the interaction between these two departments. Although the aim of Design for Assembly (DfA) is a better integration of these disciplines, currently there are still gaps in the systemic support.

Connecting elements is crucial for assembly operations. These are used by the production department during the physical assembly and during the virtual assembly by the design department. Therefore connecting elements act as a link between these two departments. At first they need to be classified, then an analysis can be performed for each of the classes to find characteristic parameters. These parameters are needed to create a data model for saving the assembly-relevant data in a system independent and neutral way. A possible place for storing this data is a PDM system. There the data could be attached to the manufacturing bill of material (M-BOM).

On the CAD system side this data should be made available by CAD-features. Those should include the geometric and technical assembly and manufacturing-related information.

1 Einleitung und Motivation

Montagearbeitsinhalte werden einerseits durch die Konstruktion, andererseits durch die Produktionsentwicklung (Arbeitsplanung, etc.) determiniert. Dabei liegt der Fokus der Produktentwickler meist auf der Umsetzung der technischen Produkthanforderungen und der Funktionserfüllung (funktionsorientierte Sichtweise); die Arbeitsplanung beschäftigt sich hingegen eher mit der Optimierung der Fertigungs- und Montagevorgänge (fertigungsorientierte Sichtweise). Diese beiden Bereiche sind nach wie vor in vielen produzierenden Unternehmen nicht nur durch einen unterschiedlichen Entwicklungsfokus, sondern auch systemisch voneinander getrennt, wie Bild 1 verdeutlicht.

Im Sinne eines Design for Assembly Ansatzes wird der Entwickler aufgefordert montagegerecht zu konstruieren, was sich aufgrund der systemischen (und personellen) Trennung der beiden Bereiche nur schwer gestalten lässt. Zusätzlich kommt es beim Übergang von Konstruktion zur Arbeitsplanung immer wieder zu zeitintensiven Iterationsschleifen.

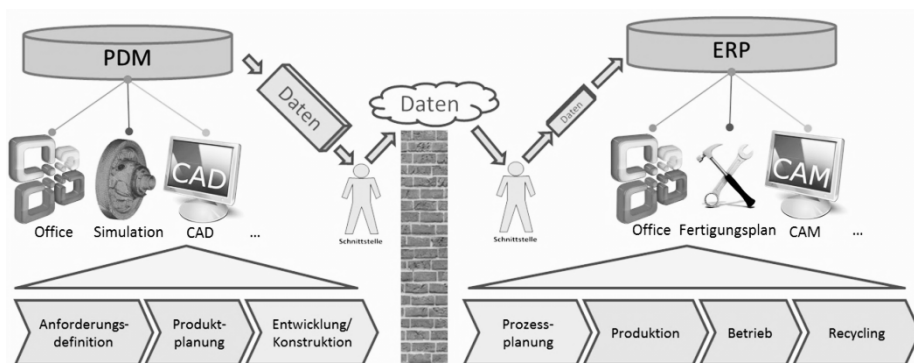


Bild 1: EDV-Systeme in der Konstruktion und Produktion

Für Montagevorgänge sind Verbindungselemente von entscheidender Bedeutung. Diese finden sowohl bei der physischen Montage, als auch beim Assembly¹ durch die Konstruktion Anwendung und eignen sich daher als Bindeglied zwischen beiden Systemwelten.

¹ engl. für Zusammenbau. Gemeint ist damit das Zusammenfügen von Bauteilen/Baugruppen zu einer nächst höheren Baugruppe.

Die unterschiedlichen Arten von Verbindungselementen sollen zunächst klassifiziert werden. Anschließend kann für jede der gefundenen Klassen eine Analyse der zu beschreibenden Parameter durchgeführt werden, die als Basis für die Erstellung eines Datenmodells fungiert. Um die Daten (die im Datenmodell abgespeichert werden) system- und bereichsneutral bereit zu stellen, sollen diese im PDM-System gespeichert werden. Hier können die Daten an die Stückliste einer Baugruppe angehängt werden.

Auf Seiten der CAD-Systeme sollen diese Daten in Form von Features nutzbar gemacht werden, die sowohl geometrische und technische als auch montage- und fertigungsrelevante Informationen beinhalten.

2 Stand der Technik

2.1 Verbindungselemente und deren Klassifikation

Es existieren viele unterschiedliche Verbindungsarten bzw. Elemente, wie beispielsweise Schrauben, Clipse, Nieten, etc. Jede dieser Verbindungen hat spezifische Attribute, anhand welcher die Verbindungselementeklassen gebildet werden können.

Die Klassifikation nach Haberhauer [6] stellt eine der Klassifikationsmöglichkeiten dar, die anhand von Wirkprinzipien gebildet wird. Die vier Wirkprinzipklassen sind Stoffschluß, Reibschluß, Formschluß und elastische Verbindungen. (vgl. Bild 2).

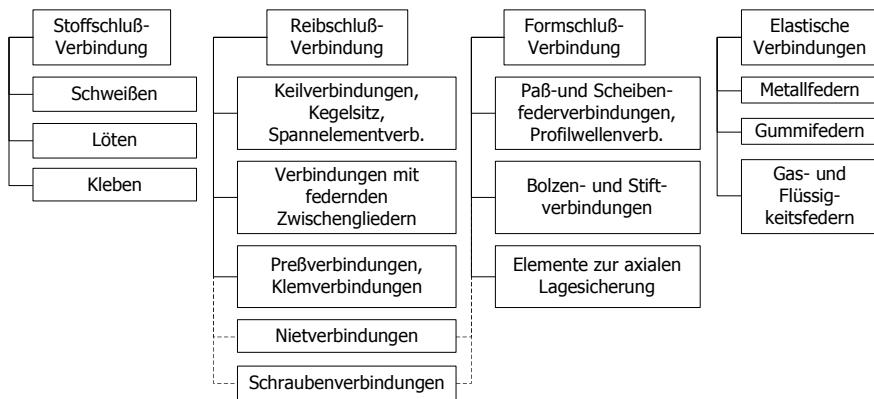


Bild 2: Klassifizierung nach Wirkprinzip [6]

Lösbarkeit ist eine weitere Eigenschaft, die für die Klassifizierung interessant ist. Bei Sauer [7] wird die Klassifizierung sowohl nach Lösbarkeit als auch nach Wirkprinzip durchgeführt. Eine solche Klassifizierung zeigt Bild 3.

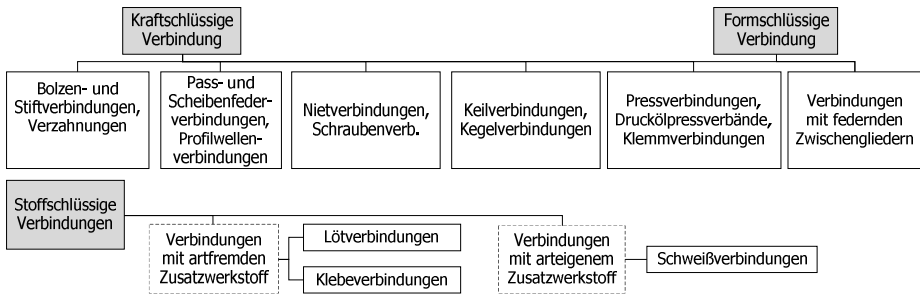


Bild 3: Klassifizierung der Verbindungen nach Wirkprinzip [7]

2.2 Stücklisten

Ein in CAD entwickeltes Produkt wird in den meisten großen Unternehmen samt allen Grunddaten in einem PDM-System abgespeichert. Die Grunddaten können in zwei Kategorien, Stammdaten und Strukturdaten, aufgeteilt werden.

Die Stammdaten, z.B. Artikeldaten, beziehen sich nur auf das dazugehörige Objekt wie z.B. ein Bauteil, eine Baugruppe, ein Produkt, etc. und weisen keine Verknüpfungen zu den anderen Produktdaten auf. Die Strukturdaten verknüpfen die Stammdaten zu einer Struktur. Hierzu gehören auch die Stücklisten. „Eine Stückliste ist die Darstellung aller Komponenten, Systeme, Baugruppen, Einzelteile, Halbzeuge und Werkstoffe, die in ein Erzeugnis eingehen. Informationstechnisch sind Stücklisten spezielle Darstellungsformen hierarchischer Strukturen“ [2]. Ein Beispiel für eine Darstellungsform ist der Gozinto-Graph, welcher in Bild 4 zu finden ist.

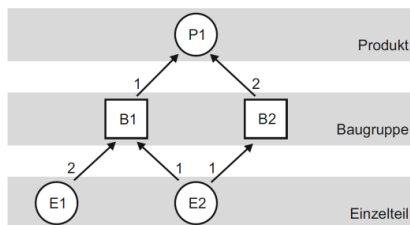


Bild 4: schematische Darstellung einer Stückliste als Gozinto-Graph [2]

Außer der oben beschriebenen Konstruktionsstückliste (E-BOM) gibt es einige andere Arten von Stücklisten wie z.B. Fertigungsstücklisten, Montagestücklisten usw., die Eigner [2] unter dem Begriff Arbeitsstücklisten zusammenfasst.

Eine Fertigungsstückliste (M-BOM) ist im Gegensatz zu einer Konstruktionsstückliste auftragsbezogen und fertigungs- bzw. montageorientiert aufgebaut. Sie ist dafür ausgelegt die Herstellungs- und Montageprozesse zu unterstützen, indem sie fertigungsrelevante Information über die zu fertigenden Elemente beinhaltet.

Die unterschiedlichen Strukturen der Stücklisten werden im Idealfall durch die eindeutigen Artikelnummern (oder andere IDs) der Einzelteile verknüpft. Durch die unterschiedliche Struktur von E-BOM und M-BOM bilden sich unterschiedliche Baugruppen, die mit einer neuen Artikelnummer bezeichnet werden. Dies führt dazu, dass die Verknüpfung bzw. Suche manuell geschieht. Dieser Bruch soll mit dem in dem Paper vorgestellten Konzept abgemildert werden, indem die montagerelevanten Informationen in einem Datenmodell abgespeichert werden, das sowohl für die Produktion als auch für die Konstruktion bereitgestellt wird.

2.3 Formelement und Feature im Bereich des CAD

CAD-Systeme sind heute aus dem Alltag des Konstrukteurs nicht mehr wegzudenken. Mit den Systemen werden komplexe Produktmodelle erstellt, um die Erzeugnisse schon in der frühen Phase auf Fehler zu untersuchen und weniger physikalische Prototypen herzustellen. Unter anderem werden die digitalen Modelle für die Ableitung der technischen Dokumentation benutzt.

Beim Modellieren treten einige Elemente wie z.B. Bohrungen, Phasen usw. häufiger auf als andere auf. Sie können aus mehreren zusammenhängenden Geometrien bestehen, die ein Formelement bilden. Als Formelement werden mehrere geometrische Elemente bezeichnet, die durch zusätzliche strukturelle Informationen zu einer logisch interpretierbaren geometrischen Einheit werden [5]. Ein Beispiel eines Formelements ist in Bild 5 dargestellt. Dieses besteht aus einem zylindrischen Teil (definiert durch Durchmesser und Länge der Bohrung) und einem darunter angehängten Konus, der zusätzliche Informationen über die Spitze des Bohrers enthält.

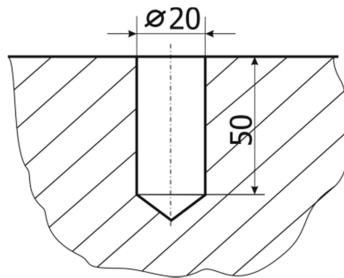


Bild 5: Formelement

Ein Feature erweitert die Definition des Formelements um eine semantische Bedeutung. Die Semantik eines Features wird als Metainformation gespeichert und kann unter anderem Montage- oder Fertigungsinformationen beinhalten. Die VDI 2218 definiert ein Feature als eine Aggregation von Geometrieelementen und/oder Semantik [1]. Ein geometriebezogenes Feature (wie in Bild 6) wird als Form-Feature bezeichnet. Außerdem ist der Zusammenhang zwischen Syntax und Semantik in dieser Abbildung dargestellt. Die Semantik steht hier für eine auswertbare und gewerkspezifische Information [1].

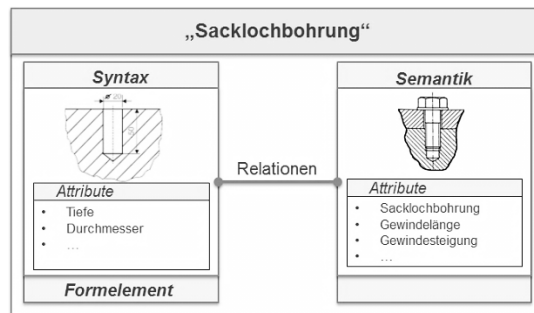


Bild 6: Aggregation von Formelement und Semantik [5]

Das Baugruppenfeature *Komplettverschraubung* von Solid Edge ST 4 soll hier als Beispiel für ein Feature näher erläutert werden.

Bei einer Verschraubung erscheint bei Solid Edge ein Assistent (vgl. Bild 7), der den Konstrukteur fragt, wie die Schraube positioniert werden soll. Die Auswahl der Verschraubungselemente ist durch eine entsprechende Logik eingegrenzt. So lässt sich beispielsweise keine M8-Schraube bei einer Bohrung mit einem Durchmesser von 6mm anwählen.

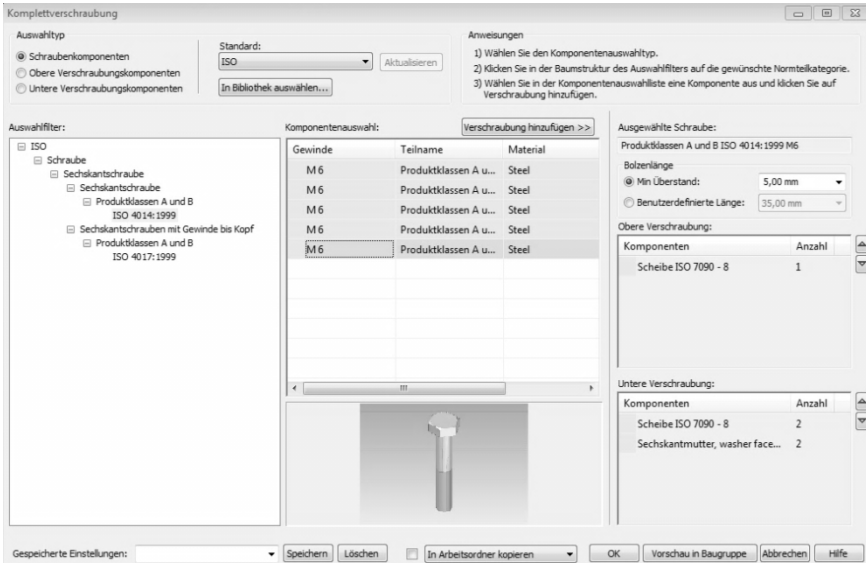


Bild 7: Komplettverschraubungsassistent (Solid Edge ST4)

Auf der linken Seite in Bild 7 sind die vorausgewählten Elemente wie z.B. eine Sechskantschraube dargestellt. Im mittleren Teil wird die Länge der Schraube ausgewählt und rechts die Anzahl der verwendeten Elemente. Bei der Fertigstellung des Assistenten erscheinen die Geometrien in der Baugruppe als ein Feature mit benötigten und vorher ausgewählten Geometrien (vgl. Bild 8). Es ist zu erwähnen, dass die Komplettverschraubung nur in der Baugruppe abgelegt ist.



Bild 8: Darstellung einer Komplettverschraubung in Solid Edge ST4

2.4 Design for Assembly

Die Produktion ist der wichtigste Kostentreiber nach der Konstruktion. Sie verursacht je nach Branche über 30% und verantwortet über 20% der Gesamtprojektkosten. Obwohl ein Drittel der Gesamtprojektkosten von der Pro-

duktion verursacht wird, ist der Einfluss der Montage (als Bestandteil der Produktion) auf die Kosten recht gering. Der weit größere Einfluss auf die Montageeigenschaften eines Produktes liegt üblicherweise bei der Konstruktion, daher ist es wichtig ein Produkt montagegerecht zu entwickeln, um die Anforderungen der Montage erfüllen (Design for Assembly). [3]

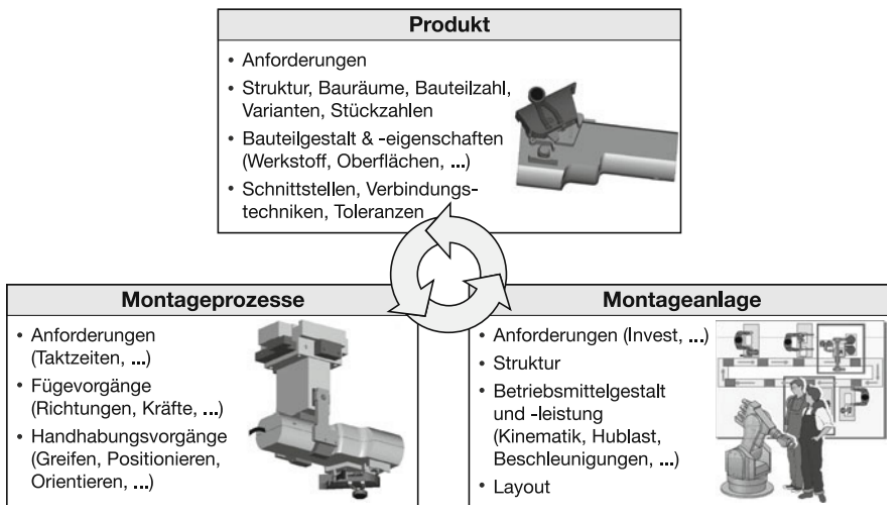


Bild 9: Zusammenspiel von Produkt, Montageprozess und Montageanlage [3]

Nach Design for Assembly ist die Aufgabe der Konstruktion das Produkt so zu gestalten, dass der Aufwand für die Betriebsmittel, Personal und die Montagesteuerung minimiert wird. Dafür sollen die Rahmenbedingungen wie z.B. geforderte Stückzahlen oder vorhandene Montageeinrichtung betrachtet und anschließend dafür passende konstruktive Lösungen realisiert werden. Dieses Zusammenspiel ist in Bild 9 dargestellt.

Lotter [4] gibt mehrere Regeln für eine montagegerechte Konstruktion an und gliedert sie nach Produkt, Baugruppe, Einzelteil usw. Die unten aufgeführten Regeln sind sowohl bei Lindemann [3] als auch bei Lotter zu finden.

- Die Zeit der Einarbeitung und Montage bei der manuellen Montage soll möglichst gering gehalten werden.
- Einfachheit und Zuverlässigkeit bei der automatisierten Montage ist zu priorisieren.
- Produktqualitätsabsicherung soll die Grenzen der Wirtschaftlichkeit nicht übersteigen.

- Eine hohe Wiederholhäufigkeit der Montagevorgänge soll auch bei einer hohen Produktvarianz gewährleistet sein. [3][4]

Auch wenn alle beteiligten Gewerke die Entwicklungsregeln für montagegerechte Produktgestaltung befolgen, reicht es oft nicht aus, da der Informationsfluss nicht ideal verläuft. Das im Folgenden dargestellte Konzept soll dieses Problem abmildern und die Zusammenarbeit aller Beteiligten über alle Planungs- und Entwicklungsphasen fördern. [4]

3 Vorgehen

3.1 Klassifizierung und Auswahl der Verbindungselemente

Für die vorliegende Arbeit werden die Verbindungen nach Lösbarkeit und Wirkprinzip klassifiziert. Die Klassifizierung ist in Bild 10 dargestellt.

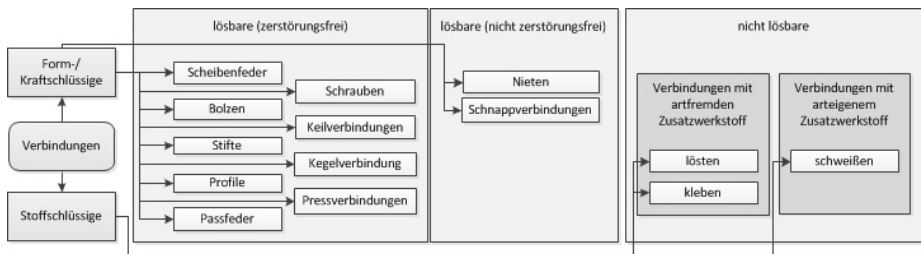


Bild 10: Verbindungselementklassifizierung

Während bei nicht lösbaren Verbindungen keine weitere Unterteilung stattfindet, werden lösbare Verbindungen noch in die Unterklassen *zerstörungsfreie* und *nicht zerstörungsfreie* Verbindungen aufgeteilt. Bei zerstörungsfreien Verbindungen kann das Verbindungselement nach einer Demontage in den meisten Fällen wieder für die Montage verwendet werden, was nicht auf die zweite Kategorie zutrifft. Beispielsweise kann eine Niete nicht wiederverwendet werden, da sie beim Lösen ausgebohrt wird. Bei nicht lösbaren Verbindungen ist es nicht möglich das Objekt zerstörungsfrei zu demonstrieren.

3.2 Parameter und Eigenschaften einer Schraubenverbindung

Schrauben gehören nach wie vor zu den meistverwendeten Verbindungselementen im Maschinenbau [7]. Daher werden im Folgenden die Parameter

einer Schraubenverbindung einer Sechskantschraube mit Schaft (nach DIN EN ISO 4014) exemplarisch analysiert. Diese ist in Bild 11 dargestellt.

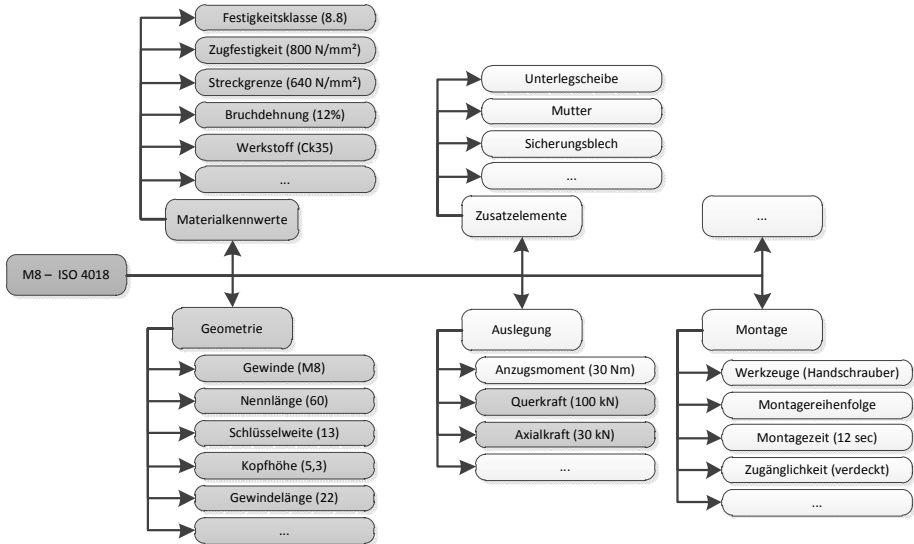


Bild 11: Beispiele für Parameter und Eigenschaften einer Schraubenverbindung (M8 – ISO 4018)

Einige Parameter sind (hier in dunklerem Grau dargestellt) bereits durch die Schraube selbst determiniert und lassen sich daher meist leicht bestimmen. Andere Parameter wie beispielsweise die Zusatzelemente (Unterlegscheiben, Muttern, etc.) sowie das Anzugsmoment, aber auch Parameter aus dem Bereich *Montage* lassen sich nicht direkt der Schraube selbst, sondern nur der gesamten Verschraubung zuordnen.

3.3 Datenmodell

Die in Kapitel 3.2 dargestellten Parameter und Eigenschaften einer Schraubenverbindung sollen künftig in einem PDM-System gespeichert werden um sie so für alle Bereiche einfach und transparent zugänglich zu machen. Zur Speicherung der Daten ist ein entsprechendes Datenmodell notwendig.

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, lassen sich einige Daten direkt mit der Schraube selbst in Verbindung bringen und sollten (bzw. vielfach ist dies bereits der Fall) daher auch an dieser Stelle gespeichert werden. Auch die unter

der Kategorie *Zusatzelemente* zusammengefassten Teile wie Unterlegscheiben, Muttern, etc. stellen keine große Herausforderung dar, da diese in der Regel bereits in der Montagestückliste gespeichert werden.

Für die übrigen Parameter sind jedoch Erweiterungen der Datenmodelle von PDM-Systemen notwendig. Da es sich um montagerelevante Informationen auf Baugruppenebene (Assembly) handelt, sollten diese in der Montagestückliste (M-BOM) an eben jener Stelle verortet werden, wie Bild 12 exemplarisch für die Tabelle *Werkzeug* verdeutlicht.

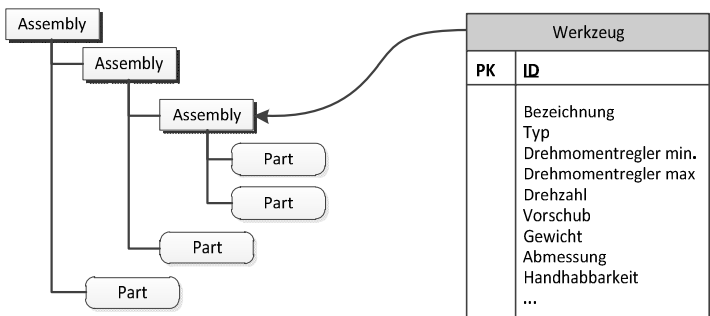


Bild 12: Beispielhafte Erweiterung des Datenmodells eines PDM-Systems

Leider haben heute viele produzierende Unternehmen noch nicht die Vorteile erkannt, die sich durch die Verwaltung der M-BOM im PDM-System ergeben, sondern verwalten diese meist noch rein in PPS-Systemen. Dadurch wird jedoch dem Produktentwickler eine entscheidende Chance genommen sich mit der Montage und deren Abläufen zu identifizieren und die Entwicklung auf diesen Bereich auszurichten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Von dem in diesem Paper vorgestellten Konzept wird erwartet, dass die Systemwelten aus Konstruktion und Produktion über ein neutrales Datenmodell zur Speicherung von Verbindungselementen verbunden werden. Die zentral gespeicherten Informationen über Montageinhalte werden sowohl für die Produktion als auch für die Entwicklung aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Dadurch eröffnen sich neue Möglichkeiten für die erfahrungsbasierte Produktentwicklung.

Die in CAD-Systemen angezeigten, montagerelevanten Informationen unterstützen den Entwickler bei der Auswahl der Verbindungselemente, wodurch

seine Rechercharbeit nach schon verwendeten Verbindungsarten deutlich reduziert wird. Die Anzahl der Verbindungselemente kann durch die gestiegene Transparenz und nachfolgende Standardisierung reduziert werden. Somit lassen sich wenig benutzte Elemente eliminieren. An die in der Baugruppe verwendeten Verbindungselemente können vorhandene Montageerfahrungsberichte angehängt werden, damit bei der Neuentwicklung kritische Stellen oder technologische Parameter optimiert werden können.

Das vorgestellte Konzept ist ein Teil des vom BMBF geförderten Verbundprojekts Pro Mond (Prospektive Ermittlung von Montagearbeitsinhalten in der Digitalen Fabrik). Es bedient die konstruktive Seite des Projekts. Die Seite der Produktion wird von APS (TU Dortmund) bearbeitet. Nach der Fertigstellung des Konzepts wird eine Validierung bei Anwenderunternehmen (Daimler Trucks - Mannheim, Miele - Gütersloh, KHS - Dortmund) durchgeführt. Das Projekt zielt auf eine prospektive Ermittlung der Montageinhalte in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses ab, wodurch eine Effizienzsteigerung erwartet wird.

Literatur

- [1] VDI Richtlinie: "VDI 2218", 2003
- [2] Eigner, M.: "Product lifecycle management", Springer-Verlag, London, 2008.
- [3] Ponn, J. Lindemann, U.: "Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte", Springer-Verlag, Heidelberg, 2011.
- [4] Lotter, B. Wiendahl, H.-P.: "Montage in der industriellen Produktion", Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [5] Quelle: Prof. Dr.-Ing. R. Anderl, Dik – TU Darmstadt
- [6] Haberhauer, H. Bodenstern, F.: "Maschinenelemente", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [7] Albers, A., Sauer, B. Steinhilper, W.: "Konstruktionselemente des Maschinenbaus", Springer-Verlag; Berlin, 2008.

Nutzung von „Merkmalen“ und „Eigenschaften“ zur Beschreibung und Analyse von Produktvarianz

Nicolas Gebhardt, Karen Malone, Dieter Krause
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik;
Technische Universität Hamburg-Harburg*

To meet the changing requirements of today's markets, variety-oriented product development becomes more and more important. The integrated PKT-approach for Developing Modular Product Families provides methodical tools to support this task and has been successfully tested in industry. Nonetheless, evaluation of these applications has shown room for improvement regarding the user-friendliness and work effort. Especially the models used to visualize and improve product families in development seem to be a promising field of improvement. In this contribution, an adapted model for the analysis of product variety is presented as a first step in this regard.

1 Einleitung und Motivation des Beitrages

Um im stärker und globaler werdenden Wettbewerb Marktanteile zu sichern, diversifizieren viele Unternehmen ihr Angebot immer weiter. Der Kunde soll dabei eine individuell für seine Bedürfnisse zugeschnittene Produktvariante zu konkurrenzfähigen Preisen erhalten [1]. Für die Produktentwicklung bedeutet dies zum einen, die geforderte Angebotsvielfalt mit einer geringen internen Vielfalt an Komponenten zu realisieren. Zum anderen sollten Produktstrukturen auch eine aufwandsarme Entwicklung künftig notwendiger Varianten ermöglichen.

Die Entwicklung modularer Produktfamilien ist dabei eine gängige Strategie, um Produkte für diese Bedingungen zu strukturieren. Variante Anteile der Produkte können zum Beispiel geschickt in Form von Modulen entkoppelt werden und mit diesen die benötigten Produktvarianten spät im Produktionsprozess einfach konfiguriert werden [2].

Die Entwicklung und Pflege von modularen Produktfamilien stellt die Produktentwicklung vor besondere Herausforderungen. In der jüngeren Vergangenheit sind aus diesem Grund mehrere Ansätze entstanden, um Entwickler in dieser Aufgabe methodisch zu unterstützen (z.B. VMEA [3], Variantenoptimierte Gestaltung [4], Design for Variety [5]). Aufgrund der Aktualität des Themas und des weiterhin bestehenden Bedarfes wurde auf Basis bestehender Ansätze am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien entwickelt (siehe Bild 1-1 und [6]). Der Ansatz basiert auf den zwei Methodenbausteinen „variantengerechte Produktgestaltung“ und „Lebensphasenmodularisierung“ und wird darüber hinaus laufend durch weitere Bausteine ergänzt, um einen für individuelle Problemstellungen anpassbaren Methodenbaukasten bereitzustellen.

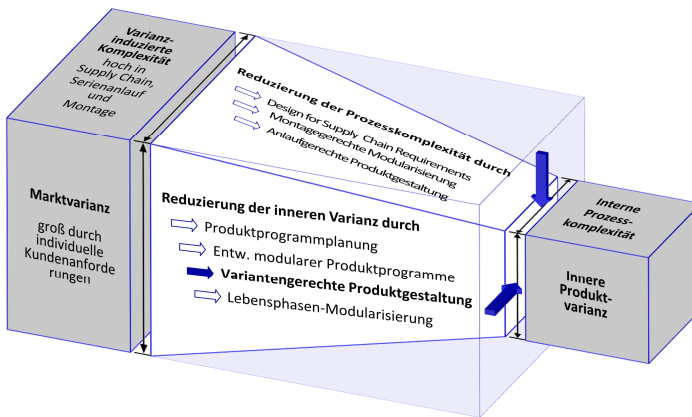


Bild 1-1: Bausteine des integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien und Einordnung dieses Beitrages

Der Ansatz ermöglicht dabei durch die Methodenbausteine eine problemorientierte Unterstützung der Entwicklung modularer Produktfamilien. Visualisierende Modelle dienen der gezielten Analyse und Entscheidungsfindung bei bestimmten Entwicklungsschritten.

Der integrierte PKT-Ansatz wurde in zahlreichen Anwendungsfällen in verschiedenen Unternehmen erprobt – sowohl durch die Entwickler der Methodenbausteine als auch durch geschulte Anwender. Durch regelmäßige Gespräche, Fragebögen und der Auswertung der in den Projekten erstellten Dokumente wurden die Anwendungen hinsichtlich der Zweckmäßigkeit, Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit des integrierten PKT-Ansatzes ausgewertet [7]. Hierbei erwies sich eine sehr gute Zweckmäßigkeit und Anwendbarkeit des Vorgehens. Allerdings stellt zum einen der Anwendungsaufwand eine Barriere zur breiten Anwendung in der Industrie als eigenständiger Arbeitsschritt da. Zum anderen ist die grundsätzliche Verständlichkeit der Produktbeschreibung mithilfe von Funktionen und Wirkprinzipien in der Industrie tlw. nicht ausreichend gegeben. Trotz vielversprechender Ergebnisse und positiver Resonanz aus den Unternehmen zeigte sich daher eine breite Anwendung in der Industrie als erschwert.

Auf Basis der ausgewerteten Anwendungsfälle und weiterer Analysen der Prozesse des integrierten PKT-Ansatzes wurden die **Visualisierungsmodelle für Produktfamilien** und der **Wissenstransfer** als wesentliche Schwerpunkte für die Weiterentwicklung abgeleitet [7], [8] (siehe Bild 1-2). In diesem Beitrag wird nun ein erster Verbesserungsansatz für die verwendeten Visualisierungsmodelle des Ansatzes vorgestellt. An diesem Beispiel wird dabei aufgezeigt, welchen Einfluss die Auswahl des grundlegenden Prinzips einer Produktmodellierung auf die mit Hilfe des Modells bearbeitete Entwicklungsaufgabe hat. Langfristig soll durch standardisierte und ganzheitliche Visualisierungsmodelle die Anwendung von Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien unterstützt werden.

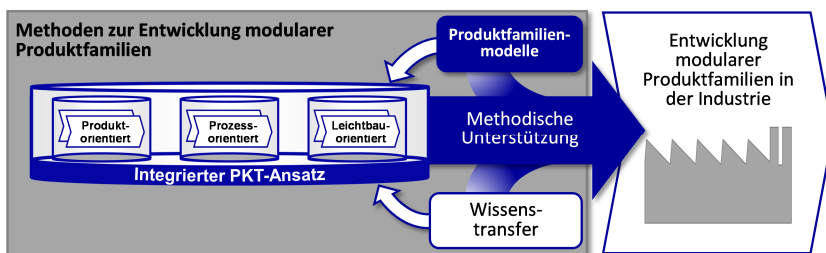


Bild 1-2: Unterstützung durch Wissenstransfer und Produktfamilienmodelle im Rahmen des integrierten PKT-Ansatzes [8]

Der hier betrachtete Arbeitsschritt im integrierten PKT-Ansatz ist die Analyse der Varianz einer Produktfamilie zur anschließenden Optimierung der Strukturen (siehe Bild 1-1 und Kapitel 2) im Rahmen der „variantengerechten

Produktgestaltung". Gerade durch diesen Methodenbaustein ließen sich sehr gute Verbesserungen der Produktfamilienstrukturen bezüglich einer Verringerung der internen Vielfalt erzielen. Gleichzeitig weisen jedoch viele Indizien bei diesem Arbeitsschritt deutlich auf Verbesserungspotenziale bezüglich der Benutzerfreundlichkeit hin. Es fällt auf, dass Anwender die Methode bewusst und unbewusst adaptieren, um den Arbeitsablauf zu optimieren, wobei ebenfalls Anwendungsfehler mit negativen Auswirkungen auf die Ergebnisse auftreten. Die Fragestellung ist also, wodurch eine eigenständige Beherrschung der Aufgabe in der Industrie ohne externe Unterstützung erschwert wird und wie diese besser unterstützt werden kann ohne die grundlegende Systematik und Wirksamkeit zu verschlechtern.

2 Vorstellung der variantengerechten Produktgestaltung

Im durch Kipp entwickelten Methodenbaustein „variantengerechte Produktgestaltung“ des integrierten PKT-Ansatzes wird sowohl die geplante Angebotsvielfalt einer Produktfamilie als auch die interne Vielfalt aufgenommen, miteinander kausal vernetzt, analysiert und optimiert [6]. Als zentrales visualisierendes Modell dient hierbei das **Variety Allocation Model (VAM)**, welches die externe und interne Vielfalt auf einer bzw. drei verschiedenen Abstraktionsebenen darstellt (siehe Bild 2-1).

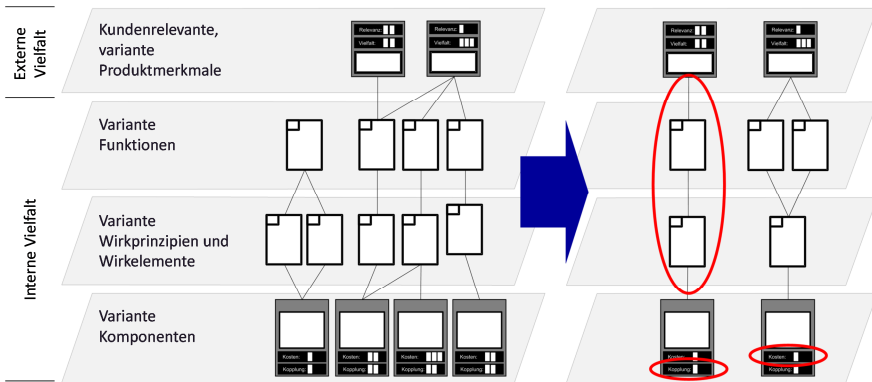


Bild 2-1: Variety Allocation Model (VAM) zur Analyse und Optimierung der Varianz im Rahmen der variantengerechten Produktgestaltung (links Aufnahme des Ist-Zustandes, rechts optimierte Produktfamilie) nach [6]

Zur Aufnahme und Beschreibung der Angebotsvielfalt werden die Merkmale der Produktvarianten verwendet, die aus Kundensicht diese verkaufswirksam differenzieren. Die interne Vielfalt der Produktfamilie wird auf den

weiteren drei Ebenen – angelehnt an die Gliederung des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl & Beitz [9] – durch Funktionen, Wirkprinzipien bzw. -elemente und schließlich Komponenten beschrieben. Nach Aufnahme der varianten Elemente werden diese im VAM kausal verknüpft, sodass ersichtlich wird, durch welche Komponentenvarianz welche kundenrelevanten Produktmerkmale konfiguriert werden können. Durch Analyse der Verknüpfungen im VAM können hierbei Schwachstellen in der Struktur der Produktfamilie erkannt und bearbeitet werden. So ist z.B. eine isolierte Verknüpfung einer varianten Produktmerkmale zu einer Komponente oder wenigstens einem Satz an Komponenten anzustreben, um eine einfache Konfiguration dieses Merkmal unabhängig von anderen zu ermöglichen (siehe Bild 2-1). Variante Elemente in den drei internen Ebenen sind des Weiteren auf ein Minimum zu reduzieren.

3 Problemanalyse

Die durchgeführten Fallstudien zum integrierten PKT-Ansatz weisen auf Verbesserungspotenziale der Benutzerfreundlichkeit im Rahmen des Methodenbausteins „variantengerechte Produktgestaltung“ hin [7]. Dabei ist Anwenden das grundlegende Prinzip der Varianzanalyse gut verständlich. Der Umgang mit der Varianzanalyse wird jedoch häufig als zu abstrakt und aufwändig angesehen.

Auffallend ist, dass die Produktbeschreibung und -analyse durch Funktionen und Wirkprinzipien in Industrieunternehmen selten angewendet wird. Der Erstellungsaufwand und die Verständlichkeit des VAMs werden dadurch eingeschränkt; die Kommunikation der Ergebnisse wird erschwert. Durch diese von der Praxis abweichende Modellierung entstehen zudem Unsicherheiten bei der Formulierung der Ebenen, so dass diese nicht mehr im Sinne der eigentlichen Definition genutzt werden. In der Folge ergibt sich sehr häufig eine 1:1-Zuordnung zwischen Funktionen und Wirkprinzipien. Trotz eines hohen Arbeitsaufwandes geht dadurch der Mehrwert durch diese Aufgliederung tlw. verloren.

Im Gegensatz zu der Beschreibung der Varianz in Funktionen und Wirkprinzipien bereitet die Beschreibung der externen und internen Vielfalt durch Angebotsvielfalt und Komponenten in der Praxis keine Probleme. Um eine Verbesserung hinsichtlich der Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit zu erreichen, bietet sich also eine alternative Beschreibung des Abstraktionsschrittes zwischen externer und interner Vielfalt an, mit der allerdings die grundlegende Systematik und Wirksamkeit der Methodik nicht verschlechtert werden sollte.

4 Stand der Technik

Das größte Verbesserungspotential ist in einer alternativen Strukturierung der Abstraktionsschritte Funktionen und Wirkprinzipien zu sehen – sei es durch eine zusammenfassende Beschreibung der Abstraktionsschritte oder durch ein grundlegend anderes Produktverständnis.

In der Literatur finden sich dazu verschiedene Ansätze der Produktmodellierung. Der Ansatz von Pahl und Beitz [9] sieht im Verlaufe des Entwicklungsprozesses die Partialmodelle Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien und schließlich Komponenten vor. An dieses Prinzip lehnen sich die Abstraktionsschritte des VAM derzeit an. Alternativ dazu existieren andere Ansätze. So sieht z.B. Weber den Produktentwicklungsprozess als Abfolge von Synthese und Analyse zwischen den Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes an [10]. Die Domain Theory nach Andreasen wiederum definiert mit „transformation domain“, „organ domain“ und „part domain“ drei verschiedene Sichten auf das Produkt, deren Modelle in strukturelle Modelle („constitutive models“) sowie Verhaltensmodelle („behavioural models“) unterteilt werden [11]. Jiao & Tseng differenzieren auf Grundlage des „Axiomatic Design“ eine funktionale, eine technische und eine physikalische Sicht [12], [13]. Auf diesen Ansätzen bauen verschiedene Visualisierungen für diese Sichten auf. Dazu gehören zum Beispiel der „function-means tree“ [11] oder der „Product Family Master Plan“ nach Harlou [14].

Die genannten Ansätze konzentrieren sich auf unterschiedliche Aspekte der Produktentwicklung. Bezüglich einer alternativen Strukturierung der Abstraktionsschritte Funktionen und Wirkprinzipien ergibt sich jedoch ein recht einheitliches Bild, das sich von Abstraktionsschritten Funktionen und Wirkprinzipien nach Pahl und Beitz deutlich unterscheidet. In der unterschiedlichen Diktion nehmen die Ansätze eine vergleichbare Strukturierung eines Produktes in seine internen und externen Attribute vor. Weber nennt diese Attribute die „Merkmale“ und „Eigenschaften“ eines Produktes [10]. Dabei bezeichnen die Merkmale eines Produktes die direkt durch den Entwickler beeinflussbare Attribute wie z.B. Struktur oder Form. Demgegenüber ergeben sich die Eigenschaften eines Produktes aus dessen Verhalten im Betrieb, sie können nicht direkt vom Entwickler beeinflusst werden. Beispiele sind hier die Funktion oder die Zuverlässigkeit. Hubka unterscheidet mit vergleichbarer Definition zwischen „Konstruktionseigenschaften“ und „externen Eigenschaften“ [15]. DIN 2330 trennt Produktattribute in die drei Gruppen „Beschaffenheitsmerkmale“, „Funktionsmerkmale“ und „Relationsmerkmale“ [16]. Die strukturellen und Verhaltensmodelle des „Genetic Design Model System“ nach Mortensen werden durch die Merkmale („characteristics“) und Eigenschaften („proper-

ties“) des Systems beschrieben [11]. Suh definiert im „Axiomatic Design“ den Konstruktionsprozess als Umsetzung von Kunden geforderter „functional requirements“ durch „design parameter“ [13].

5 Lösungskonzept

Die im Stand der Technik beschriebene grundlegende Modellierung eines Produktes durch externe und interne Attribute bietet sich auch für die Beschreibung der Produktvarianz an. Ergänzt durch die Komponenten eines Produktes führt dies zu der rechts in Bild 5-1 gezeigten dreistufigen Darstellung der Produktvarianz durch **kundenrelevante Eigenschaften**, **technische Merkmale** und **Komponenten** in einem angepassten VAM.

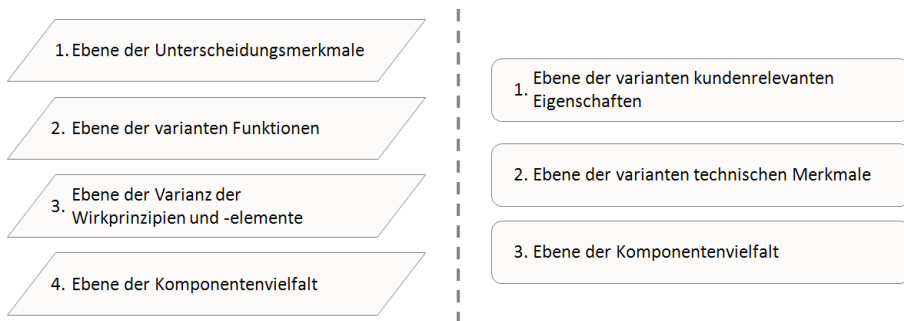


Bild 5-1: Strukturierung des klassischen (links) und angepassten VAM (rechts)

Die Erfassung der externen und internen Varianz, abgebildet durch die varianten kundenrelevanten Eigenschaften und die varianten Komponenten, ist dadurch weiterhin möglich. Die Beschreibung mithilfe von „technischen Merkmalen“ verspricht bei geringerem Beschreibungsaufwand eine gute Verständlichkeit. Um widersprüchliche Begrifflichkeiten zu vermeiden, wird der Begriff „kundenrelevante Eigenschaften“ auch für die erste Ebene des angepassten VAMs übernommen (siehe Bild 5-1). Eine verbesserte bildliche Darstellung der Varianz auf Komponentenebene, die die varianten Anteile der Komponenten und deren Abhängigkeiten deutlicher visualisiert, rundet das Konzept ab (siehe Bild 6-2 unten).

6 Anwendungsbeispiel

Zur Erprobung wurde das Lösungskonzept eingesetzt, um die Varianz einer Familie von Herbizid-Sprühgeräten [6] zu erfassen. Bild 6-1 sowie Bild 6-2 zeigen die Darstellung der Produktvarianz sowohl im klassischen VAM mit

Funktionen und Wirkprinzipien als auch im angepassten VAM mit Eigenschaften und technische Merkmale beschrieben.

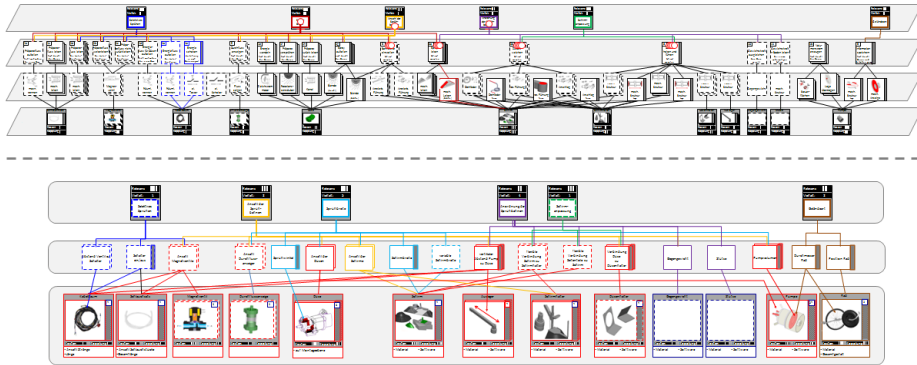


Bild 6-1: Gesamtübersicht der Produktvarianz im klassischen VAM (oben, nach [6]) und im angepassten Modell (unten); Detaildarstellung siehe Bild 6-2

Die Beschreibung der gesamten Varianz ist dabei im angepassten VAM mit erheblich weniger Elementen möglich. Auch die Erstellung ist durch die Verwendung von technischen Merkmalen anstelle von Funktionen und Wirkprinzipien deutlich praxisnäher. Durch die bildliche Darstellung der Komponenten, die eine direkte Zuordnung der varianten Merkmale zu den beeinflussten Geometrie der Komponenten vorsieht, wird ein besseres Verständnis der Zusammenhänge ermöglicht (siehe Bild 6-2 unten). Die Verknüpfung der externen und internen Varianz durch technische Merkmale vereinfacht darüber hinaus das Verständnis der kausalen Zusammenhänge zwischen diesen Größen. Ursachen für Abhängigkeiten der Produkteigenschaften untereinander werden deutlicher. Eine Kommunikation der Ergebnisse und Überprüfung einer korrekten Abbildung der Varianz im Produktfamilienkonzept wird damit besser unterstützt.

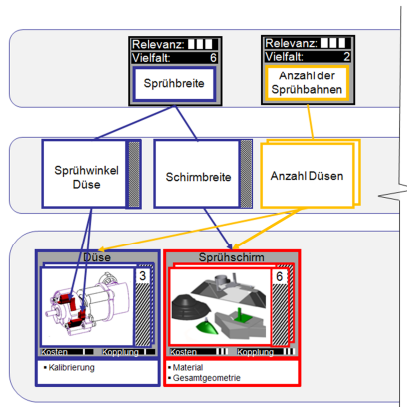
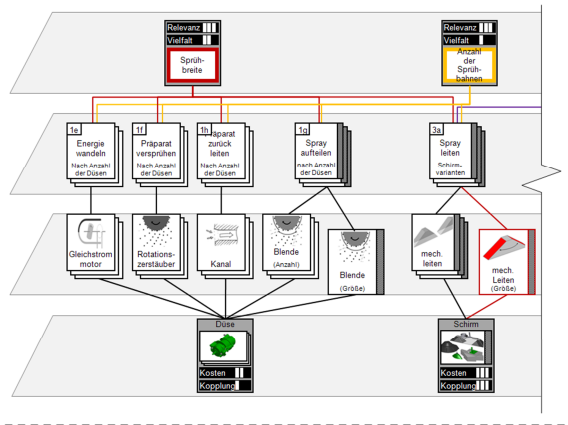


Bild 6-2: Detaildarstellung in der Systematik des klassischen (oben, nach [6]) und angepassten VAMs (unten)

Die Analyse der Produktvarianz im angepassten VAM führte zur Identifikation derselben Entwicklungsschwerpunkte wie die klassische Darstellung. Aufgrund der besseren Verständlichkeit und des geringeren Arbeitsaufwandes ist das angepasste VAM dem klassischen für reine Analyseaufgaben und bei kleineren konstruktiven Änderungen vorzuziehen. Für eine grundlegende Überarbeitung einer Produktfamilie sollte die interne Varianz jedoch detaillierter beschrieben werden. In diesem Zusammenhang ist die klassische Darstellung vorzuziehen.

7 Einordnung des Vorgehens in den integrierten PKT-Ansatz

Diese einfachere Erstellung und bessere Verständlichkeit des angepassten VAMs zusammen mit dem Nachteil einer geringeren Eignung zur grundlegenden Überarbeitung der Gestaltung legen die Nutzung als vorgeschalteten Analyseschritt nahe (siehe Bild 7-1). In diesem daher als **Analyse-VAM** bezeichneten Modell können auch umfangreichere Produktfamilien mit verringertem Aufwand untersucht und bewertet werden. Einzelne Problemschwerpunkte können anschließend in den Entwicklungsteams durch einen **Optimierungs-VAM** unterstützt werden. Dieses Vorgehen kommt den oben aufgeführten Forderungen nach einem geringeren Arbeitsaufwand und einer besseren Kommunizierbarkeit der Ergebnisse entgegen.

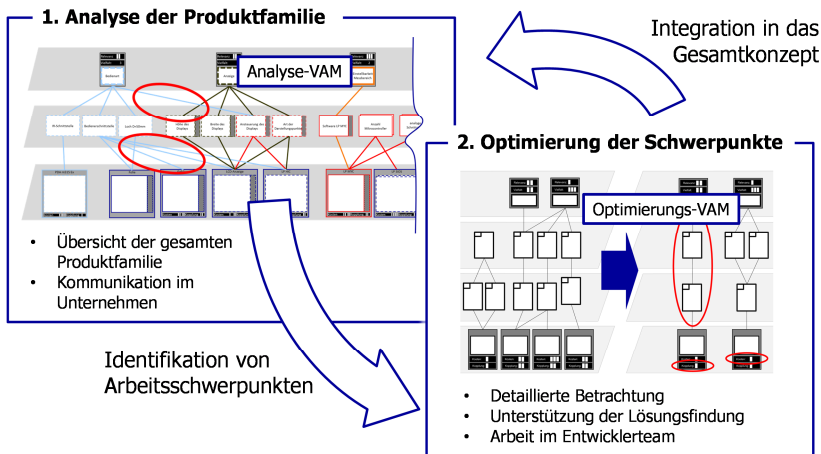


Bild 7-1: Erweiterter Ansatz zur Analyse und Optimierung der Variantengerechtigkeit von Produktfamilien

8 Ausblick

Zur grundlegenden Validierung wird das vereinfachte Vorgehen der Varianzanalyse aktuell u.a. an Flugzeugkabinen und Gabelstaplern in der Industrie erprobt, um erste Rückschlüsse zur Eignung und Benutzerfreundlichkeit ziehen zu können. Weiterhin ist zu klären, unter welchen Bedingungen unterschiedlichen Varianten des VAMs zur idealen Ausnutzung der Ressourcen eingesetzt werden können. Als weitere Verbesserungsmöglichkeiten der Varianzanalyse sind vornehmlich die Integration der durch die Komponentenvarianz ausgelösten Prozessvarianz sowie der Produktgeometrie in Arbeit.

Langfristig soll für den gesamten integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien die Benutzerfreundlichkeit durch einen verringerten Arbeitsaufwand und einer besseren Verständlichkeit unterstützt werden. Hierzu soll eine Systematik zur Modellierung und Visualisierung der relevanten Produktdaten entwickelt und diese mit einer Methodik des Wissenstransfers kombiniert werden (siehe auch [7] und [8]).

Literatur

- [1] Rathnow, P. J.: „Integriertes Variantenmanagement – Bestimmung, Realisierung und Sicherung der optimalen Produktvielfalt“, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1993.
- [2] Ericsson, A., Erixon, G., „Controlling Design Variants: Modular Product Platforms“, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, 1999.
- [3] Schuh, G.: „Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten“, Fortschritts-Berichte VDI, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [4] Franke, H.-J. et al.: "Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung", Carl Hanser Verlag, München, 2002.
- [5] Martin, M. V.: „Design for Variety: A methodology for developing product platform architectures“, Stanford University, 1999.
- [6] Kipp, T.; Blee, C.; Krause D.: Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien, Design for X - Beiträge zu 21. DfX-Symposium, Hamburg (2010) pp. 157 - 168.
- [7] Eilmus, S.; Gebhardt, N.; Rettberg, R.; Krause, D.: "Evaluating a methodical approach for developing modular product families in industrial case studie." 12th International Design Conference - Design 2012, Dubrovnik, Kroatien, S. 837-846., 2012.
- [8] Gebhardt, N.; Beckmann, G.; Krause, D.: Product Family Models and Knowledge Transfer Support for the Development of Modular Product Families, Proceedings of norddesign2012, Aalborg, Dänemark, 2012.
- [9] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.

-
- [10] Weber, C.: „Looking at 'DFX' and 'Product Maturity' from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes.“, in: Krause, F.-L. (Hrsg.), Proceedings of the 17th CIRP Design Conference, „The Future of Product Development“, TU Berlin / Fraunhofer-IPK, Springer Verlag, Berlin, S. 85-104, 2007.
- [11] Mortensen, N.H., Hansen, C.T.: „Structuring as a basis for Product Modelling“, in: „Critical Enthusiasm, Contributions to Design Science“, Tapir, Trondheim, S.111-128, 1999.
- [12] Jiao, J., Tseng, M.: „A methodology of developing product family architecture for mass customization“, in: „Journal of Intelligent Manufacturing“, Bd. 10, S. 3-20, 1999.
- [13] Suh, J.P.: „The Principles of Design“, Oxford University Press, New York, 1990.
- [14] Harlou, Ulf: „Developing product families based on architectures – Contribution to a theory of product families“, Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Kopenhagen, 2006.
- [15] Hubka, V.: „Theorie technischer Systeme – Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre“, Springer Verlag, Berlin, 1984.
- [16] Ehrlenspiel, K.: „Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit“, Hanser, München, 2007.

Zielsystemorientiertes Variantenmanagement einbaufertiger Systembaugruppen

Albert Albers, Markus Walch und Quentin Lohmeyer
IPEK - Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

The paper considers the conceptualization of a systemic approach that supports the designer in the efficient selecting of existing product variants within the tender phase. Its central idea is that for every element in a data base there is always a pair of a design solution (CAD model) and a corresponding system of objectives that is reasoning this design solution. The approach is described in detail using the examples of camshaft systems.

1 Ausgangssituation

In der Automobilindustrie ist der Trend zu beobachten, dass OEMs zunehmend Systemverantwortung an ihre Zulieferer abgeben und sich auf diese Weise einbaufertige Baugruppen aus einer Hand direkt an das Montageband anliefern lassen. Die Autoren können auf Basis ihrer mehrjährigen Industrieerfahrung bestätigen, dass sich dieser Trend auch bei der Entwicklung von Antriebssystemen deutlich abzeichnet. Die wachsende Nachfrage nach einbaufertigen Systembaugruppen führt zu einer Steigerung des organisatorischen und konstruktiven Aufwandes bei den Zulieferfirmen, weshalb die Lösungsauswahl in der Angebotsphase auf Basis unternehmensspezifischer Produktvarianten einen zunehmend höheren Stellenwert einnimmt. Erschwerend kommt hinzu, dass die Forderung nach einbaufertigen Systemkomponenten direkte Auswirkungen auf das Design der Baugruppen hat, und zudem die Zeiträume, die zwischen Kundenanfrage und Angebotsabgabe gewährt werden, sehr eng bemessen sind.

Zur Verdeutlichung des Verbesserungspotentials bei der Variantauswahl und dem daraus resultierenden Unterstützungspotential von Konstruktionsabteilungen während der Angebotserstellungsphase zeigt Bild 1 ein vereinfachtes, exemplarisches Szenario.

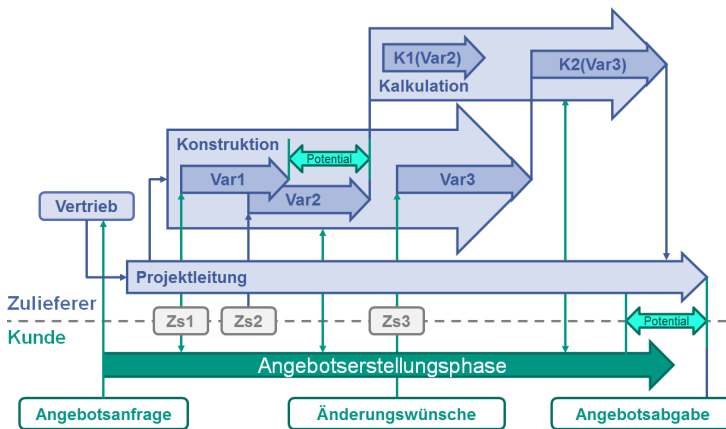


Bild 1: Beispiel eines Variantenauswahlprozesses in der Angebotsphase

Bei dem in Bild 1 dargestellten Beispielszenario sind auf Seite der Zulieferfirma die Bereiche Vertrieb, Projektleitung, Konstruktion (Produktdesign- und Werkzeugkonstruktion) und Kalkulation unmittelbar am Angebotserstellungsprozess beteiligt. Die Kundenanfrage wird über den Vertrieb an die zuständigen Produktexperten der Projektleitung weitergeleitet, die eine erste grundlegende Prüfung der Anfrage vornehmen. Im Anschluss daran wird in wechselseitigem Informationsaustausch zwischen Kunde, Projektleitung und Konstruktion auf Grundlage der Kundenzielvorstellungen sowie zulieferspezifischen Gegebenheiten und Randbedingungen ein initiales Zielsystem entwickelt (Zs1 in Bild 1), das den Anforderungen und Bedingungen auf Kunden- und Zulieferseite in beiderseits einvernehmlicher Weise befriedigt. Trotz oft vager Kundenzielvorstellungen ist der Informationsstand zu diesem Zeitpunkt häufig hinreichend, so dass mit der Konstruktion begonnen werden kann.

Die Preiskalkulation der Produktvarianten basiert für stark kundenspezifische bzw. hochgradig individualisierte Produktausprägungen (vgl. [1]) auf einem Zeichnungssatz, der sämtliche Einzelteilzeichnungen (Roh- und Fertigteile) sowie Zusammenbau- und Bearbeitungszeichnungen zur Abbildung der Fertigungsabfolge enthält. Besonders bei komplexen Baugruppen wird die initiale Unsicherheit häufig bewusst in Kauf genommen, um frühzeitig mit der Produktdesign- und Zeichnungserstellung einer favorisierten Lösung beginnen

zu können, damit anschließend der Kalkulationsabteilung noch hinreichend Zeit für deren Aktivitäten bleibt. Der aufgrund des Zeitdruckes möglicherweise zu frühe Konstruktionsbeginn führt vielfach dazu, dass durch eine detailliertere Begutachtung der seit Angebotseingang vorliegenden Kundeninformationen eine ursprüngliche Produktvariante (Var1 in Bild 1) nochmals überdacht werden muss. Parallel wird häufig mit der Ausdetaillierung einer zweiten Variante basierend auf einem aktualisierten Zielsystem (Zs2 und Var2 in Bild 1) begonnen, um sich mehrere Lösungsvarianten bis zum finalen Entscheid offen zu halten. Aufgrund massiver Bindung von Konstruktionskapazitäten durch die parallele Variantenentwicklung muss letztlich die Entscheidung auf einen Lösungspfad fallen, für den ein Produktdatensatz als Grundlage für die Preiskalkulation (K1(Var2) in Bild 1) erstellt wird.

Neben intern getriebenen Änderungen während des Konstruktionsprozesses kann der Fall eintreten, dass der Kunde unvorhersehbare Änderungen wünscht, die erhebliche Auswirkungen auf das Zielsystem und damit auf die Angebotserstellung haben können. Ist es dem Kunden aufgrund eigener Restriktionen nicht möglich Kompromisse bei der Variantenauswahl einzugehen oder einen Aufschub des Angebotsabgabetermins zu gewähren, so muss vielfach der favorisierte Lösungsweg verworfen und mit der Ausarbeitung einer neuen Variante begonnen werden (Var3 in Bild 1), die im ungünstigsten Fall wenig mit den Vorgängervarianten gemein hat, so dass nur in geringem Umfang auf bereits geleistete Vorarbeiten zurückgegriffen werden kann.

2 Zielsetzung

Um auf Kundenanfragen innerhalb der geforderten Zeitvorgaben reagieren zu können, muss im Hinblick auf die stetig steigende Produktkomplexität und Produktvielfalt auf abgeleitete Varianten auf Basis eines Grundbaukastens zurückgegriffen werden. Die Schwierigkeit bei der Lösungsauswahl liegt dabei in der initialen Unsicherheit infolge unscharfer Zielvorstellungen sowie des trägen Informationsaustauschs. Der aufgrund sinkender Entwicklungszeiträume in Zukunft zunehmende Zeitdruck verstärkt die Unsicherheit, so dass es häufig zur Konstruktion mehrerer Varianten kommt, was mit einem erhöhten Entwicklungsaufwand verbunden ist.

Neben einer klaren und transparenten Kundenkommunikation trägt vor allem der firmeninterne Informationsaustausch entscheidend zur effizienten Entwicklung konkurrenzfähiger Produkte bei. In diesem Zusammenhang haben der Wissenstransfer sowie der Umgang und die nachhaltige Speicherung gewonnener Erfahrungen und Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten, im Hinblick auf die stetig steigende Komplexität der Produkte und die damit

zunehmende Zahl der an der Produktentwicklung beteiligten Teildisziplinen, immer stärkeren Einfluss auf den Erfolg konkreter Produktentwicklungsvorhaben aber auch auf den Gesamterfolg und die dauerhafte Etablierung von Unternehmen am globalen Markt.

Zur Erhöhung der Effizienz des Variantenauswahlprozesses wird in diesem Beitrag ein Ansatz zum zielsystemorientierten Variantenmanagement vorgeschlagen, mit der aus einem bestehenden unternehmensspezifischen Produktportfolio für ein konkretes Kundenanforderungsprofil situationsgerecht geeignete Lösungsvarianten empfohlen werden können. Anwendung findet die Methode während der Angebotserstellungsphase bei der die Geschwindigkeit und die Qualität der Variantenauswahl (vgl. Bild 1) neben der Kommunikation mit dem Kunden entscheidenden Einfluss auf dessen Entscheidungsverhalten für oder gegen das Zustandekommen eines Auftrages haben kann.

3 Forschungsbedarf und wissenschaftlicher Ansatz

Zur Steigerung der Effizienz und der Qualität der Variantenauswahl in der Konstruktion bedarf es eines unterstützenden Werkzeuges, mit dessen Hilfe die Unsicherheit bei der Lösungsauswahl reduziert werden kann, um unnötige Iterationen, im Sinne von redundanten bzw. häufig wiederkehrenden Konstruktionstätigkeiten, zu minimieren. Aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich des Variantenmanagements stellen bereits erfolgreich eingesetzte Methoden und Werkzeuge z.B. zur Produktfamilienplanung [2] und zur Produktmodularisierung [3] bereit. Die unsicherheitsbehafteten Prozesse der Zielfindung und der Zielkonkretisierung werden bislang jedoch nur unzureichend beachtet.

Der hier vorgestellte Beitrag verknüpft den in der industriellen Praxis erkannten Bedarf mit dem wissenschaftlichen Ansatz des erweiterten ZHO-Modells (Bild 2). Das systemtechnische Modell stellt den Konstrukteur in das Zentrum des iterativen Synthese- und Analyseprozesses von Zielsystem und Objektsystem [4]. In unsicherheitsbehafteten Entwicklungsprozessen (wie z.B. in der Angebotsphase) ist es dem Konstrukteur oftmals nicht direkt möglich, ein initial vollständiges, dem Kundenbedarf entsprechendes Zielsystem aufzustellen. Ausgehend von seiner derzeitigen Wissensbasis wird daher zunächst ein initiales Zielsystems synthetisiert, das den Raum zulässiger Produktlösungen einschränkt. Auf Basis des so begrenzten Lösungsraums können erste geeignete Produktvarianten identifiziert und angepasst werden (Synthese des Objektsystems). Die ausgewählten Produktlösungen werden im nächsten Schritt gemeinsam mit dem Kunden hinsichtlich ihrer Eignung analysiert. Das dabei gewonnene Wissen erlaubt dem Konstrukteur die Konkretisierung des Zielsystems und das zielführendere Durchlaufen der nächsten Iteration.

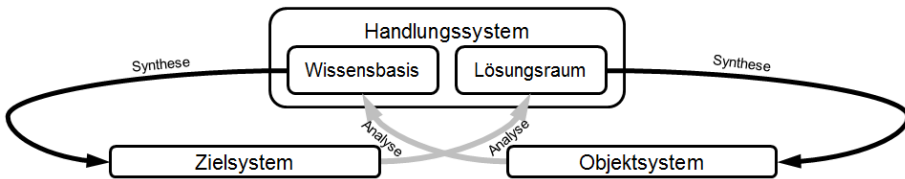


Bild 2: Erweitertes ZHO-Modell (Liegende Acht) [4]

Der hier untersuchte Ansatz soll den Konstrukteur bei der iterativen Zielsystemkonkretisierung im Auswahl- und Anpassungsprozess von bestehenden Produktvarianten effizient unterstützen. Dazu gilt es den Überdeckungsgrad von neuem Zielsystem und bestehenden Zielsystemen der einzelnen Varianten im Portfolio rechnerbasiert ermitteln, bewerten und ausgeben zu können.

4 Lösungsansatz

Zielsystemorientiertes Variantenmanagement unterstützt den Entwickler bei der Variantenauswahl in der Angebotsphase im Verständnis des erweiterten ZHO-Modells. Der Ansatz umfasst dabei (1) einen Eingabebereich zur Erfassung des initialen Zielsystems, (2) eine Objektdatenbank, die das unternehmensspezifische Variantenspektrum in Form von CAD-Parametermodellen enthält, sowie (3) ein Entscheidungsunterstützungssystem zur Variantenauswahl (VDSS, engl. Variant Decision Support System). Dem Lösungsansatz liegt die Forschungshypothese zu Grunde, dass für jedes Element in der Datenbank immer ein korrespondierendes Paar aus einer Lösung in Form eines Objekts und das diese Lösung begründende Variantenzielsystem existiert.

Das Ziel des zielsystemorientierten Variantenmanagements ist es, ein bestehendes Produktportfolio auf Grundlage einer konkreten Kundenanfrage zu bewerten, um den Konstrukteur mit einer situationsgerechten Lösungsempfehlung zu unterstützen. Hierbei sollen neben den kundenspezifischen Anforderungen und Zielvorstellungen auch unveränderliche Randbedingungen, zulieferspezifische Fertigungs- und Montagegegebenheiten sowie die Systemumgebung betrachtet werden. Das auf diese Weise mit dem VDSS generierte Variantenranking unterstützt zusätzlich durch eine transparente Dokumentation des Entscheidungsprozesses die firmeninterne Kommunikation und steht so als Referenz und nachhaltiger Wissensspeicher für Folgeprojekte zur Verfügung. Eine nachvollziehbar begründete Variantenauswahl erleichtert die Verständigung mit dem Kunden und hat damit signifikanten Einfluss auf die Faktoren Kundenvertrauen und Kundenzufriedenheit.

Die unternehmensspezifisch zur Auswahl stehenden Varianten des Baukastens sind dabei im Rahmen vorangegangener Kundenprojekte ermittelt, als realisierbar eingestuft und im Falle eines konkreten Kundenprojektes umgesetzt worden. Dabei lässt sich der Produktentstehungsprozess jedes einzelnen Elementes in der Datenbank mit dem iterativen Prozessmodell gemäß Bild 2 beschreiben, wobei die Lösung, z.B. eines Objektes in Form eines CAD-Modells, stets mit dem begründenden Elementzielsystem verknüpft wird.

Zur Anwendung des Ansatzes auf existierende Varianten einer Produktklasse, wie z.B. "Nockenwellen", werden die in Bild 3 aufgeführten Aktivitäten nötig, um die klassenspezifische Produktstruktur und die vorhandenen CAD-Parametermodelle mit den dazugehörigen Zielsysteminformationen auf deren strukturelle Kompatibilität und prinzipieller Verwendbarkeit hin zu prüfen und für die Belange des VDSS entsprechend aufzubereiten und zu erweitern.

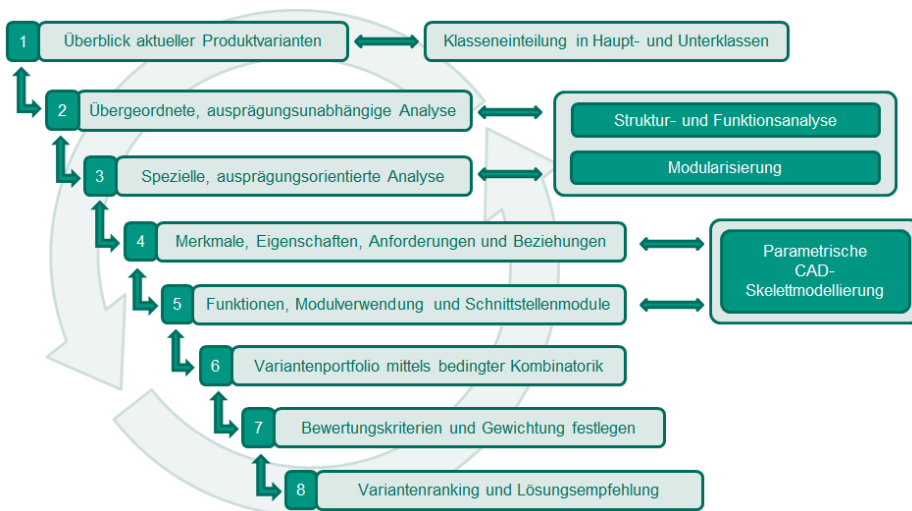


Bild 3: Aktivitäten zur Anwendung des VDSS auf bestehendes Produktportfolio

Die einleitenden Aktivitäten (1) befassen sich mit der Situationsanalyse, d.h. dem Erfassen der unternehmensspezifischen Variantenlösungen zur Darstellung einer übergeordneten Produktklasse. Existieren für diese Klasse unterschiedliche Herstellmöglichkeiten, muss aufgrund signifikant divergierender Bauteileigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten in Unterklassen (Ausprägungen) gegliedert werden. Die Klasse "Nockenwelle" lässt sich z.B. in die Unterklassen "Gussnockenwelle", "Schmiednockenwelle" und "gebaute Nockenwelle" unterteilen, die spezielle Produktausprägungen des Klasse "No-

ckenwelle" darstellen. Entsprechende Informationen befinden sich in den firmeninternen PDM-Systemen, über deren Klassifizierungsschlüssel z.B. in Form von Produktklassennummern nach konkreten Ausführungen der interessierenden Produktklassen gefiltert werden können.

In der nächsten Aktivität (2) wird eine ausprägungsunabhängige Analyse der Bauteilfunktionen und der Bauteilstruktur der Hauptklasse durchgeführt mit der Fragestellung, welche Funktionen und welche übergeordnete Produktstruktur weisen alle Ausprägungen auf. Die sich ergebende Schnittmenge bildet dann die Funktions- und Produktstruktur (vgl. [6]) der Hauptklasse, die unabhängig von der konkreten Ausprägung auf alle Unterklassen zutrifft. Die ermittelte Produktarchitektur der Hauptklasse wird im Anschluss modularisiert, um verschiedene Produktausprägungen modular vergleichen und Verbesserungspotentiale erkennen zu können.

Zur Produktmodularisierung können unterschiedliche Ansätze herangezogen werden, die aus Klassifizierungsrahmenwerken für Modularisierungsmethoden [3] anwendungsspezifisch gewählt werden können. Hilfestellung für die Struktur- und Funktionsanalyse und die daraus abgeleitete Modularität können auch Design-FMEAs geben, die standardmäßig vielfach als Teil des Leistungsumfanges vom Kunden gefordert werden. Häufig existieren bereits produktspezifische Standard-Design-FMEAs, die sich an konkrete Variantenausprägungen anpassen lassen [5]. Die ermittelten Hauptklassenmodule sind Muss-Module mit bestimmten Muss-Funktionen, die die Produkthauptklasse als Mindestforderung aufweist.

Im Anschluss daran wird in Aktivität (3) der aktuelle Stand der Betrachtung um Kann-Module mit den korrespondierenden Kann-Funktionen erweitert, wobei wie bei den vorangegangenen Aktivitäten bei der Untersuchung von Funktion und Gestalt produktspezifisches Hintergrundwissen erforderlich ist. Das nachfolgende Bild 4 zeigt in vereinfachter Form eine modulare Struktur inklusive modulspezifischer Funktionen einer Nockenwelle in der Ausprägung "gebaut", d.h. eine aus Einzelteilen zusammengefügte Welle. Diese Modulstruktur ist auch auf einteilige Lösungen in Form von Schmiede- oder Gusswellen übertragbar, d.h., dass Module keine geometrische Abgrenzung haben müssen.

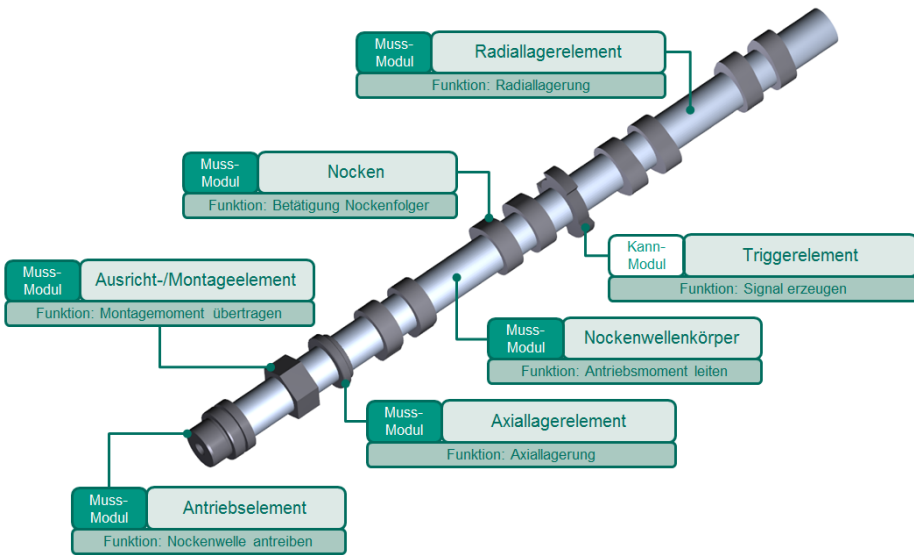


Bild 4: Beispiel einer modularen Struktur einer gebauten Nockenwelle

Hiernach werden im Rahmen der Aktivität (4) Merkmale und Eigenschaften sowie Anforderungen und Beziehungen im VDSS modulausprägungsbaasiert erfasst, d.h., dass der Baukasten z.B. mehrere, unterschiedlich ausgeprägte Nockenwellenkörpermodule (vgl. Bild 4) aufweist, die sich bzgl. Produkteigenschaften und -merkmalen unterscheiden. Des Weiteren gibt es modulausprägungsspezifische Unterscheidungsmerkmale im Hinblick auf Funktionen, Modulverwendungen (z.B. PKW oder LKW) sowie kombinierbaren Schnittstellenmodulen, die in Aktivität (5) erfasst werden. Mit den in (4) und (5) gesammelten Informationen werden Modulzielsysteme aufgespannt, die mittels parametrischer Skelettmodellierung an CAD-Modelle geknüpft werden. Die bidirektionale Kopplung von Funktionen, Teilverwendungen und kompatiblen Schnittstellenmodulen an die Gestalt wird auf Modulausprägungsebene über CAD-Modellparameter realisiert.

In Aktivität (6) werden die Modulzielsysteme durch bedingte Kombinatorik zu Gesamtzielsystemen auf Produktvarianteebene kombiniert. Die Gesamtheit der unternehmensspezifisch zur Verfügung stehenden Module einer Produktklasse liefert innerhalb des VDSS einen Funktionenpool. Auf diese zur Verfügung stehenden Funktionen kann für die konkrete Kundenanfrage im Rahmen eines zulässigen Lösungspfades zurückgegriffen werden. Hierzu zeigt Bild 5 ein einfaches Beispiel, bei dem das VDSS auf Basis des derzeitigen Baukastens fünf Varianten ermittelt.

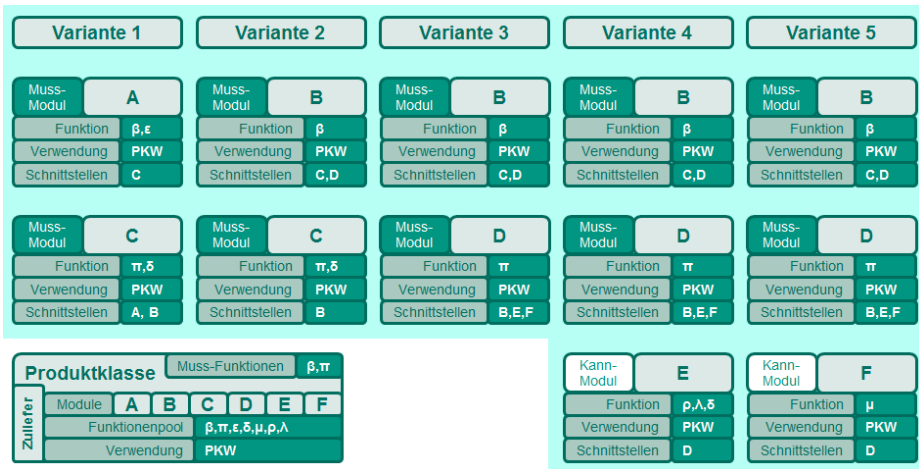


Bild 5: VDSS-basierte Varianten aus Zulieferfirmensicht

Die fünf Varianten in Bild 5 basieren in diesem einfachen Beispiel auf einem Baukasten, der über sechs Module A bis F verfügt. Die fiktive Produktklasse beinhaltet die beiden Muss-Funktionen β und π . Jede Lösung besitzt zusätzlich spezifische Eigenschaften und Merkmale, die hier aufgrund der unter der steigenden Komplexität leidenden Übersichtlichkeit nicht betrachtet werden. Bild 5 zeigt alle abgeleiteten Varianten, die sich mittels bedingter Kombinatorik ergeben und auf die das Unternehmen im konkreten Anfragefall zurückgreifen kann. Hinter jedem in Bild 5 dargestellten Modulzielsystem steht ein Objekt in Form eines CAD-Parametermodells, so dass sich stets Paare aus den die Lösung begründenden Zielsystemen und den entsprechenden Objekten in Form von CAD-Modellen ergeben.

Die in Bild 5 gezeigte Vielfalt an darstellbaren unternehmensspezifischen Varianten ändert sich im Falle einer speziellen Kundenanfrage dahingehend, dass sich aufgrund der im Kundenzielsystem stehenden Festforderungen bzgl. Funktionen und Kundenteilverwendung (muss haben) und der sich auf die Produktmerkmale beziehenden Mindestforderungen (darf max. 2 kg schwer sein) und Bereichsforderungen (Kostenbereich) die Anzahl der zur Verfügung stehenden Lösungen reduziert. Würde ein Kunde z.B. eine Lösung für eine PKW-Anwendung (Teilverwendung) anfragen, die neben den Muss-Funktionen β und π zusätzlich die Funktion δ haben soll, ergäbe sich, an dieser Stelle der Anschaulichkeit wegen ohne Berücksichtigung von Anforderungen bzgl. Geometrie, Belastungen und Festigkeiten, ein Lösungsraum bestehend aus den Varianten 1, 2 und 4 (vgl. Bild 5 u. Bild 6).

In Aktivität (7) werden geeignete Bewertungskriterien inkl. Gewichtungen festgelegt, mit denen die Überdeckungsgrade der Lösungsmöglichkeiten mit dem Anforderungsprofil des Kunden beurteilt werden können. Hier kommen Kundenanforderungen (Soll-Zustand) in Form von Mindest- und Bereichsfor-derungen zum Tragen, die sich auf die variantenspezifischen Produkteigen-schaften (Ist-Zustand) beziehen. Daneben wird die VDSS-basierte Empfehlung zusätzlich durch Wunschforderungen beeinflusst.

In der abschließenden Aktivität (8) wird eine VDSS-basierte Lösungsemp-fehlung generiert, d.h. es wird die Fragestellung bearbeitet, welche Lösung als abgeleitete Variante des aktuellen Baukastens am besten auf eine konkre-tes Anfrageprofil passt (BEST-FIT). Zur Beantwortung dieser Frage muss zu-erst geprüft werden, welche Lösungspfade grundsätzlich in Frage kommen (FIT-Bedingung, vgl. Bild 6) bevor eine quantitative Aussage über die geeig-neteste Variante getroffen werden kann. Daneben stellt sich die Frage, welche der Lösungen, die die FIT-Bedingung nicht erfüllt haben, angepasst werden sollten, um für Folgeprojekte als potentielle Lösungsmöglichkeiten zur Verfü-gung zu stehen (NEAREST-FIT). Das Bild 6 fasst hierzu die Aktivitäten im Rahmen des VDSS im Sinne des erweiterten ZHO-Modells zusammen.

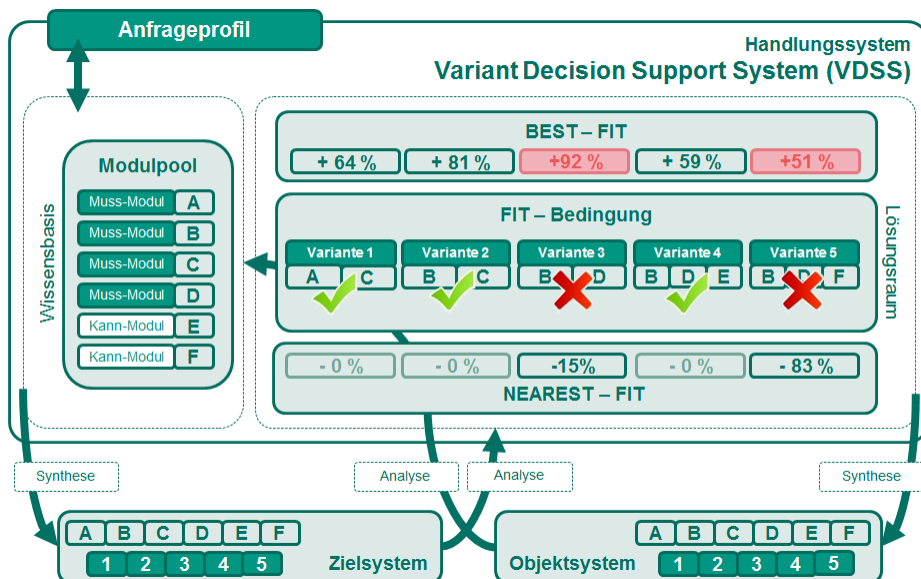


Bild 6: Aufbau des VDSS (vgl. Bild 2 und [4])

Das Anfrageprofil enthält neben den Kundenanforderungen auch die Anbieteranforderungen sowie die Bewertungsgrundlagen inkl. Gewichtung, die zur Identifizierung der am besten geeigneten Lösung herangezogen werden. Hierzu werden die existierenden CAD-Modelle als Elemente des Baukastens der Wissensbasis an das Anfrageprofil angepasst und die initialen Modulziele synthetisiert. Durch Analyse des Zielsystems wird ein Lösungsraum aufgespannt, der die passenden Variantenlösungspfade auf Basis der Datenbank enthält. Die Vergleichbarkeit wird dadurch realisierbar, indem alle die Varianten begründenden Informationen expliziert werden. Erst hiernach können die Überdeckungsgrade der in Frage kommenden Variantenziel-systeme mit dem initialen Zielsystem ermittelt und die dazugehörigen Objekte in Form von CAD-Modellen synthetisiert werden. Anhand der durch die Analyse erzeugten Paare aus den Lösungsvarianten und den diese Lösungen begründenden Variantenziel-systemen können Verbesserungspotentiale diskutiert werden. Hierbei ist das Verständnis entscheidend, dass aufgrund der Anpassung auch wieder neue Variantenziel-systeme generiert werden, die nach Möglichkeit höhere Überdeckungsgrade mit dem initialen Zielsystem des Anfrageprofils erreichen. Dies bedeutet zudem, dass es eine Anpassung auf beiden Seiten geben muss, auf Ziel- und Objektsystemseite.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Grundlegendes Ziel des hier vorgestellten Ansatzes ist es, die Konstruktion bei der Variantenauswahl in der Angebotsphase zu unterstützen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse eines existierenden unternehmensspezifischen Produktportfolios bestehend aus CAD-Parametermodellen vorangegangener Projekte, um die auf ein konkretes Kundenanfrageprofil passendste Variante zu identifizieren. Die Methode bietet zur Verbesserung des internen Informationsaustausches und der Kommunikation mit dem Kunden eine nachvollziehbare Dokumentation des Entscheidungsprozesses.

Der Lösungsauswahl liegen hierbei drei zentrale Problemstellungen zugrunde. Die FIT-Bedingung (I) kann über entsprechende Fest-, Mindest- und Bereichsforderungen sowie die geforderte, unveränderliche Kundenteileverwendung über entsprechende Kodierungen im Variantenziel-system und auf der Objektseite begründet werden. Die Frage nach der bestgeeignetsten Lösung und damit der Beantwortung der BEST-FIT-Bedingung (II) ist in Vergleich zur FIT-Bedingung aufwändiger. Hier müssen im Rahmen der Folgeaktivitäten zum zielsystemorientierten Variantenmanagement weiterführende Untersuchungen bzgl. geeigneter quantitativer Bewertungskriterien und deren Gewichtungen angestellt werden. Des Weiteren wird zu diesem frühen Zeitpunkt der Untersuchungen noch nach geeigneten Lösungen gesucht, über die

der Datenaustausch zwischen dem Zielsystem bidirektional assoziativ mit CAD-Systemen geregelt werden kann. Noch umfangreicher gestaltet sich aus aktueller Sicht die Umsetzung einer zufriedenstellenden Quantifizierung der NEAREST-FIT-Bedingung (III). Dies umfasst die Frage, wie sich diejenigen aktuell nicht passenden Lösungen bewerten lassen (vgl. Bild 6), bei denen sich Modifikationen im Hinblick auf den entstehenden Entwicklungsaufwand lohnen, um das derzeitige Produktvariantenportfolio zu erweitern.

Im Hinblick auf den Einsatz in der industriellen Praxis ist eine Integration des Ansatzes in ein anwenderfreundliches Entwicklungswerkzeug unter Berücksichtigung der Übertragbarkeit auf andere Produkte und den unternehmensspezifischen CAD- und PDM-Systemen erforderlich. Mit einer entsprechenden Implementierung soll es Zulieferfirmen ermöglicht werden, Kunden eine schnelle, funktionale und kostenoptimierte Lösung mit dokumentiertem Entscheidungsprozess zu präsentieren.

Literatur

- [1] Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F.: "Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] Jonas, H.; Krause, D.: "Produktfamilienentwicklung im Rahmen des Variantenmanagements", DfX-Symposium, Buchholz b. Hamburg, 2010.
- [3] Daniilidis, C.; Enßlin, V.; Eben, K.; Lindemann, U.: "A Classification Framework for Product Modularization Methods", 18. International Conference on Engineering Design ICED 11, Copenhagen, Denmark, 2011.
- [4] Albers, A.; Lohmeyer, Q.; Ebel, B.: "Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects", 18. International Conference on Engineering Design ICED 11, Copenhagen, Denmark, 2011.
- [5] Feldhusen, J.; Nagarajah, A.; Schubert, S.: "A Data Mining Method for Selecting the Suitable Existing Product Variant as a Development Base for a New Order", International Design Conference DESIGN 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010.
- [6] Sedchaicharn, K.: "Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt", Forschungsberichte IPEK Institut für Produktentwicklung, Band 45, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011.

Ansatz zur flexiblen Gestaltung modularer Bauweisen - Dilemma zwischen Standardisierung und Flexibilität

Johannes Siebel, Christian Schindler
*Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau;
Technische Universität Kaiserslautern*

The focus of this paper is the dilemma between the flexibility to react on different customers demands and the wish to standardise products to create economical benefits. Several methodical approaches are analysed due to facts of e.g. flexibility, product strategy, technical- functional aspects and customer requirements. The deficits of the approaches are shown and based on them a new concept for a guideline is depicted to structure products including new developments.

1 Problemstellung

Um hohe Kundenzufriedenheiten zu erreichen und sich damit entscheidende Wettbewerbsvorteile zu sichern, müssen viele Unternehmen ihre Produkte sehr individuell gestalten und entwickeln. Die Individualisierung von Produkten wird als hauptsächliches Merkmal zur Sicherung der eigenen Marktposition angesehen, [1]. Gefordert durch die Internationalisierung der Absatzmärkte und durch unterschiedlichste Anforderungen (klimatische, ergonomische und gesetzliche Anforderungen) müssen weitestgehend unsystematisch Neukonstruktionen in sehr kurzen Zyklen entwickelt werden, [2]. Viele Unternehmen betreiben deswegen eine Überindividualisierung von Produkten mit der Folge eines extremen, raschen und oft unüberschaubarem Anstieg der Variantenvielfalt und somit einer extrem hohen Produktkomplexität, [3].

Eine besondere Problematik ergibt sich hier bei komplexen technischen Produkten mit niedrigen Stückzahlen, welche auf die Anforderungen eines expliziten Kunden hin entwickelt werden, wie sie bspw. im Maschinen- und Anlagenbau vorkommen.

Oftmals werden hier Methoden des Variantenmanagements nicht angewandt, [4]. Ein Grund dafür ist, dass wegen der notwendigen Produktflexibilität die Einführung von Standardisierungsmaßnahmen erschwert wird, weil sich dadurch die Flexibilität verringert und somit Kundenanforderungen eventuell nicht mehr erfüllt werden können [5]. Weitere Gründe sind oft fehlendes Wissen in den Unternehmen und das Risiko, die mit der Einführung von Variantenmanagementsystemen verbundenen Kosten aufzuwenden [6].

Aus dieser Problemstellung ergeben sich die Fragestellungen wie grundsätzlich Unternehmen mit solchen Produkten von Variantenmanagement profitieren können und wie das Dilemma zwischen einer geeigneten Standardisierung und notwendiger Flexibilität gelöst werden kann?

Im Folgenden wird auf verschiedene Ansätze zur modularen Produktstrukturierung eingegangen. Die Ansätze werden nach Anforderungen, die für die Problemstellung entscheidend sind, bewertet und Defizite der Methoden dargestellt.

2 Stand der Technik- Methoden modularer Produktstrukturierung

Methoden modularer Produktgestaltung lassen sich auf vier Themengebiete aufteilen. Diese sind technisch- funktionale Aspekte, produktstrategische Aspekte, die Kombination der beiden erstgenannten Aspekte, sowie organisationale Aspekte [7]. Nachfolgend werden einige Methodenansätze erläutert.

Modular Function Deployment

Das Modular Function Deployment (MFD) von ERIXON ist eine Methode, mit der aufgrund von produktstrategischen Kriterien eine modulare Produktarchitektur für Produktfamilien generiert werden kann. Grundlage der Methode ist die Bildung von Modulen aus Komponenten, die in einer Module Indication Matrix (MIM) auf Basis verschiedener sogenannter Modultreiber bewertet werden. Die Modultreiber ermöglichen eine eigenständige Bildung von Modulen. [8]

Design Structure Matrix

Die Design Structure Matrix (DSM) wird von verschiedenen Autoren, wie bspw. PIMMLER/EPPINGER, BLACKENFELT oder LANGE genutzt, um primär die technisch- funktionalen Beziehungen zwischen Komponenten oder funktionalen Lösungsträgern zu ermitteln und in einer Matrix grafisch darzustellen. PIMM-

LER/ EPPINGER beschränken sich bei ihrer Methode ausschließlich auf die Analyse der technische- funktionalen Beziehungen. BLACKENFELT und LANGE fügen in ihren Vorgehensmodellen noch produktstrategische Kriterien hinzu. [9,10,11]

Funktionsstruktur nach Pahl/Beitz

Nach Pahl/ Beitz wird der modulare Aufbau von Produkten durch Funktionsstrukturen ermittelt. Die Funktionsstrukturen werden unterteilt in Grund-, Hilfs-, Anpass-, und Sonderfunktionen. Bei der Unterteilung der Gesamtfunktion ist es entscheidend diese so zu zerlegen, dass möglichst wenige, gleiche und wiederkehrende Teilfunktionen entstehen. Diese Methode erlaubt es, Energie-, Signal- und Stoffflüsse grafisch und verhältnismäßig anschaulich darzustellen. [12]

Modular Engineering nach Kopenhagen

Zielsetzung der Methode Modular Engineering ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Modulerstellung. Kern der Methode ist die Zusammenfassung von Komponenten nach einer funktionalen Dekomposition unter Berücksichtigung von technisch- funktionalen Beziehungen, produktstrategischen Aspekten und Kundenanforderungen. Dazu werden eine DSM-, MIM-, und QFD-Matrix aufgestellt und letztlich in eine globale Beziehungsmatrix überführt. Die Beziehungsmatrix wird über einen Optimierungsalgorithmus in eine Blockdiagonalmatrix umgeformt und über ein entwickeltes Modularitätsmaß die bestmögliche Modulbildung ermittelt. [7]

Entwicklung modularer Produktfamilien nach Bles

Dieser Ansatz fokussiert sich auf die Entwicklung einer modularen Struktur unter Berücksichtigung der einzelnen Lebensphasen eines Produktes. Nach der variantengerechten Produktgestaltung von Komponenten erfolgt zunächst eine technisch- funktionale Modularisierung zur Bildung von weitestgehend voneinander entkoppelten Modulen. Anschließend werden unter Zuhilfenahme des Modultreiberkonzeptes nach ERIXON die Modultreiber den verschiedenen Lebensphasen eines Produktes zugeordnet. Die Treiber werden durch sogenannte Modultreiberausprägungen erweitert. Modultreiberausprägungen sind produktspezifische Merkmale nach denen die Komponenten gruppiert werden. Für jede Produktlebensphase werden dann nach Treibern und Ausprägungen modulare Produktstrukturen erstellt und anschließend in einem übergreifenden Prozess zusammengefasst, wobei hier mehrere Konzepte entstehen können. Danach erfolgt über ein Bewertungsverfahren die Auswahl eines Konzeptes. [13]

3 Definition der Anforderungen

Um die geeignetste Methode für die vorliegende Problemstellung zu finden, werden die vorgestellten Methoden zur modularen Produktgestaltung hin-

sichtlich Anforderungen bewertet. Nachfolgend werden die Anforderungen kurz erläutert.

- **Erfassen der Flexibilität gegenüber stark wechselnden Markteinflüssen**
Da die Entwicklung der betrachteten Produkte stark von individuellen Kundenanforderungen getrieben ist, muss eine Methode flexibel gegenüber wechselnden Kundenanforderungen sein, aber dennoch Möglichkeiten bieten sinnvoll zu standardisieren. Flexibilität wird hier als Maß verstanden, wie gut unterschiedliche Kundenwünsche und Produktfunktionen trotz eines standardisierten Produktprogramms erfüllt werden können, ohne dass tiefgreifende Änderungsstrukturen in der Methode notwendig sind.
- **Unterstützung von technisch- funktionalen Beziehungen und produktstrategischen Aspekten**
Durch die technisch- funktionalen Beziehungen können verschiedene Funktionen und Kundenanforderungen abgebildet werden, während die produktstrategische Betrachtung das Zusammenfassen von Komponenten mit möglichst gleichen strategischen Ausrichtungen erlaubt. Zudem ermöglicht eine funktionale Betrachtungsweise bereits den Einsatz einer Methode in der Konzeptphase.
- **Berücksichtigung von Kundenanforderungen**
Die Entwicklung der hier betrachteten Produkte und die Varianz dieser wird im Wesentlichen durch die Kundenanforderungen bestimmt. Diese sollen so genutzt werden, dass sie die Entwicklung von modularen Produktarchitekturen dahingehend unterstützen.
- **Methodische Unterstützung bei der Schnittstellenauswahl**
Eine entscheidende Rolle bei der Modulbildung ist die Entwicklung der Schnittstellen. Sie müssen über einen langen Zeitraum gleich bleiben, damit die Austauschmöglichkeit, bspw. durch Wartung oder nachträgliche Erweiterung des Funktionsumfangs des Produktes, eines Moduls zu anderen Modulen weitestgehend uneingeschränkt bleibt.
- **Einfache Verständlichkeit zur praxistauglichen Umsetzung durch den Entwickler**
Damit eine Methode in der Praxis angewendet wird, müssen die einzelnen Arbeitsschritte leicht verständlich und benutzerfreundlich sein, sowie logisch aufeinander aufbauen.
- **Möglichkeit der ganzheitlichen Rechnerunterstützung**
Für eine praktikable Anwendung der Methode im Unternehmen stellt eine effiziente Rechnerunterstützung eine entscheidende Rolle dar. Mit dieser

Anforderung soll untersucht werden, ob Methoden mittels Rechnereinsatz unterstützt werden können.

4 Bewertung der Methoden

Im Folgenden werden die einzelnen Methoden nach den Anforderungen bewertet und Defizite abgeleitet, siehe Abbildung 1.

Anforderung	MFD	DSM	PAHL/beitz	Modular Engineering	Ansatz nach Blees
Erfassen der Flexibilität	0	0	1	1	1
technisch- funktionale und produktstrategische Beziehungen	1	1	1	2	2
Kundenanforderungen	0	0	0	2	0
Unterstützung bei der Schnittstellenauswahl	0	1	1	1	1
Einfache Verständlichkeit	1	1	1	1	2
ganzheitliche Rechnerunterstützung	2	2	0	2	1
Summe	4	5	4	9	7

2: erfüllt 1: teilweise erfüllt 0: nicht erfüllt

Abbildung 1: Bewertung der Methoden

Bei der Methode MFD ist nachteilig, dass die Zusammenfassung der Komponenten zu Modulen ausschließlich nach produktstrategischen Kriterien durchgeführt wird und technisch- funktionale Beziehungen und Kundenanforderungen nicht für die Modulbildung herangezogen werden.

Bei den Methoden, die auf dem Verfahren der DSM beruhen, werden Kundenanforderungen nicht zur Modulbildung herangezogen. Zudem ist die Auswertung durch den Rechnereinsatz schwierig nachzuvollziehen und die Benutzerfreundlichkeit durch das Matrixverfahren aufgrund mangelnder Übersichtlichkeit bei einer großen Anzahl von Komponenten fragwürdig.

Bei PAHL/BEITZ ist die Vorgehensweise zu allgemein formuliert und es bestehen so Schwierigkeiten eine konkrete konstruktionsmethodische Unterstützung für die Modulbildung abzuleiten. Ebenfalls werden produktstrategische Kriterien nicht beachtet und Kundenanforderungen nur für die Entwicklung der Funktionsstruktur verwendet.

Vorteilhaft bei der Methode von KOPPENHAGEN ist, dass direkt Kundenanforderungen in den Modularisierungsprozess mit einbezogen werden. Allerdings ist bei diesem Ansatz durch die gewählte Matrixform die Benutzerfreundlichkeit und Übersichtlichkeit bei stark steigender Komponentenanzahl eingeschränkt.

Die Methode nach BLEES unterstützt die Berücksichtigung produktspezifischer Anforderungen bei der Modulbildung. Durch die grafische Darstellung der funktionalen Zusammenhänge des Gesamtproduktes und der Modulbildung ist die Methode verständlich aufgebaut, kann aber nur in Teilbereichen rechnergestützt umgesetzt werden. Nachteilig ist ebenfalls, dass keine Kundenanforderungen zur direkten Modulbildung hinzugezogen werden.

Aus der Bewertung ergibt sich, dass die Methode von KOPPENHAGEN viel versprechend für eine Anwendung auf die gegebene Problemstellung ist.

5 Vorstellung der neuen Methode

Die Methode Modular Engineering nach KOPPENHAGEN wurde auf ein Praxisbeispiel angewandt. Jedoch zeigte sich bei der Anwendung, dass Anforderungen, wie Flexibilität, Unterstützung bei der Schnittstellenauswahl und einfache Verständlichkeit dieser Methode noch Verbesserungspotential bietet bzw. in einer neuen Methode mit Bezug auf Modular Engineering besser umgesetzt werden können. Deshalb wird im Folgenden Absatz ein Ansatz einer neuen Methode präsentiert, der die Anforderungen umsetzt.

Die im Folgenden vorgestellte eigene Methode untergliedert sich in neun Arbeitsschritte, siehe Abbildung 2.

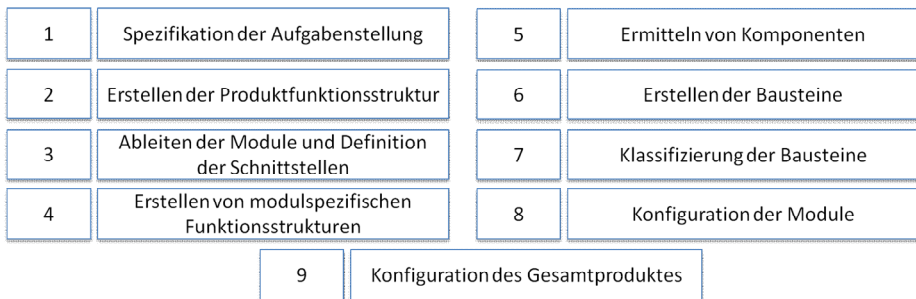


Abbildung 2: Arbeitsschritte der Methode

Grundlage der Methode ist ein Baukasten, der aus zwei Ebenen besteht. Durch die Einführung dieser Ebenen soll die Produktkomplexität gesenkt wer-

den. Je nach Komplexitätsgrad des Produktes ist es möglich noch zusätzliche Ebenen einzufügen, um die Komplexität entsprechend zu reduzieren.

Ausgehend von der Spezifikation der Aufgabenstellung (Spezifikationsphase) wird eine grobe Funktionsstruktur des Produktes erzeugt, bei der entscheidend ist, dass eine Aufteilung nach geschlossenen Funktionseinheiten (GFH) vorgenommen wird, Abbildung 3. Ziel ist es möglichst früh eine erste Produktstruktur zu generieren, um damit die Möglichkeit zu geben Module parallel zu entwickeln, somit die Produktkomplexität zu senken und bereits festzulegen welche Module zwingend für die Umsetzung der Gesamtfunktion notwendig sind und welche Module die Gesamtfunktion optional erweitern.

Unter Modul werden physisch separierbare und in sich abgeschlossene eigenständig prüfbare Einheiten verstanden. Bei Modulen sind die internen Beziehungen stärker ausgeprägt als zwischen ihnen. Der Vorteil der Modulbauweise ist eine vereinfachte Wartung des Gesamtproduktes. [14] [15]

Bei der Modulklassifizierung spielen ausschließlich technisch- funktionale Beziehungen eine Rolle, da hier der Fokus auf die Erfüllung der Gesamtfunktion, der Schnittstellenbetrachtung und vereinfachten Wartung des Gesamtproduktes gelegt wurde.

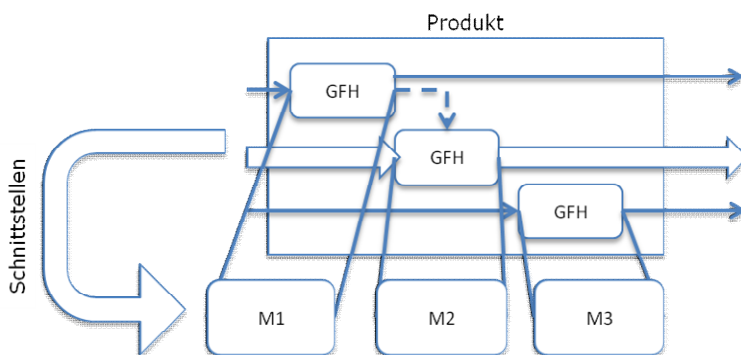


Abbildung 3: Funktionsstruktur und Modulareitung (Schritt 2 & 3)

Aus der Funktionsstruktur lassen sich somit gemäß der Moduldefinition Module ableiten, Abbildung 3. Durch die Verknüpfung der Funktionen mit spezifischen Stoff-, Signal- und Energieflüssen, sowie geometrischen Abhängigkeiten erfolgt bereits eine erste Schnittstellendefinition der Module.

Die Erfüllung von individuellen Kundenwünschen und- Anforderungen findet auf Modulebene statt. Um die interne Varianz der Modulausprägungen zu senken, wird ein Baukasten für jedes Modul entwickelt, der es erlaubt verschiedene, vordefinierte Ausprägungen des Moduls zu konfigurieren. Der Grad

der Standardisierung wird erhöht, wenn die Bausteine baukastenübergreifend eingesetzt werden können. Durch die Erhöhung des Standardisierungsgrades wird eine höhere Wirtschaftlichkeit des Produktes angestrebt.

Baukästen bestehen aus Bausteinen, die vielfältig miteinander kombiniert werden können, um verschiedene Gesamtfunktionen des Produktes zu erfüllen. Ein Baukasten hat die Zielsetzung aus einer begrenzten Anzahl von Bausteinen eine große Anzahl von Produkten bzw. Produktvarianten zu erzeugen. **[12,14]**

Grundlage des Baukastens ist das Aufstellen modulspezifischer Funktionsstrukturen und die Ermittlung von sogenannten technischen Lösungsträgern (Komponenten) mit lösungssuchenden Verfahren wie bspw. des Morphologischen Kastens, Abbildung 4.

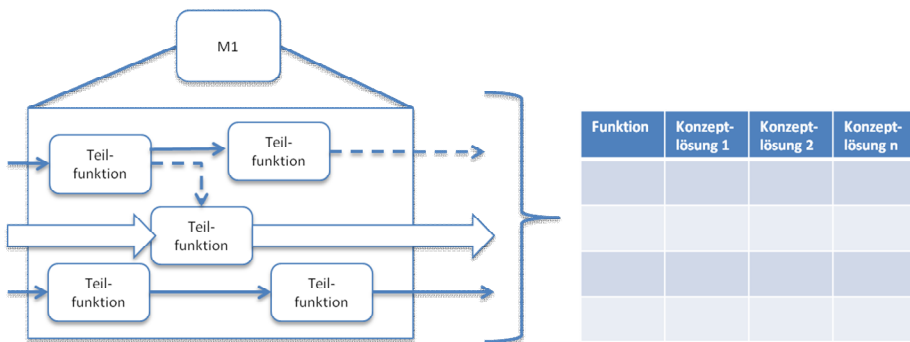


Abbildung 4: modulspezifische Funktionsstrukturen und Lösungssuche (Schritt 4 & 5)

Die Lösungsträger werden dann in Anlehnung an das Verfahren von KOPPENHAGEN mit Matrizen in einem dreistufigen Bewertungsverfahren nach technisch-funktionalen Beziehungen, produktstrategischen Aspekten und Kundenanforderungen jeweils zu verschiedenen Bausteinkonfigurationen zusammengefasst. Die Bausteinkonfigurationen aus den drei Betrachtungsebenen werden hinsichtlich überschneidungsfreier Komponentenausprägungen vereinigt. Bei KOPPENHAGEN findet dieser Schritt durch rechnergestützte Verfahren statt. In der praktischen Anwendung wurde die Zusammenführung durch eine strukturierte Diskussion innerhalb des Produktentwicklungsteams durchgeführt, jedoch ist denkbar den entwickelten Algorithmus von KOPPENHAGEN hier ebenfalls anzuwenden. Die nun vorliegenden Bausteine werden nach Grund-, Hilfs-, Sonder- und Anpassbausteinen klassifiziert, Abbildung 5.

Die Klassifizierung erfolgt nach dem Modultreiberansatz von ERIXON, der hinsichtlich der Einteilung modifiziert wird. Die Klassifizierung der Bausteine er-

folgt über die zugehörigen Komponenten. Ausschlaggebend ist deren Bewertung bei der Betrachtung von produktstrategischen Aspekten. Erhalten hier bspw. eine oder mehrere Komponenten einen hohen Wert bei einem der Treiber, so ist der Baustein dadurch einem der vier Bausteinklassifizierungen zuzuordnen, Abbildung 5.

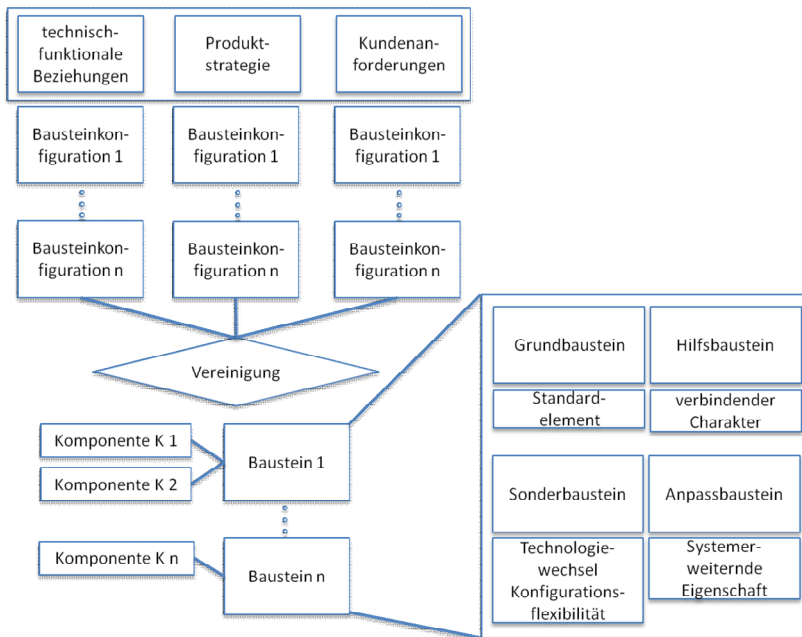


Abbildung 5: Erstellen und klassifizieren der Bausteine (Schritt 6 & 7)

Für Grundbausteine wird vorrangig der Treiber „Standardelement“ verwendet. Er ist charakterisiert über Komponenten, die produktübergreifend standardisiert werden sollen. So kann erreicht werden, dass diese Bausteinart einen hohen Standardisierungsgrad aufweist und dadurch die Bausteinvialfalt insgesamt gesenkt und die Wirtschaftlichkeit des Baukastensystems erhöht wird.

Hilfsbausteine zeichnen sich durch Komponenten aus, die einen hohen Wert vorrangig bei dem Treiber „verbindender Charakter“ erhielten. Dieser Treiber bestimmt Komponenten, die benötigt werden, um andere Komponenten miteinander zu verbinden.

Für Sonderbausteine werden vorrangig die Treiber „Technologiewechsel“ und „Konfigurationsflexibilität“ verwendet. Technologiewechsel bedeutet, dass der Technologiewandel auf die Komponenten einen besonders starken Einfluss hat, so dass diese eventuell während des Produktlebenszyklus modifiziert

werden müssen. Unter Konfigurationsflexibilität soll eine flexible Konfiguration während der Nutzungsphase ermöglicht werden. Deshalb ist eine physische Separierbarkeit der Komponenten unentbehrlich.

Für Anpassbausteine wird vorrangig der Treiber „Systemerweiternde Eigenschaft“ verwendet. Die Verwendung der Komponenten verursacht eine Erweiterung des Systems. Dies ist insbesondere bei Komponenten der Fall, die als Baureihen ausgeführt werden und daher in ihren Abmaßen unterschiedlich sind.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der entwickelten Methode („Mehr Ebenen Baukasten“), die eine hohe Produktflexibilität unterstützt. Auf Komponentenebene werden Komponenten über das erwähnte Bewertungsverfahren zu sinnvollen Bausteinen strukturiert. Die Bausteine werden in einem Baukasten abgelegt und können durch Kombination miteinander die jeweilige Modulkonfiguration bestimmen. Die Konfiguration der Bausteine ist unveränderlich, es sei denn die Teilfunktionen des Moduls ändern sich aufgrund von Anforderungen. In diesem Fall müssen für die jeweilige Teilfunktion gegebenenfalls neue Komponenten geplant und die Strukturierung erneut durchgeführt werden.

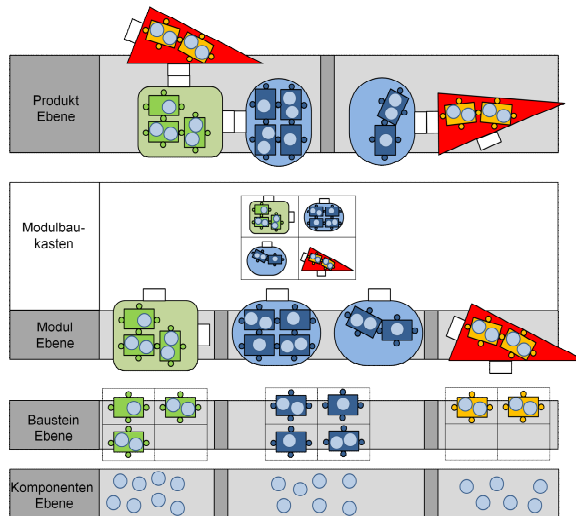


Abbildung 6: „Mehr- Ebenen Baukasten“ (Schritt 8 & 9)

Die so konfigurierbaren Module werden in einem Modulbaukasten angeordnet, über den die unterschiedlichen Varianten des Produktes erzeugt werden. Der Modulbaukasten beinhaltet alle Modulvarianten, welche über die Bausteine gebildet werden können. Somit wird der hohen geforderten Flexibilität bei

den betrachteten Unternehmen durch unterschiedliche Hierarchieebenen begegnet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für die betrachteten Produkte wird so ein Vorgehen zum Entwickeln einer Produktstruktur geschaffen, das eine vergleichsweise starke Anpassung an wechselnde Anforderungen frühzeitig ermöglicht. Zudem kann die Produktstruktur ebenso für Neuentwicklungen eingesetzt werden, da bereits auf funktionaler Ebene eine erste Strukturierung stattfindet.

Im Vergleich zu anderen Methoden wird die Gesamtanzahl der Komponenten bereits vor der Bausteingestaltung auf die jeweiligen Module „aufgeteilt“. So wird der eigentliche Bewertungsprozess übersichtlicher gestaltet. Im Gegenzug muss das Bewertungsverfahren für jedes Modul extra angewandt werden. Hier ist in einem entsprechenden Praxisfall der damit verbundene Aufwand gegenüber der besseren Übersichtlichkeit zu prüfen. Neben der Validierung der Methode, soll die methodische Vorgehensweise zur Bestimmung und Gestaltung der Schnittstellen verfeinert und das Matrixbewertungsverfahren in der Darstellung vereinfacht werden. Des Weiteren wird an einer übergreifenden Rechnerunterstützung für die einzelnen Arbeitsschritte gearbeitet.

Literatur

- [1] Baumgart, I.: „Modularisierung von Produkten im Anlagenbau“, Aachen, Verlagshaus Mainz GmbH, 2005
- [2] Kartika, S. I.: „Methodik zur Analyse des Baukastenpotentials bei bestehender Produktvielfalt“, Dissertation, RWTH Aachen, 2010
- [3] Göpfert, J.: „Modulare Produktentwicklung“, Norderstedt, Books on Demand GmbH, 2009
- [4] Förster, M.: „Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus“, Dissertation, Technische Universität München, 2003
- [5] Firchau, N.: „Variantenoptimierende Produktgestaltung“, Göttingen, Cuvillier Verlag, 2003
- [6] Lindemann, U., Reichwald, R., Zäh, M. F.: „Individualisierte Produkt-Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion“, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 2006

-
- [7] Koppenhagen, F.: " Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen. Komplexitätsreduzierung in der Konzeptphase.", Aachen, Shaker Verlag, 2004
- [8] Erixon, G.: „Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation“, Stockholm, Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998.
- [9] Pimmler, T.U., Eppinger, S.D.: „Integration Analysis of Product Decompositions“, Proceedings of the 6th Design Theory and Methodology Conference, New York, 1994
- [10] Blackenfelt, M.: „Managing Complexity by Product Modularisation“, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999
- [11] Lange, M.W.: „CONCAD Bridging: Managing the Integration of technical Solutions in a modularised Product Concept“, 2nd International Conference on Integrated Design an Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME, UTC, Compiègne, 1998
- [12] Pahl, G.,Beitz,W., Feldhusen, J., Grote, K-H.: „Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung“, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2005
- [13] Blees, C.: „Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2011
- [14] Koller, R.: „Konstruktionslehre für den Maschinenbau“, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1998
- [15] Schindler, C.: „Standardisiert und modularisiert“, Der Nahverkehr 04, 2001

Virtuelle Toleranzbeurteilung abweichungsbehafteter Bauteile

Benjamin Schleich, Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk;
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract: Geometric deviations are observable on every manufactured part and can have huge influences on the functional behaviour of technical products. Therefore, allowable limits for these imperfections have to be specified and set during product development. However, this task is quite difficult since geometric deviations affect the product behaviour in various ways. Thus, current approaches try to incorporate the whole workpiece geometry in tolerance activities instead of reducing the functional behaviour by expressing it as vector chains. In this context, the virtual assessment of geometric deviations is an important step in geometry-based computer aided tolerancing. This contribution illustrates the methodology as well as some applications of virtual tolerance assessment and highlights the possibilities and advantages of geometry-based tolerancing.

1 Berücksichtigung geometrischer Abweichungen im virtuellen Toleranzmanagement

Obwohl mit modernen Fertigungsverfahren eine stetig steigende Genauigkeit der zu fertigenden Bauteile erreicht werden kann, zeigt jedes gefertigte Bauteil Abweichungen von der Soll-Geometrie. Diese beobachteten geometrischen Abweichungen sind auf das Axiom der Fertigungsungenauigkeit und das Axiom der Messunsicherheit zurückzuführen [1] und haben sowohl Einfluss auf die Funktion, als auch auf die vom Kunden wahrgenommene Qualität

der Produkte [2]. Im Rahmen der Geometrischen Produktspezifikation und des Toleranzmanagements müssen daher die erlaubten geometrischen Abweichungen unter Funktions- und Kostengesichtspunkten spezifiziert (Toleranzspezifikation), festgelegt (Toleranzsynthese) und analysiert (Toleranzanalyse) werden [3][4]. Ziel des virtuellen Toleranzmanagements (auch bezeichnet als Computer Aided Tolerancing, CAT) ist es hierbei, unter anderem möglichst frühzeitig die Auswirkungen von Einzelteil- und Montagetoleranzen auf die Funktion, die vom Kunden wahrgenommene Qualität und die mit dem auf Basis der Toleranzangaben gewählten Fertigungsverfahren verbundenen Kosten des Produkts abzuschätzen [2].

Bisherige Ansätze im virtuellen Toleranzmanagement basieren zu diesem Zweck auf einer Schließmaßgleichung, die die Abhängigkeit eines funktionswichtigen Schließmaßes von Bauteilmaßen und Bauteiltoleranzen darstellt [5]. Auf Basis dieses meist analytischen Zusammenhangs können verschiedene Fragestellungen beantwortet werden, wie z. B. welche Auswirkung eine Toleranzaufweitung eines Bauteilmaßes auf die Funktionserfüllung des Bauteils hat und wie eine zulässige Schließmaßtoleranz kostenoptimal auf die einzelnen Bauteiltoleranzen allokiert werden kann.

Bei diesem Vorgehen beschränkt man sich jedoch zumeist auf Maßtoleranzen, wohingegen die Auswirkungen von Form- und Lagetoleranzen auf das Produktverhalten unberücksichtigt bleiben. Neuere Ansätze versuchen daher, die Methodik im Toleranzmanagement nicht auf das Aufstellen und die Analyse einer Schließmaßgleichung zu reduzieren, sondern das Verhalten nicht-idealer Bauteile, also Bauteilen mit geometrischen Abweichungen, in Simulationen dreidimensional und unter Berücksichtigung von Form- und Lageabweichungen nachzubilden[6][7][8]. Dies entspricht auch der Idee des seit Anfang 2012 in den Normen für die Geometrische Produktspezifikation übernommenen Konzept des Oberflächenmodells (DIN EN ISO 17450-1). Für dieses Vorgehen ist es zunächst jedoch erforderlich, die Form- und Lageabweichungen der erzeugten abweichungsbehafteten Bauteile virtuell zu bestimmen.

2 Repräsentation und Erzeugung abweichungsbehafteter Geometrie

2.1 Punktwolken als Geometrierepräsentationsschema für dreidimensionale Festkörper

Moderne CAx-Modellierungs- und Simulationswerkzeuge basieren auf einer Repräsentation physikalischer Objekte. Hierbei ist das sogenannte „solid modelling“ als eine Menge konsistenter Prinzipien für das mathematische und

rechnerunterstützte Modellieren dreidimensionaler Festkörper zu verstehen [9]. Gängige Repräsentationsschemata für dreidimensionale Objekte können hierbei unterschieden werden in Kantenmodelle, Oberflächenmodelle, Volumenmodelle und Zellenmodelle [10].

Die Repräsentation von dreidimensionalen Festkörpern durch Punktwolken kann als Oberflächenmodell interpretiert werden und zeichnet sich durch Einfachheit und Vielseitigkeit aus. Eine Punktwolke stellt in diesem Zusammenhang eine Menge von Punkten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem dar, die meist durch x -, y - und z -Koordinaten definiert werden. Typischerweise soll die Oberfläche eines Festkörpers durch die Punktwolke beschrieben werden. Im Gegensatz zu einem Boundary-Representation Scheme (BRep), welches ein Volumenmodell darstellt, ist die Information über Innen- und Außenseite des Objektes hierbei nicht beinhaltet. Durch Triangulation kann meist auch ein Oberflächennetz des Objektes aus der Punktwolke erzeugt werden. Die Repräsentation der Oberfläche eines Objektes durch Punktwolken bietet zusammengefasst einige spezifische Vor- und Nachteile:

- Das Punktwolkenkonzept ist simpel und führt zu höchstens geringen Konvertierungsproblemen wenn verschiedene Software-Werkzeuge verwendet werden.
- Punktwolken werden typischerweise von 3D-Scannern in Fertigungs-, Qualitätssicherungs- und Messtechnikanwendungen erzeugt.
- Der Approximationsgrad der zu beschreibenden Oberfläche kann durch die Dichte der Punktwolke angepasst werden.
- Oberflächennetze können mittels Triangulation aus der Punktwolke erzeugt werden und bieten weitere Möglichkeiten zur Oberflächenapproximation und -visualisierung.
- Andere Oberflächenmodelle können aus der Punktwolke durch Flächenrückführung aufbereitet werden.
- Die Oberflächenrepräsentation mittels Punktwolken bietet keine Information über Innen- und Außenseite des Bauteils.
- Punktwolken stellen lediglich eine Approximation der wahren Oberflächen des Objektes dar.

Zwar hat die Repräsentation von Bauteiloberflächen durch Punktwolken also einige spezifische Nachteile, die Vorteile überwiegen jedoch besonders für die Anwendung im virtuellen Toleranzmanagement.

2.2 Erzeugung abweichungsbehafteter Punktwolken

Da im virtuellen Toleranzmanagement abweichungsbehaftete Geometrieausprägungen betrachtet und anhand derer die Auswirkungen der geometrischen Abweichungen auf die Funktion und die Qualität des technischen Produktes untersucht werden soll, müssen zunächst die abweichungsbehafteten Geometrieausprägungen gewonnen und erzeugt werden. Hierzu können letztlich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen unterschieden werden, nämlich zum einen die Erzeugung abweichungsbehafteter Geometrien aus der Nominalgeometrie mittels geeigneter mathematischer Verfahren und zum anderen die Auswertung virtueller oder realer Beobachtungen aus schwankenden Fertigungsprozessen. Für den ersten Fall wurden in der Literatur verschiedenste mathematische Verfahren zur Erzeugung abweichungsbehafteter Geometrieausprägungen aus der Nominalgeometrie des Bauteils vorgestellt [1][11][12][13], die im Wesentlichen auf der Verzerrung eines geometriebeschreibendes Oberflächennetzes oder dessen zugrundeliegender Punktwolke basieren. Die zweite Vorgehensweise besteht darin, die abweichungsbehafteten Geometrien aus *virtuellen* Beobachtungen, wie zum Beispiel statistischen Fertigungsprozesssimulationen, oder aus *realen* Beobachtungen, wie zum Beispiel Messungen von Prototypen, zu gewinnen.

3 Vorgehen zur virtuellen Toleranzbeurteilung

Das Vorgehen zur Toleranzbeurteilung abweichungsbehafteter Bauteile, die wie im vorigen Abschnitt beschrieben generiert wurden, kann grob in folgende Schritte gegliedert werden:

- **Zuordnung:**
Zunächst müssen alle für die ausgewählte Toleranz relevanten Punkte der erzeugten oder beobachteten Punktwolke erfasst und zugeordnet werden. Dies können je nach Toleranzart entweder nur Punkte *eines* Features (z. B. im Falle der Ebenheit) oder auch *mehrerer* Features (z. B. im Falle der Parallelität) sein. In diesem Zusammenhang kommen die in DIN EN ISO 17450-1 beschriebenen Operationen am Oberflächenmodell zum Einsatz, wie zum Beispiel die Zerlegung, die Filtration oder die Zuordnung.
- **Bestimmung:**
Anschließend kann dann die Abweichung des relevanten Features in Be-

zug auf die ausgewählte Toleranz ermittelt werden. Das konkrete Vorgehen hierzu ist im nächsten Abschnitt für einige Toleranzen beispielhaft erläutert.

- **Beurteilung:**
Schließlich muss die gemessene geometrische Abweichung mit den zulässigen Werten für die ausgewählte Toleranz verglichen werden. Hierbei können wiederum Toleranzarten mit oberer und unterer Grenze (wie zum Beispiel Maßtoleranzen) als auch Toleranzarten mit lediglich einer Obergrenze (zum Beispiel Form- und Lagetoleranzen) unterschieden werden. Liegt die gemessene Toleranz außerhalb der spezifizierten Toleranz, so ist das Bauteil als Schlechtheil einzuordnen, andernfalls als Gutteil.

4 Virtuelle Toleranzbestimmung am Beispiel der Ebenheit, der Zylindrizität und der Parallelität

An dieser Stelle seien die Toleranzbestimmung für die Ebenheitstoleranz, die Zylindrizität und die Parallelitätstoleranz vorgestellt. Hierbei werden sowohl das Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung der Geometrischen Produktspezifikation (GPS, EN ISO 17450) als auch die Normen zur Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (EN ISO 1101) berücksichtigt. Für diese sowie weitere Maß-, Form- und Lagetoleranzen wurde die dargestellte Vorgehensweise in MATLAB, einem Software-Werkzeug für numerische Berechnungen, implementiert. Die angewandten Verfahren zur Toleranzbestimmung basieren auf verschiedenen mathematischen Verfahren, wie z. B. der Hauptkomponentenanalyse. Jolliffe [14] kann hierzu einen guten Einblick geben.

4.1 Formtoleranz – Ebenheit

„Die Ebenheitstoleranz begrenzt Abweichungen von Deckflächen und Mittelebenen sowie die Geradheit von Linien auf ebenen Flächen“ [15]. Die Toleranzzone ist durch zwei parallele Ebenen mit dem Abstand t beschrieben, d. h. alle erfassten Punkte der tolerierten Fläche müssen sich zwischen diesen parallelen Ebenen befinden.

Zur Bestimmung der Ebenheit einer erfassten Punktwolke wird die relevante Bauteilfläche zunächst durch eine Zerlegung aus dem nicht-idealen Oberflächenmodell erhalten (siehe Bild 1 (a)). Anschließend wird eine Ausgleichsebene in die Punktwolke der nicht-idealen Fläche gelegt (Bild 1 (b)). Diese Ausgleichsebene kann entweder mittels einer einfachen Regression oder unter Anwendung der Hauptkomponentenanalyse durchgeführt werden.

In diesem Fall werden die drei Hauptkomponenten der beschreibenden Punktwolke ermittelt und die dritte Hauptkomponente, d.h. die Hauptkomponente mit dem kleinsten zugehörigen Eigenwert, als Normalenvektor der Ebene interpretiert. Um die Ausgleichsebene vollständig beschreiben zu können, wird zudem ein Punkt auf der Ebene benötigt. Hierfür kann der Mittelpunkt der Punktwolke herangezogen werden. Anschließend werden die Abstände aller Punkte der Punktwolke zu dieser Ausgleichsebene bestimmt (Bild 1 (c)). Die Differenz zwischen größtem und kleinstem Abstand zur Ausgleichsebene entspricht dann der Ebenheit der nicht-idealen Oberfläche. Die Toleranzzone der Ebenheit ist in Bild 1 (d) dargestellt.

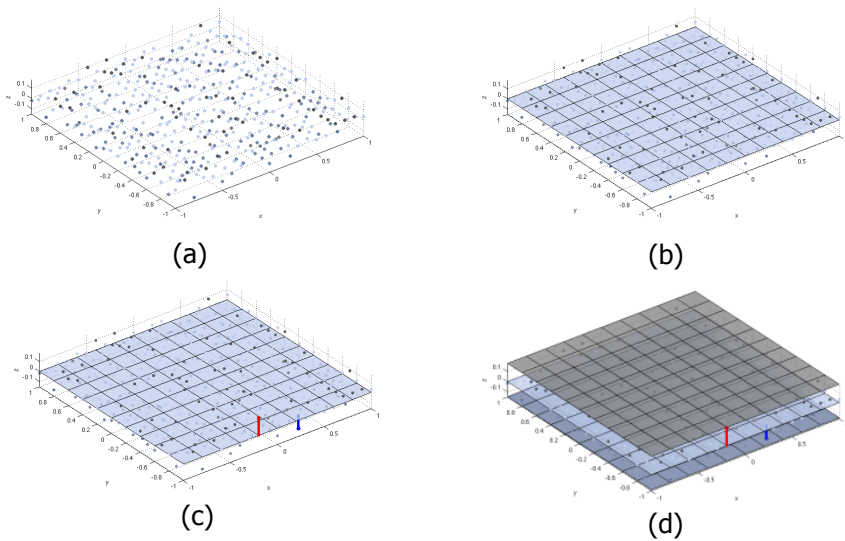


Bild 1: Vorgehen zur Bestimmung der Ebenheitsabweichung einer Fläche

4.2 Formtoleranz – Zylindrizität

„Die Zylindrizität begrenzt Abweichungen von der Zylinderform, Geradheitsabweichungen von Zylindermantellinien, Rundheitsabweichungen von Zylinderquerschnitten und Parallelitätsabweichungen von gegenüberliegenden Mantellinien“ [15]. Hierzu müssen alle Punkte der erfassten Punktwolke zwischen zwei koaxialen Zylindern mit radialem Abstand t liegen. Hierbei werden jedoch die Radien dieser beiden Zylinder nicht festgelegt.

Das Vorgehen zur virtuellen Toleranzbeurteilung für die Zylindrizität ähnelt dem Vorgehen zur Bestimmung der Ebenheit. Zunächst werden auch hier alle



zum Zylinder zugehörigen Punkte der Punktwolke isoliert (siehe Bild 2 (a)). Anschließend wird ein Ausgleichszylinder in die abweichungsbehaftete Punktwolke gelegt (Bild 2 (b)). Auch hierzu kommt die Hauptkomponentenanalyse zum Einsatz, um die Hauptrichtungen des Zylinders (axial und zweimal radial) zu bestimmen. Anschließend werden die radialen Abstände aller Punkte des abweichungsbehafteten Zylinders zum Ausgleichszylinder bestimmt (Bild 2 (c)). Die Differenz zwischen größtem und kleinstem radialen Abstand zum Ausgleichszylinder entspricht dann der Zylindrizitätsabweichung. Die Toleranzzone ist wiederum in Bild 2 (d) dargestellt.

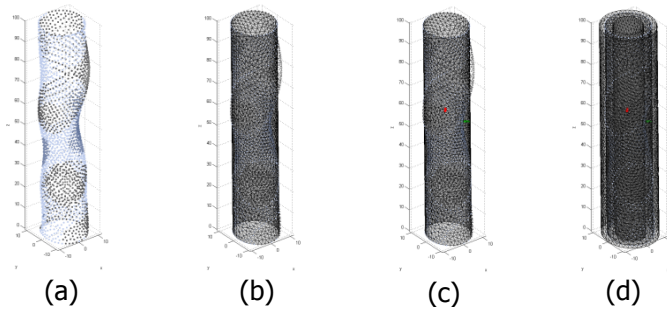


Bild 2: Vorgehen zur Bestimmung der Zylindrizitätsabweichung

4.3 Lagetoleranz – Parallelität

Parallelitätstoleranzen beziehen sich auf Linien oder Ebenen und werden wiederum in Bezug auf eine Linie, eine Ebene oder ein Bezugssystem definiert. In diesem Zusammenhang lassen sich somit verschiedene Kombination aus toleriertem Geometrieelement und Bezugselement unterscheiden [15]. Im Folgenden soll nur auf das Beispiel einer Parallelität zwischen zwei Ebenen eingegangen werden.

Analog zur Bestimmung der Ebenheitstoleranz werden zunächst die Punkte, die zur Bezugsebene als auch zur tolerierten Ebene gehören identifiziert (siehe Bild 3 (a)). Anschließend wird eine Ausgleichsebene als Bezugsebene in die zur Bezugsebene gehörige Punktwolke gelegt (Bild 3 (b)). Auch in diesem Fall kann wieder die Hauptkomponentenanalyse zum Einsatz kommen. Schließlich werden die Abstände der tolerierten Ebene zur Bezugsebene bestimmt (Bild 3 (c)). Die Differenz zwischen größtem und kleinstem Abstand kann dann als Parallelitätsabweichung interpretiert werden. Die Toleranzzone der Parallelität ist in Bild 3 (d) veranschaulicht.

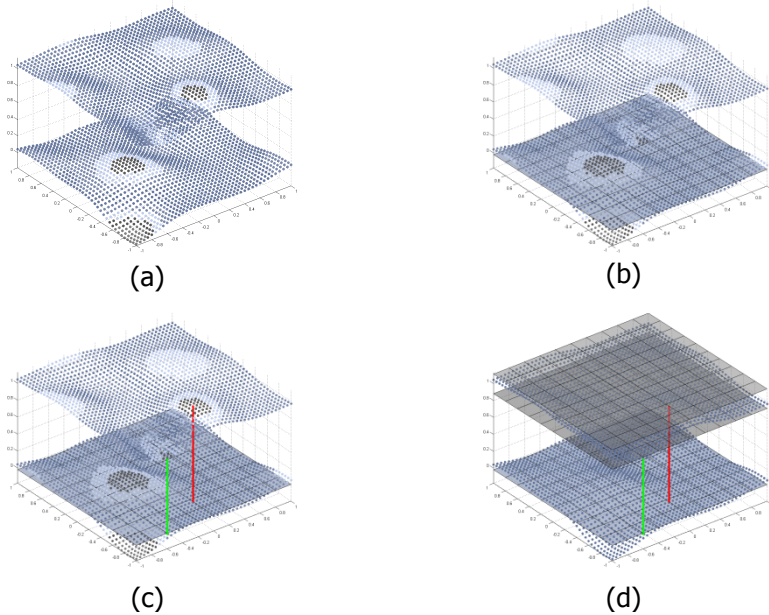


Bild 3: Vorgehen zur Bestimmung der Parallelitätsabweichung einer Ebene

5 Anwendungen und Beispiele

5.1 Evaluation der Prozessfähigkeit eines Spritzgussprozesses

Im Folgenden sollen die dargestellten Ansätze genutzt werden, um die Ergebnisse einer statistischen Fertigungsprozesssimulation, also einer Fertigungssimulation mit schwankenden Prozessparametern, zu untersuchen. Als Beispielbauteil dient hierzu eine einfache Platte mit einem Wanddickensprung (Bild 4), die durch einen Kunststoffspritzgussprozess aus Polypropylen hergestellt wird. Im Rahmen der statistischen Fertigungsprozesssimulation wurden verschiedene Prozessparameter, wie zum Beispiel die Dichte des Werkstoffs, die Schmelztemperatur, die Dauer und die Höhe des Nachdrucks sowie der Schmelzflussindex, als streuend angenommen und für zufällige Kombinationen von Parameterwerten Spritzgussimulationen durchgeführt. Die Ergebnisgeometrien der einzelnen Simulationen wurden als Oberflächennetz exportiert und diese Daten wiederum mit den dargestellten Ansätzen zur Toleranzbeurteilung untersucht.

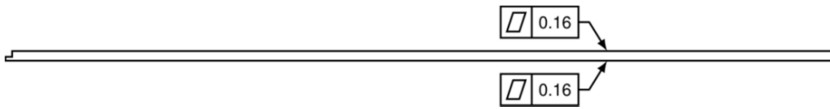


Bild 4: Referenzbauteil für die Prozessfähigkeitsbeurteilung eines Spritzgussprozesses

Die Ergebnisse zeigen die für Kunststoffspritzgussprozesse typische starke Mittelwertverschiebung hinsichtlich verschiedener Maßtoleranzen, d. h. die Bauteilmaße der untersuchten Bauteile liegen unterhalb der unteren Spezifikationsgrenze der Maßtoleranzen, weisen jedoch untereinander geringe Streuung auf. Etwas anders stellt sich die Lage jedoch bei einigen Form- und Lage-toleranzen dar. So zeigen die Ebenheit der oberen Bauteilfläche sowie die Ebenheit der unteren Bauteilfläche jeweils eine erkennbare Streuung um ihre Mittelwerte von 0.1330mm bzw. 0.1404mm (siehe Bild 5). Nachdem jedoch beide Verteilungen deutlich unterhalb der Toleranzgrenze von $t=0.16\text{mm}$ liegen, ist der Prozess als fähig zu betrachten.

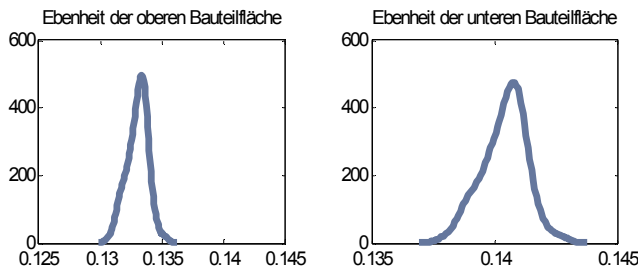


Bild 5: Ergebnisse der Prozessfähigkeitsbewertung – Kerndichteschätzer der Ebenheitsabweichung

5.2 Anwendung im virtuellen Toleranzmanagement - Toleranzanalyse

Neben der Anwendung der dargestellten Methoden zur virtuellen Toleranzbeurteilung für die Evaluation und Vorhersage von Fertigungsprozessfähigkeiten können die Ansätze auch im virtuellen Toleranzmanagement genutzt werden. Die Tätigkeiten im virtuellen Toleranzmanagement können wie eingangs erläutert in die Toleranzspezifikation, die Toleranzallokation und die Toleranzanalyse untergliedert werden. Während bei der Toleranzspezifikation und der Toleranzallokation relevante Toleranzen und deren Werte festgelegt werden, müssen im Rahmen der Toleranzanalyse die Auswirkungen dieser spezifizierten Toleranzen auf die Bauteil- und letztlich die Produktfunktion untersucht werden. Aktuelle Ansätze im Computer Aided Tolerancing beruhen hierzu auf Montage- und Betriebssimulationen von abweichungsbehafteten

Bauteilen, die durch Oberflächennetze oder Punktwolken beschrieben werden [8]. Diesen Simulationen vorgelagert sollte jedoch zunächst eine Toleranzbeurteilung der abweichungsbehafteten Bauteile erfolgen. Der Ablauf der Toleranzanalyse anhand von Oberflächennetzen gliedert sich somit in die Punkte „Erzeugung der Geometrieausprägungen“, „Toleranzbeurteilung der Geometrien“ und „Simulation des Montage- bzw. Nutzungsverhaltens der Bauteile“. Dieses Vorgehen soll nun für einen Ventiltrieb beispielhaft dargestellt werden. Da die Vorteile der Toleranzanalyse durch den Einsatz von Oberflächenmodellen in der Berücksichtigung von Form- und Lagetoleranzen liegen, sollen in diesem Beispiel die Auswirkungen der Ebenheit der Funktionsfläche des Schwinghebels auf die vertikale Position des Stößel untersucht werden (siehe Bild 6).

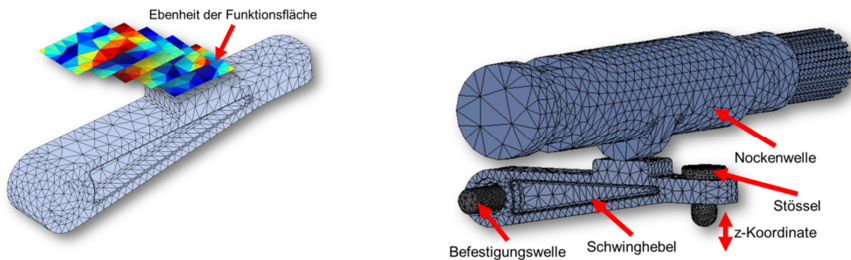


Bild 6: Schwinghebel und nachgebildeter Kontakt zwischen Nockenwelle und Schwinghebel

Hierzu wurden zunächst 500 abweichungsbehaftete Ausprägungen des Schwinghebels durch die Verzerrung des nominalen Oberflächennetzes durch Zufallsfelder [6][12][13] erzeugt. Anschließend wurden die Abweichungen der erzeugten Bauteilausprägungen mit den dargestellten Ansätzen bestimmt und die Bewegung des Ventiltriebs für jede erzeugte abweichungsbehaftete Geometrieausprägung simuliert. Die Ergebnisse sind in Bild 7 dargestellt. Hierbei wurde die vertikale Position des Kontaktpunkts zwischen Stößel und Ventil für jede Geometrieausprägung des Schwinghebels und für einen Rotationswinkel der Kurbelwelle α von 0 bis 720 Grad (also zwei Kurbelwellenumdrehungen) betrachtet.

Es zeigt sich, dass die vertikale Position des Kontaktpunkts bei einer Ebenheitstoleranz von $t=0.25$ geringeren Schwankungen von Bauteil zu Bauteil unterliegt als wenn diese Toleranz nicht vergeben wird. Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann nun die Größe der Toleranz t anhand der verursachenden Kosten und der zulässigen Streuung gewählt werden.

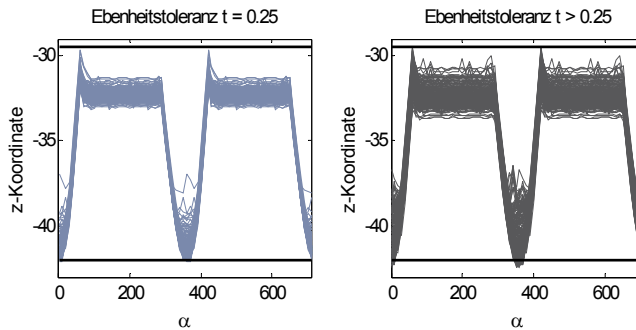


Bild 7: Vertikale Position des Kontaktpunkts zwischen Stössel und Ventil in Abhängigkeit von dem Rotationswinkel der Kurbelwelle α

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anforderungen an die Qualität und damit die geometrische Genauigkeit technischer Produkte einerseits sowie die Forderung nach kostengünstigen Produkten andererseits steigen stetig. In diesem Zusammenhang stellt das virtuelle Toleranzmanagement Methoden bereit, um die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen auf die Produktfunktion als auch auf die mit den Toleranzen verbundenen Herstellungskosten vorherzusagen und leistet damit einen wertvollen Beitrag die Kosten unter Sicherstellung der Produktfunktion zu minimieren. Hierbei rückt die Berücksichtigung von Form- und Lageabweichungen im Rahmen rechnergestützter Toleranzsimulationen immer mehr in den Vordergrund. Es wurde gezeigt, dass die virtuelle Toleranzbeurteilung abweichungsbehafteter Bauteile in diesem Kontext einen wesentlichen Baustein darstellt, da sie es ermöglicht, geometrische Abweichungen zu quantifizieren um anschließend die Auswirkungen dieser geometrischen Bauteilabweichungen auf die Produktfunktion vorherzusagen. Zukünftigen Herausforderungen an die Abbildungsgenauigkeit der Toleranzsimulationsmodelle zur ganzheitlichen und genauen Vorhersage fertigungs-, montage- und betriebsbedingter Bauteilabweichungen kann durch die vorgestellten Ansätze besser begegnet werden.

Literatur

- [1] Zhang, M., Anwer, N., Mathieu, L., Zhao, H.: „A discrete geometry framework for geometrical product specification“, CIRP Design Conference 2011.
- [2] Wartzack et al.: „Lebenszyklusorientierte Toleranzsimulation zur funktionalen und ästhetischen Produktsicherung“, Konstruktion, 2011.

-
- [3] Mathieu, L., Ballu, A.: „A model for a coherent and complete tolerancing process“, *Models for Computer Aided Tolerancing and Manufacturing*, Springer, 2007.
- [4] Armillotta, A., Semeraro, Q.: „Geometric Tolerance Specification“, in: *Geometric Tolerances*, Springer, 2011.
- [5] Hong, Y. S., Chang, T.-C.: „A comprehensive review of tolerancing research“, *International Journal of Production Research*, 2002.
- [6] Schleich, B., Stockinger, A., Wartzack, S.: „On the impact of geometric tolerances on structural performance“, *CIRP CAT 2012*.
- [7] Walter, M., Wartzack, S.: „Analysis of the effects of manufacturing-caused deviations and varying operation parameters on operation-dependent deviations of systems in motion“, *CIRP CAT 2012*.
- [8] Stoll, T., Wittmann, S., Meerkamm, H.: „Tolerance Analysis with detailed Part Modeling including Shape Deviations“, *CIRP CAT 2009*.
- [9] Shapiro, V.: „Solid Modelling“, Technical Report, University of Wisconsin, 2001.
- [10] Vajna, S., Weber, C., Bley, H., Zeman, K.: *CAX für Ingenieure*, Springer 2009.
- [11] Stoll, T.: „Generieren nicht-idealer Geometrie“, 17. Symposium „Design for X“, 2006.
- [12] Bayer, V., Einzinger, J., Roos, D.: „Random Fields: Theory and Applications“, *Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage WOST 6.0*, 2009.
- [13] Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., Walter, M., Wartzack, S.: „A comprehensive framework for skin model simulation“, *Proceedings of the ASME 11th Conference on Engineering Systems Design and Analysis 2012*.
- [14] Jolliffe, I. T.: „Principal Component Analysis“, Springer, 2002.
- [15] Weckenmann et al.: „Geometrische Produktspezifikation (GPS)“, Lehrstuhl QFM, Erlangen, 2001.

Bestimmung charakteristischer Unsicherheiten im Auslegungsprozess von Bauteilen aus Faserkunststoffverbunden

Conny Schillo, Dieter Krause

*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT);
Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)*

1 Motivation

Trotz des hohen Festigkeits- zu Steifigkeitsverhältnis von endlosfaserverstärkten Kunststoffverbunden, wird das Leichtbaupotential dieser Werkstoffgruppe noch nicht voll ausgenutzt. Gründe hierfür liegen u.a. in einer Reihe von charakteristischen Unsicherheiten, die im Auslegungsprozess vorhanden sind.

In einer klassischen, deterministischen Auslegung, werden diese Unsicherheiten über einen globalen Sicherheitsfaktor abgesichert. Um ein konservativ ausgelegtes Bauteil zu erhalten, ergibt sich dieser Sicherheitsfaktor somit aus dem Produkt von „worst case“-Szenarien für alle auftretenden Unsicherheiten und ist empirisch ermittelt. Die Analyse eines in dieser Weise ausgelegten Bauteils resultiert dann in einer einfachen Aussage: Bauteil erfüllt das Auslegungskriterium, oder Bauteil erfüllt das Kriterium nicht. Auftretende Unsicherheiten werden dabei nicht explizit quantifiziert und können nicht separiert betrachtet werden. Auch Streuungen auslegungsrelevanter Parameter werden nicht betrachtet. Somit ist die tatsächliche vorhandene Sicherheit im Bauteil nicht bekannt. Aus der Empirie bezüglich des erfolgreichen Designs ist lediglich bekannt, dass eine ausreichend konservative Struktur vorliegt.

Aus zweierlei Gründen kann dieses Ergebnis unzureichend sein: zum einen ist bei Bauteilen mit hohem Risikofaktor, bei denen ein Versagen zu einer Gefährdung von Mensch und Umwelt führen würde, die Annahme eines deterministischen Struktur- und Lastverhaltens nicht konservativ genug. Bei der Auslegung solcher Bauteile wird daher akzeptiert, dass die Natur der Eingangsparameter sowohl auf Struktur- wie auch auf Lastseite stochastische Verteilungen aufweisen, und es keine hundertprozentige Sicherheit gegen Versagen gibt. Stattdessen wird eine gewünschte Überlebenswahrscheinlichkeit definiert, die unter Einbeziehung von Unsicherheiten der Last- und Widerstandsgrößen erreicht werden muss. Solche probabilistisch motivierten Auslegungsmethoden werden daher zum Beispiel bei Bau und Instandhaltung von Offshore-Anlagen verwendet [2].

Zum anderen ist eine deterministische Auslegung zu konservativ, wenn aus Performance- oder Kostengründen ein maximaler Ausnutzungsgrad der Struktur gefordert wird. Durch die Feststellung der tatsächlich im Designprozess vorhandenen Unsicherheiten in Verbindung mit einer probabilistische Auslegungsphilosophie ist zu erwarten, dass ein höherer Leichtbaugrad als derzeit umgesetzt erreicht werden kann [3,4].

2 Stand der Technik

2.1 Auslegungsphilosophien

In einem deterministischen Sicherheitskonzept wird ein globaler Sicherheitsfaktor definiert. Er wird häufig spannungsbasiert betrachtet. Das heißt es wird zunächst die auftretende Spannung σ_L im Bauteil ermittelt. Diese muss dann niedriger sein als die zulässige Spannung des Materials σ_{zul} dividiert durch den Sicherheitsfaktor n :

$$\sigma_L \leq \frac{\sigma_{zul}}{n}$$

Dieser Sicherheitsfaktor n ist ein empirisch ermittelter, der sich in der Vergangenheit als ausreichend herausgestellt hat, und auf Grund dieser Erfahrung auf Bauteile mit jeweils ähnlichen Anforderungen übertragen wird.

In einem semi-probabilistischen LRFD-Ansatz (Load and Resistance Factor Design) werden Teilsicherheitsfaktoren mit den charakteristischen Lasten S_k bzw. „Materialwiderstand“ R_k multipliziert und so unterschiedliche Unsicherheitsursachen differenziert betrachtet [1,2]:

$$\gamma_F \cdot \gamma_{sd} \cdot S_k \leq \frac{R_k}{\gamma_M \cdot \gamma_{Rd}}$$

γ_F und γ_{sd} stellen die Teilsicherheitsfaktoren für die auftretenden Lasten und das Lastmodell dar, γ_M und γ_{Rd} entsprechend die Teilsicherheitsbeiwerte für Unsicherheiten der Materialkennwerte und des Strukturmodells („Widerstandsseite“). Über die Teilsicherheitsbeiwerte werden zum Teil stochastische Verteilungen der beeinflussenden Variablen berücksichtigt, zum Teil sind sie empirisch ermittelt.

In der nächsten Stufe geht neben dem Mittelwert der Eingabegrößen auch die Standardabweichung mit ein. Mit deren Hilfe kann ein sogenannter Zuverlässigkeitsindex β berechnet werden.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f wird dann über folgende Zusammenhänge abgebildet

$$P_f = 1 - \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right)$$

Die probabilistisch „exakte“ Methode ist charakterisiert durch eine vollständige Berücksichtigung aller im Designprozess auftretenden Unsicherheiten über die Auswertung der entsprechenden Verteilungsfunktionen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die probabilistische Auslegung im Gegensatz zur deterministischen nicht Fehler in der Auslegung zulässt, sondern lediglich akzeptiert, dass es keine absolute Sicherheit für die Bauteil-auslegung gibt. Das Maß für die Sicherheit ist daher kein singulärer Faktor mehr, sondern eine kumulierte Wahrscheinlichkeitsaussage.

2.2 Probabilistische Auslegung von Faserkunststoffverbunden (FKV)

Stand der Technik aktueller Auslegung von Faserverbundstrukturen ist vor allem die deterministische Auslegung sowie die semi-probabilistische Auslegung. Deterministische Auslegung ist im klassischen Maschinenbau [13] und dem Schiffbau verbreitet [15],[16]. Hierin wird zum Teil mit Hilfe von empi-

risch gewonnenen Abschlagfaktoren für Materialtyp, Fertigungsverfahren, Belastungsart u.ä. der deterministische globale Sicherheitsfaktor modifiziert. Was die Auslegung bezüglich Extremallasten angeht, wird für die Zertifizierung von Windkraftanlagen ein semi-probabilistischer Ansatz für die Widerstandsseite verfolgt. Für die Lastseite werden statistische Auswertungen der Windlasten verwendet [14].

Für die Auslegungsphilosophie im Flugzeugbau ist das Composite Materials Handbook von besonderer Bedeutung. Es wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium in Zusammenarbeit mit der Federal Aviation Administration und zahlreichen Industrie- und universitären Partnern mit dem Ziel erarbeitet Grundlagen für Industriestandards zu schaffen. Im dritten Band [3] werden in umfassender Weise Daten und Methoden zur Auslegung und Analyse von Faserverbundstrukturen zur Verfügung gestellt. Zu bemerken ist, dass ein probabilistischer Ansatz für die Auslegung hierin zwar empfohlen wird, eine stringente Methode aber erst für die nächste Edition angekündigt wurde.

In der Literatur erfährt die Anwendung probabilistischer Ansätze für FKV-Strukturen seit den 90er Jahren mehr Aufmerksamkeit. Kriegesmann et. al entwickelte einen semi-analytischen, probabilistischen Ansatz zur Vorhersage der stochastischen Verteilung der Beullast zylindrischer Schalen. Dabei wurde der Einfluss geometrischer Imperfektionen auf die Beullast [17] sowie der Einfluss streuender Lagerungsbedingungen und Materialparameter untersucht [18]. Mit Hilfe verschiedener Analysemethoden und Korrelationsanalysen wurden die geometrischen Parameter als stärkste Einflussfaktoren auf die Beullast identifiziert. Die in Abhängigkeit der Analysemodelle ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten variierten zum Teil stark. Kritisch wurde der Einfluss der sehr konservativ angenommenen geometrischen Streuungen bewertet, welche zu niedrigen Zuverlässigkeitsaussagen führte. Motley [19] untersuchte den Einfluss streuender Materialparameter, geometrischer Größen und Lasten auf die Systemzuverlässigkeit eines selbst-adaptierenden Rotors. Die Ursache der Streuungen der Materialsteifigkeiten und Festigkeiten wurde allerdings nicht weiter untersucht. Um eine skalenübergreifende, konsistente probabilistische Auslegungsmethode für Faserverbundkunststoffe umzusetzen, müssen die Streuungen der Materialeigenschaften jedoch mit berücksichtigt werden..

2.3 Berücksichtigung von charakteristischen Unsicherheiten in der Kennwertermittlung

Unsicherheiten werden in aleatorische (zufällige) Unsicherheiten, und epistemische (modellbedingte) Unsicherheiten unterteilt. Erstere bezeichnet Unsicherheiten, die systembedingt vorhanden sind, epistemisch bezeichnet solche, die auf Grund des Analysemodells vorliegen (Bild 1). Diese können theoretisch durch ein mehr an Informationen reduziert werden.

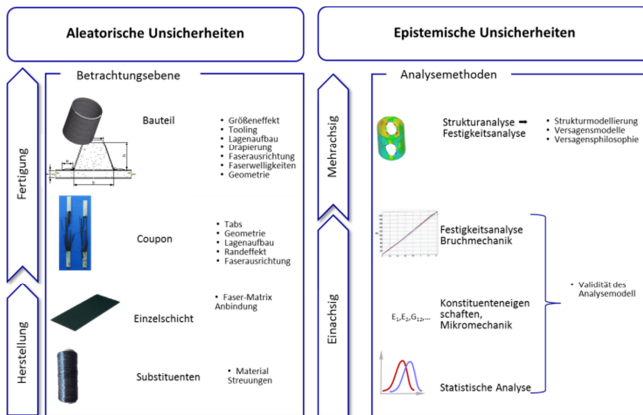


Bild 1: Skalensabhängige Unsicherheiten

Strukturell zeichnen sich Faserkunststoffverbunde durch ihre inhomogene Zusammensetzung und ihren hierarchischen Aufbau aus. Auf der kleinsten Betrachtungsebene stehen die Eigenschaften der Konstituenten, bestehend aus den einzelnen Faserbündel und der Matrix. Diese werden zu einer Einzelschicht verarbeitet. Zu den Unsicherheiten bezüglich der Streuung der Eigenschaften der Konstituenten kommt dann die Unsicherheit bezüglich der Faser-Matrix Anbindung. Die gebildeten Einzelschichten werden automatisiert oder von Hand zu Platten verarbeitet, aus denen kleine Probekörper ausgesägt werden (Coupons). Diese werden zur Ermittlung von Materialkennwerten herangezogen. Tendenziell weisen Faserkunststoffverbunde im Vergleich zu metallischen Werkstoffen hohe Streuungen auf. Es hat sich aber gezeigt, dass diese in hohem Maße mit dem gewählten Lagenaufbau ([10], [5]), der Präparierung der Proben ([11],[5]) und der Versuchsdurchführung [12] zusammenhängen. Die in den Normen beschriebenen Verfahren führen im Allgemeinen zu konservativen Kennwerten. Das Verhalten des Materials im Bauteil kann sich aber auf Grund anderer Lagenaufbauten und Randbedingungen unterscheiden.

Auf Bauteilebene treten Unsicherheiten auf, die stark durch den Fertigungsprozess geprägt sind. Abhängig von der Komplexität des Bauteils ist es schwierig, diese zu quantifizieren, beziehungsweise allgemeingültige Aussagen zu treffen. Hervorzuheben sind die Arbeiten von Potter et al., in der wesentlichen Merkmale Faserkunststoff-spezifischer Fertigungsverfahren und deren Einfluss auf das Design experimentell untersucht werden [6]. Ebenfalls auf Bauteilebene angeordnet sind Unsicherheiten bezüglich der Interaktion mit dem Fertigungswerkzeug. Hier können z.B. durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten beim Abkühlen Eigenspannungen in das Bauteil induziert werden [7].

Neben Kenntnissen über diese aleatorischen Unsicherheiten, ist für den Konstrukteur die modellabhängige Unsicherheit der Strukturanalyse von Bedeutung. Hierzu zählen neben dem Detailgrad des Modells (z.B. in analytischen gegenüber Finite Element-Modellen) auch die Zuverlässigkeit der verwendeten Versagensmodelle. Bedingt durch deren anisotrope und inhomogene Natur, ergeben sich für Faserverbundwerkstoffe eine Vielzahl von Schadensmechanismen, die einzeln oder gekoppelt miteinander auftreten und zu unterschiedlichen Schadensmoden führen können, bzw. für unterschiedliche Lagenaufbauten unterschiedliche Verläufe aufweisen. Die rechnerische Vorsage des Schadens mit Hilfe von Festigkeitskriterien kann je nach Lastfall und Lagenaufbau mit hohen Unsicherheiten behaftet sein [8]. Insbesondere für Bauteilkomponenten, welche komplexer, mehrachsialer Belastung ausgesetzt sind, könnte eine unabhängige Betrachtung der reinen einachsialen Festigkeitsmodelle zu unkonservativen Auslegungen führen.

3 Analyse eines Biegebalkens

Zur Demonstration der unterschiedlichen Auslegungsmethoden wird ein einfaches Biegebalkenproblem sowohl deterministisch wie probabilistisch ausgelegt. Als Eingabeparameter dienen dabei Materialkennwerte aus eigenen Couponversuchen.

3.1 Ermittlung von Materialparametern

Es werden zunächst Coupontests an einem Kohlefaserprepregmaterial durchgeführt. Die Zugversuche werden nach DIN EN ISO 527 durchgeführt. Dabei wurden aus zwei Platten mit einem Lagenaufbau von $8 \times 0^\circ$ und einer Platte mit dem Lagenaufbau $[90/0/90/0]_S$ (Kreuzlaminat) Proben ausgeschnitten. Die Probenränder wurden geschliffen und poliert und die Enden mit Glasfaser und Aluminiumtabs beklebt. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Neben dem Mittelwert und der Standardabweichung

chung ist der Varianzkoeffizient (coefficient of variance, CoV) angegeben. Er ergibt sich aus der Division der Standardabweichung zum zugehörigen Mittelwert und ist ein Maß für die Streuung des betrachteten Parameters.

Auffällig sind die Unterschiede zwischen den beiden 8x0° Platten. Hier unterscheiden sich die maximalen Dehnungen zwar nur um etwa 2%. Die Streuungen der maximalen Dehnungen liegen bei der zweiten gemessenen Platte allerdings um 235% darüber.

Die maximal gemessene Dehnung des Kreuzlaminats liegt geringfügig unterhalb der 0°-Platten, die Streuungen liegen zwischen diesen.

Auch für eine deterministische Auslegung wird im Allgemeinen die Streuung der Materialfestigkeiten mit berücksichtigt. Abhängig vom Einsatz des Bauteils und möglichem Schadenszenario werden bestimmte Quantile gefordert, die in einem definierten Vertrauensbereich gewährleistet sein müssen. Für dieses Beispiel wurde der sogenannte B-Wert gewählt. Dies entspricht dem 10%-Quantil der Festigkeitsverteilung mit einem unteren Vertrauensbereich von 95% [3].

Lagenaufbau	8x0° Platte 1		8x0° Platte 2		Platte 1&2 kombiniert		[90/0/90/0] _s	
Anzahl Proben	9		6				7	
	Dehnung [%]	E-Modul [Mpa]	Dehnung [%]	E-Modul [Mpa]	Dehnung [%]	E-Modul [Mpa]	E-Modul [Mpa]	E-Modul [Mpa]
Mittelwert	1,84	132000	1,88	132700	1,86	13200	1,82	74300
Standardabweichung	0,04	6250	0,11	6450	0,08	6250	0,08	4820
CoV %	2,40	4,74	5,65	4,86	4,16	4,74	4,50	6,00
R(10%,95%)	1,77		1,70		1,75		1,69	
SF (1,5)	1,18		1,13		1,17		1,13	

Tabelle 3-1 Zugversuche

Die Druckversuche werden nach AITM 1.008 mit einem quasi-isotropen Laminat aus 32 Lagen durchgeführt. Die Präparierung erfolgt analog zur Präparierung der Zugproben.

Lagenaufbau	[90 +45 0 -45 / 90 -45 0 +45/ 90 +45 0 -45 / 90 -45 0 +45] _s	
Anzahl Proben	6	
	Dehnung [%]	E-Modul [Mpa]
Mittelwert	1,05	44000
Standardabweichung	0,11	783
CoV %	0,11	
R(10%,95%)	0,84	
SF(1,5)	0,56	

Tabelle 3-2 Druckversuche

Es ist festzustellen, dass die Varianz der gemessenen Werte deutlich höher ist, als bei den Zugversuchen. Dies liegt an dem komplexeren Versagensmode der Druckproben: trotz des gewählten quasi-isotropen Lagenaufbaus, in dem die 0°-Lagen durch benachbarte 90°- und 45°-Lagen gestützt werden, ist nicht gewährleistet, dass tatsächlich der reine Faserbruch gemessen wird. Bei reiner Druckbeanspruchung, wie beim Druckversuch umgesetzt, spielt das lokale Knicken von Fasern ebenfalls eine Rolle, beziehungsweise eine Kombination der Versagensmechanismen.

3.2 Problembeschreibung

Ein lateral belasteter Biegebalken wird im ersten Schritt deterministisch auf eine maximale Dehngrenze ausgelegt. Der Balken soll eine Breite von 50 mm und eine Gesamthöhe von 30 mm haben. Als Last wurden 2800 N definiert. Der Wert wurde konstant gehalten, da bei dieser Untersuchung vor allem der Einfluss der Materialparameter von Interesse ist. Fertigungsrelevante Unsicherheiten werden ebenfalls nicht betrachtet. Schubverformungen in Lastrichtung werden im ersten Schritt vernachlässigt und lediglich maximale Zug- und Druckspannungen in Längsrichtung in den Einzellagen betrachtet. Der gewählte Sicherheitsfaktor von 1,5 bezogen auf die B-Werte führt auf die in Tabelle 3-1 aufgeführten Werte. Damit ergibt sich der in Bild 2 dargestellte Lagenaufbau.

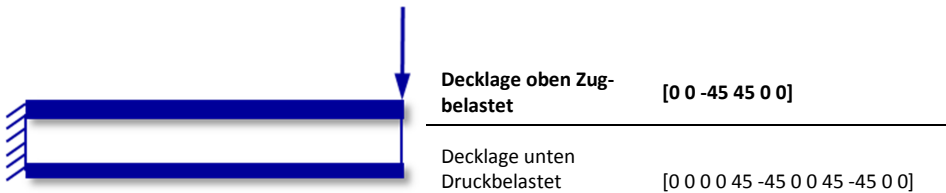


Bild 2: Biegebalken mit Lagenaufbau

Die Zug- und Druckseite des Biegebalkens sind damit in Bezug auf den Sicherheitsfaktor von 1,5 ausgelastet.

Ausschlaggebend für die Auslegung sind in diesem Falle die äußersten Lagen, da sie am höchsten belastet sind. Als Kriterium für das Versagen des Bauteils wird das Überschreiten der maximal zulässigen Dehnung in der Einzelschicht herangezogen („first ply failure“). Die maximal zulässige Dehnung wird aber im Unterschied zur deterministischen Auslegung als normalverteilt angenommen.

3.3 Monte Carlo Simulation

Mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation werden nun die Unsicherheiten bestimmt, die den größten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit haben. Dabei wird auf Grund fehlender Vergleichsdaten für die Druckkennwerte vor allem der Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit auf der Zugseite betrachtet.

Es werden fünf Parameter pro Einzelschicht verändert: die Einzelschichtdicke, die Lagenorientierung, der E-Modul, die maximal zulässige Dehnung sowie die Standardabweichung der maximalen Dehnung. Für die Zugseite mit 6 Einzelschichten ergeben sich somit 30 Eingangsgrößen. Für die Variation wurden folgende Annahmen getroffen:

- Einzelschichtdicke: Normalverteilt, $m=0.13$ mm, $s=0,0026$ mm
- Lagenorientierung: Normalverteilt, $m=0^\circ$, $s=3^\circ$
- E-Modul: Normalverteilt, $m=132000$ MPA, $s=6250$ MPA
- Maximale Dehnung: gleichverteilt, mit Daten aus Platte 1 und 2 als untere und obere Grenze (konservativ)
- Standardabweichung der maximalen Dehnung: gleichverteilt, mit Daten aus Platte 1 und 2 als untere und obere Grenze

Die Analyse wurde mit 10000 Sampeln durchgeführt. Für jede der sechs Schichten auf der Zugseite wurde die Korrelation der variierten Parameter mit der Versagenswahrscheinlichkeit der höchst belasteten äußersten Lage untersucht. Das Ergebnis ist in Bild 3 dargestellt. Auf der linken Seite ist die Korrelationsanalyse ohne die Variation der Standardabweichung zu sehen. Hierbei zeigt sich, dass die Variation der Einzelschichtdicken innerhalb der definierten Toleranzen keinen signifikanten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit hat. Die Variation der Lagenorientierung der 45°-Lagen hat einen etwas höheren Einfluss, da durch die Orientierung hin zur 0°-Richtung (positive Korrelation für die -45° Lage, negative Korrelation für die +45° Lage) die Lage sich innerhalb des Gesamtsystems steifer verhält und dadurch mehr Last übernimmt. Die Variation des E-Moduls in den 0°-Lagen hat den größten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit. Dies ist insofern interessant, als das für den E-Modul im Designprozess üblicherweise keine speziellen Angaben über die statistische Absicherung gemacht werden, im Gegensatz zu den Festigkeitskennwerten.

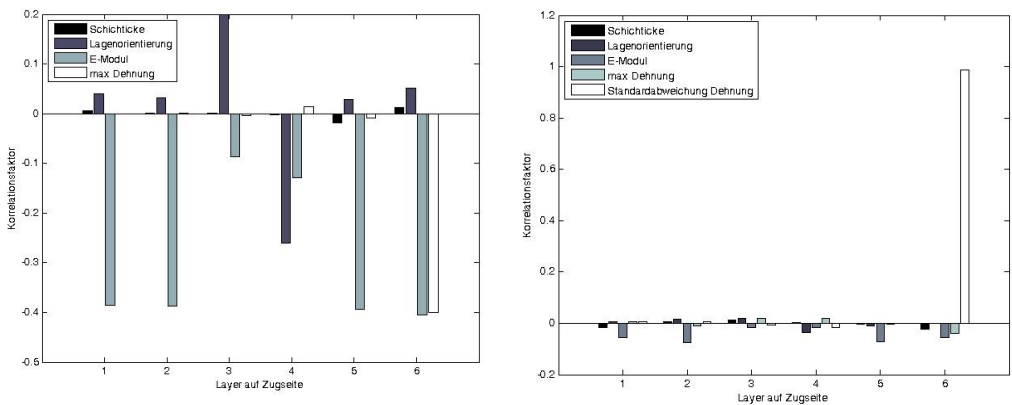


Bild 3 Korrelationsanalyse

Nimmt man die Variation der Standardabweichung der zulässigen Dehnung als zu variierenden Parameter hinzu, so zeigt sich ein ausgeprägt dominierendes Verhalten (Bild 7, rechts). Es ist direkt einsehbar, dass die Streuung auf Grund der Auswertmethode über die Versagenswahrscheinlichkeit einen hohen Korrelationsfaktor aufweisen muss. Im quantitativen Vergleich wird aber die Bedeutung einer repräsentativen Streuung für das Verhalten im Bauteil deutlich.

3.4 Vergleich zwischen deterministischem und probabilistischem Auslegungsansatz

Um resultierende Unsicherheiten der deterministischen Auslegung aufzuzeigen, werden für diese Auslegung nun neben den maximal in den äußersten Schichten auftretenden Dehnungen und dem tatsächlichen Sicherheitsfaktor (SF), der Zuverlässigkeitsindex b und die Versagenswahrscheinlichkeit P_f berechnet (Tabelle 3-3). Es zeigt sich, dass bei etwa gleichbleibendem Sicherheitsfaktor deutliche Sprünge in der Versagenswahrscheinlichkeit auftreten. Weiterhin ist durch die Abhängigkeit der Festigkeitsstreuungen vom Schadensmechanismus, die Druckseite bei ähnlichem Sicherheitsfaktor mit einer deutlich höheren Versagenswahrscheinlichkeit behaftet.

Inputparameter	e_z	b	SF	P_f
Platte 1 8x0°	1,15	17,2	1,54	1,0E-66
Platte 2 8x0°	1,15	6,6	1,48	1,7E-11
Platte 1 & 2 kombiniert	1,15	8,9	1,52	4,0E-19
Platte 3 [90/0/90/0]S	1,15	8,4	1,47	3,2E-17
	e_D	b	SF	P_f
Quasiisotrope Platte 32 Lagen	-0,55	4,5	1,53	4,3E-06
Platte 1 & 2 kombiniert; Auslegung auf Versagenswahrscheinlichkeit	1,47	4,9	1,2	4,1E-07

Tabelle 3-3 Deterministische und probabilistische Auslegung

Aus der Erkenntnis dieser Zusammenhänge ergeben sich zwei mögliche Szenarien, wenn die Struktur auf die gleiche Versagenswahrscheinlichkeit ausgelegt werden soll: die Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-6} auf der druckbelasteten Seite wird als zu hoch eingeschätzt. Dann müsste die Struktur weiter verstärkt werden, um die maximale Dehnung zu reduzieren und de facto einen höheren Sicherheitsfaktor zu realisieren. Auf der anderen Seite können auf der Zugseite Lagen eingespart werden, sollte die Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-6} als ausreichend eingestuft werden. Durch Reduzierung um eine 0° Lage ergibt sich für den hier untersuchten Balken der in der letzten Zeile von Tabelle 3-3 dargestellte Sachverhalt. Hier wird die äußerste Lage so hoch belastet, dass der Sicherheitsfaktor auf den B-Wert nur noch 1,2 beträgt. Die Versagenswahrscheinlichkeit liegt aber in einer ähnlichen Größenordnung wie die höchst belastete Drucklage. Dieses Ergebnis zeigt das Potential der probabilistischen Auslegung, und wie die Quantifizierung

der vorhandenen Unsicherheiten genutzt werden kann um die Materialreserven konsequent auszunutzen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Bisherige deterministische Auslegungsverfahren lassen keine Quantifizierung der im Designprozess auftretenden Unsicherheiten zu. Probabilistische Verfahren akzeptieren das Fehlen einer absoluten Sicherheit gegen Versagen und geben daher eine Ausfallwahrscheinlichkeit als Auslegungsgrenze vor. Die Quantifizierung und Berücksichtigung dieser Unsicherheiten ist Voraussetzung für einen höheren Ausnutzungsgrad des Werkstoffes bei gleichbleibender angestrebter Ausfallwahrscheinlichkeit.

Für eine probabilistisch „exakte“ Auslegung müssen alle Unsicherheiten im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Die Unsicherheiten, welche mit den Materialkennwerten verbunden sind, wurden in dieser Studie näher untersucht. Anhand eines Biegebalkens wurde ein probabilistischer Auslegungsansatz unter Berücksichtigung von Streuungen der Materialkennwerte demonstriert. Dabei wurden die wesentlichen Einflussfaktoren mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation identifiziert. Es zeigt sich, dass die Unterschiede in den Streuungen für unterschiedliche Probenplatten (zwei Platten mit 0°-UD, eine mit Kreuzlaminat) trotz der Berücksichtigung von Streuungen über den B-Wert den größten Einfluss auf die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit haben. Die Ergebnisse aus den Coupon-Versuchen sind wegen des Einflusses der Versuchsbedingungen auf das Ergebnis kritisch im Hinblick auf die Übertragbarkeit für das Verhalten im Bauteil zu bewerten. Um eine Aussage für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Bauteils treffen zu können, muss dieser Einfluss weiter untersucht werden. Ziel ist die Definition eines geeigneten Probekörpers mit entsprechendem Lagenaufbau, der wenig sensitiv gegenüber den Versuchsbedingungen ist und den Schadensmechanismus aufweist, der tatsächlich im Bauteil erwartet wird. In weiteren Schritten müssen die Unsicherheiten im Fertigungsprozess und im Analyseprozess bestimmt werden.

Literatur

- [1] Melchers, R.E: "Structural Reliability, Analysis and Prediction", Second Edition, John Wiley & Sons, 1999.
- [2] "Offshore Standard DNV-OS-C501: Composite Components", Det Norske Veritas, 2010.
- [3] "Composite Materials Handbook. Volume 3: Polymer Matrix Composites. Materials Usage, Design and Analysis" (MIL-HDBK-17-3F), Washington DC, Department of Defense, 2002.
- [4] Sriramula, S.; Chryssanthopoulos, M.K: "Quantification of uncertainty modeling in stochastic analysis of FRP composites", Composites Part A (40), S. 1673–1684, 2009.
- [5] Hart-Smith, L.J: "Backing-out Composite Lamina Strengths from Cross-Ply Testing", Comprehensive Composite Materials, Kap. 5.07, S. 149–161, 2000.
- [6] Potter, K.D.; Khan, B.; Wisnom, M.R.; Bell, T.; Stevens, J.: "Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures", Composites Part A (39), S. 1343-1354, 2008.
- [7] Potter, K.D.; Davies, R.; Barrett, M.; Godbehere, A.; Bateup, L.; Wisnom, M. R.; Mills, A.: "Heavily loaded bonded composite structures: design, manufacture and test of 'I' beam specimens", Composite Structures (51), S.389-399, 2001.
- [8] Hinton, M.J; Kaddour, A.S; Soden, P.D: "A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence", Composites Science and Technology (62), S. 1725–1797, 2002.
- [9] Braml, T.: "Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk", Dissertation, 2012.
- [10] Jackson, K.E.; Kellas, S.; Morton, J.: "Scale Effects in the Response and Failure of Fiber Reinforced Composite Laminates Loaded in Tension and in Flexure", Journal of Composite Materials, S. 2674-2705, 1992.

-
- [11] Lavoie, J.A.; Soutis, C.; Morton, J.: "Apparent strength scaling in continuous fiber composite laminates", *Composite Science and Technology* (60), S. 283-299, 2000.
- [12] Schulte, K.; Fiedler, B.: "Structure and Properties of Composite Materials", TuTech Innovation GmbH, 2nd edition, 2005.
- [13] VDI 2014: „Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund – Berechnungen“, 2006
- [14] Germanischer Lloyd, "Richtlinien für die Zertifizierung von Windkraftanlagen", Vorschriften und Richtlinien Industriedienste, 2003.
- [15] Germanischer Lloyd, „Yachts and Boats up to 24m“, Rules for Classification and Construction: Ship Technology, Part 3: Special Craft, 2003.
- [16] Bureau Veritas, "Rules for Classification and Certification of Yachts", 2012.
- [17] Kriegesmann, B.; Rolfes, R.; Hühne, C.; Kling, A.: „Fast probabilistic design procedure for axially compressed composite cylinders“, *Composite Structures* (93), S. 3140-3149, 2011.
- [18] Kriegesmann, B.; Jansen, E.L.; Rolfes, R.: „Semi-analytic probabilistic analysis of axially compressed stiffened composite panels“, *Composite Structures* (94), S. 654–663, 2012.
- [19] Motley, M.R.; Young, Y.L.: "Influence of uncertainties on the response and reliability of self-adaptive composite rotors", *Composite Structures* (94), S.114-120, 2011.

Integration qualitativer und quantitativer Informationen als Grundlage für die Auswahl von Robust Design Strategien

Tobias Eifler, Johannes Matthias, Hermann Klobberdanz, Andrea Bohn und Herbert Birkhofer

Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd)

Technische Universität Darmstadt

The term Robust Design refers to a variety of approaches for the development of products insensitive to the variation of noise factors in life cycle processes. Based on a comprehensive analysis and prioritization of existing influencing factors, different RD-strategies and RD-principles for the adjustment of products are proposed. Thereby, a main challenge for an early application of suitable strategies and principles is the lack of knowledge about future product properties, existing interdependencies, acting disturbances, etc. Especially in early design stages, no detailed quantitative description of processes or the product behavior is available. Therefore, the identification of relevant influences affecting the robustness is usually based on the opinion of experts. Available quantitative information often is neglected. In this paper an approach for the integration of quantitative and qualitative information in an early analysis of noise factors is presented. Available simplified models of production processes or the product behavior are complemented by supplementary expert opinion. In this way the designer is supported to identify relevant influencing factors that need to be controlled. The study is part of the Collaborative Research Centre 805: "Control of Uncertainty in Load Carrying Systems in Mechanical Engineering", which is publicly funded by the German Research Foundation (DFG).

1 Robust Design

Unter dem Begriff Robust Design (RD) werden eine Vielzahl von Analyse- und Synthesemethoden zur robusten Gestaltung eines Produkts zusammengefasst. Statt die Nutzungsbedingungen einzuschränken bzw. zu kontrollieren, soll das robuste Produkt sich gegenüber den auftretenden äußeren Einflüssen unempfindlich verhalten [1, 2, 3, 4]. Robust Design basiert auf der Grundidee, dass jede Variation eines geplanten Zielwerts zu Verlusten führt [1, 2]. Die grundlegenden Arbeiten von Taguchi [1] sehen dabei eine Unterstützung für die Beherrschung von Störgrößeneinflüssen auf Basis von experimentellen Untersuchungen vor. Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen sind die Eigenschaften des späteren Produkts, die entsprechenden Prozesse sowie die bestehenden Abhängigkeiten weitgehend unbekannt. Der Einfluss von Störgrößen und die Robustheit eines Produkts werden deswegen erst nach der Festlegung eines Prototypen untersucht. Verschiedene Autoren weisen dagegen auf die Bedeutung der Konzeptphasen für Robust Design hin [2, 3, 4]. Konzeptvarianten können sich bei auftretenden Störgrößen deutlich in ihrer Robustheit unterscheiden. Durch die Berücksichtigung von Einflüssen sowie die Analyse und Priorisierung hinsichtlich resultierender Auswirkungen, können relevante Einflussfaktoren frühzeitig identifiziert und geeignete RD-Prinzipien bereits in frühen Entwicklungsphasen umgesetzt werden.

Eine zentrale Herausforderung für die frühzeitige Analyse ergibt sich aus der Verfügbarkeit geeigneter Analysemodelle. Die Beschreibung von Wirkzusammenhängen in Fertigungsprozessen oder die Beschreibung des Produktverhaltens ist immer eine Vereinfachung der Realität [5]. Aufgrund fehlender Information oder hoher Komplexität werden die bestehenden Abhängigkeiten bewusst vereinfacht, relevante Störgrößen werden vernachlässigt, etc. [5]. Bestehende Ansätze zur Unterstützung einer robusten Konzeptgestaltung beruhen deswegen weitgehend auf qualitativen Richtlinien oder Entwicklungsprinzipien [2, 3, 4]. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Beitrag ein Verfahren für die Integration qualitativer und quantitativer Informationen vorgestellt. Stark vereinfachte, quantitative Modellen werden durch qualitative Experteneinschätzungen ergänzt. Somit wird eine detailliertere Analyse von Einflussfaktoren in frühen Entwicklungsphasen ermöglicht und eine Auswahl geeigneter RD-Strategien unterstützt. Die Untersuchung ist Teil der Arbeiten im Sonderforschungsbereich (SFB) 805 „Beherrschung von lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“.

Der Beitrag gliedert sich in drei Abschnitte. Zunächst wird die Bedeutung einer geeigneten Analyse von Störgrößen im Lebenslauf technischer Produkte für die Umsetzung eines robusten Designs erläutert. Auf dieser Grundlage

wird ein Verfahren entwickelt, mit dem sowohl verfügbare quantitative als auch qualitative Informationen über die bestehenden Wirkzusammenhänge in der Analyse berücksichtigt werden können. Dieses wird durch Anwendung im Bereich spanender Bearbeitungsprozesse bei der Herstellung von Präzisionsbohrungen veranschaulicht.

2 Unsicherheit im Produktlebenslauf

Technische Systeme sind in ihrem Lebenslauf einer Vielzahl von unterschiedlichen Einflussgrößen ausgesetzt. Störgrößen in Produktionsprozessen, z. B. Temperatur, Werkzeugverschleiß oder Fehlbedienung, führen zu Abweichungen von den eigentlich vorgesehenen Produkteigenschaften. Zusammen mit veränderlichen Nutzungsbedingungen kann dies zu abweichendem Produktverhalten bis hin zu einer gestiegenen Wahrscheinlichkeit von Produktfehlern führen [6, 7]. Schwankende Einflussgrößen in der Prozesskette des Produktlebenslaufs werden in der Arbeitshypothese des SFB 805 als Unsicherheit bezeichnet [6].

„Unsicherheit tritt auf, wenn die Prozesseigenschaften eines Systems nicht oder nur eingeschränkt determiniert werden können.“

Entsprechend der Definition von Robust Design [s. Abschnitt 1] müssen geeignete Produkte die Kundenanforderungen trotz der Unsicherheit in Prozessen zu jeder Zeit erfüllen. Das Produktverhalten darf sich trotz äußerer Einflüsse nicht ändern. Im Folgenden wird deswegen zunächst die Betrachtung von Störgrößen im Robust Design dargestellt, bevor der im SFB 805 erarbeitete Ansatz zur Identifikation und Analyse von Unsicherheit in den Prozessen des Produktlebenslaufs zusammengefasst wird.

2.1 Störgrößen und Robust Design

Statt die Umgebungsbedingungen an das Produkt anzupassen, wird im Rahmen des Robust Design ein Produkt angestrebt, das sich gegenüber schwankender Umgebungsbedingungen unempfindlich verhält [2]. Grundlegende Ansätze beruhen dabei auf der Signal-to-Noise (SN) Ratio, die die Sensitivität eines Einflusses in Bezug zur resultierenden Schwankung setzt [1].

$$SN\ Ratio = \frac{(\text{Sensitivität})^2}{(\text{Schwankung})^2} = \frac{S^2}{\sigma^2}$$

Der Wert der SN Ratio drückt aus, welche Bedeutung einzelne Einflussgrößen für das Erreichen des geplanten Zielwerts haben, Sensitivität S , und

wie sich eine auftretende Schwankung auf die resultierende Unsicherheit auswirkt, Varianz σ . In grundlegenden, experimentell basierten RD-Ansätzen werden verschiedene Kombinationen von Einflussgrößen untersucht. Durch eine Maximierung der SN Ratio, d. h. die Auswahl von Kombinationen, die sich möglichst schwach auf die Ausgangsschwankung auswirken, wird das Produkt robust gestaltet [1]. Für die Auswahl robuster Konzeptvarianten in frühen Entwicklungsphasen werden basierend auf der SN Ratio signalgrößen-, störgrößen-, kontrollgrößen- und ausgangsgrößenbasierte RD-Prinzipien unterschieden [3]. Typisches Vorgehen ist die robuste Gestaltung des Produkts gegenüber Störgrößen, z. B. durch temperaturunempfindliche Materialien, geeignete Struktur etc. Darüber hinaus werden zusätzliche Produktfunktionen, die in bestimmten Nutzungsszenarien das Produktverhalten anpassen, vorgesehen. In der Literatur vorgeschlagene, qualitative Prinzipien, z. B. eindeutige Kraftübertragung oder Funktionstrennung, berücksichtigen die SN Ratio nicht explizit [2].

Die Arbeiten im Rahmen des SFB 805 beruhen auf einer systematischen Strukturierung von Unsicherheitsauswirkungen. Statt RD-Prinzipien werden zunächst drei RD-Strategien unterschieden, Bild 1. Die einfachste aber im Regelfall kostenintensivste Möglichkeit ist Elimination von Einflussgrößen. Ein Beispiel ist die Vermeidung von Temperaturschwankungen in klimatisierten Räumen. Darauf aufbauend können Unsicherheitswirkungen durch Zusatzfunktionen des Produkts unterdrückt werden. Im Idealfall verhindert die Gestaltung des Produkts die Auswirkung von Störgrößen. Ein Beispiel ist die symmetrische Gestaltung eines Lagerbocks, der sich unempfindlich gegenüber Temperatureinflüssen verhält, Bild 1 rechts.

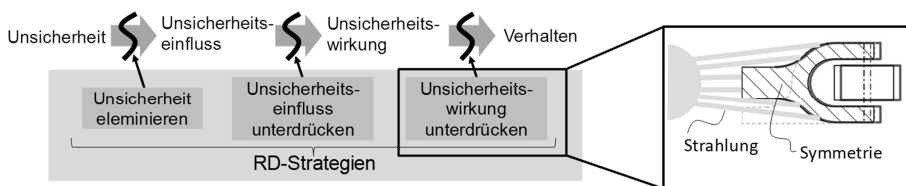


Bild 1: Robust Design Strategien [4]

Ein zentraler Schritt zur Auswahl einer geeigneten RD-Strategie ist dabei die Analyse von Unsicherheit in den Prozessen des Produktlebenslaufs. Durch ein systematisches Vorgehen bei der Identifikation, der Analyse und der Priorisierung von Einflussfaktoren kann die Auswahl geeigneter RD-Strategien und darauf aufbauen von geeigneten Prinzipien systematisch unterstützt werden [4].

2.2 Analyse von Unsicherheit in Prozessen

Die Auswirkung von schwankenden Einflussgrößen, d. h. Unsicherheit im Produktlebenslauf, ergibt sich aus der Vielzahl wirkender Störgrößen sowie aus den bestehenden Abhängigkeiten in und zwischen Prozessen [6, 7]. Obwohl in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zur Darstellung und Analyse von Prozessstrukturen verfügbar ist, wird der Einfluss von Unsicherheit in technischen Prozessen dabei nicht detailliert berücksichtigt [7]. Im Rahmen des SFB 805 wurde aus diesem Grund ein Prozessmodell zur umfassenden Identifizierung und Beurteilung von Einflussgrößen in Prozessketten entwickelt, Bild 2.

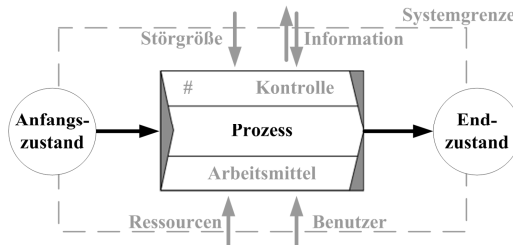


Bild 2: SFB 805 Prozessmodell [7]

Für die Analyse wird im Modell zwischen Zuständen und Prozessen unterschieden. Der Zustand umfasst eine strukturierte Beschreibung des Produkts bzw. der Produkteigenschaften. Diese werden durch wirkende Größen im Prozess in den Folgezustand transformiert. Die potentiellen, auf den Prozess wirkenden externen Einflüsse werden in vier Kategorien eingeteilt: Störgrößen, Information, Ressourcen sowie Benutzer. Durch die Systemgrenze werden Bereich und Zeitrahmen der Analyse eingegrenzt. Die Anzahl der berücksichtigten Einzelprozesse und die Dauer der Analyse, z. B. von t_0 bis t_1 , werden definiert. Zudem wird eine mögliche Kontrollebene, z. B. eine Prüfung der erreichten Produktqualität, sowie eine Prozessnummer # aufgeführt, die die Detailebene der Modellierung ausdrückt [7].

3 Integration qualitativer und quantitativer Information

Das im SFB 805 erarbeitete Prozessmodell [s. Abschnitt 2.2] bietet zunächst jedoch nur eine Unterstützung zur systematischen Identifikation von Unsicherheit im Produktlebenslauf. Die auftretenden Einflussfaktoren werden in entsprechenden Kategorien gruppiert. Als Grundlage für die Auswahl geeigneter RD-Prinzipien sind jedoch nicht allein die Anzahl und die Charakteristik der Einflussgrößen entscheidend. Vor allem die bestehenden Zusammen-

hänge zwischen Einflüssen und deren Verkettung über die gesamte Prozesskette hinweg bestimmen die letztendliche Auswirkung auf das Produkt und damit die Bedeutung für die robuste Gestaltung [6, 7]. Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen und in komplexen Systemen sind weder die Unsicherheit aller wirkenden Einflussgrößen, noch deren Zusammenhänge bekannt. Es ist zu unterscheiden, ob eine mathematische Beschreibung verfügbar ist oder eine rein qualitative Beschreibung der Wirkzusammenhänge, z. B. durch Experteneinschätzungen, vorliegt. Zur zielgerichteten Auswahl von RD-Prinzipien ist deswegen ein geeigneter Ansatz zur Integration von verfügbaren quantitativen Informationen sowie qualitativen Experteneinschätzungen in der Analyse erforderlich. Dieser wird am Beispiel der mehrstufigen Prozesskette zur Herstellung von Präzisionsbohrungen verdeutlicht, Bild 3.

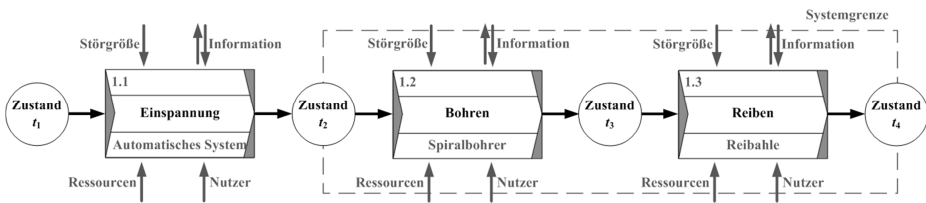


Bild 3: Prozesskette Präzisionsbohrung

Die Qualität von Präzisionsbohrungen wird durch eine Reihe von Einflussfaktoren in den Herstellungsprozessen bestimmt. Fehler beim Einspannen des Werkstücks, Maschinenfehler oder der Werkzeugverschleiß im Bohr- und im Reibprozess führen zu abweichenden Produkteigenschaften. Zudem bestehen Abhängigkeiten zwischen den Prozessen. Eine ungenaue Positionierung des Werkstücks in der Einspannung wirkt sich beispielsweise direkt auf die nachfolgenden Prozesse aus. Eine ungenaue Vorbohrung im Bohrprozess hat einen entscheidenden Einfluss auf den nachfolgenden Reibprozess [8].

3.1 Vorgehensschritte zur Integration qualitativer und quantitativer Information bei der Analyse von Unsicherheit

Das entwickelte Verfahren basiert auf der ganzheitlichen Identifikation von Einflussfaktoren im Produktlebenslauf mit Hilfe des vorgestellten Prozessmodells. Darauf aufbauend ist zu unterscheiden, ob eine mathematische Beschreibung verfügbar ist oder eine rein qualitative Beschreibung der Wirkzusammenhänge vorliegt. Zur Integration quantitativer und qualitativer Informationen werden fünf Vorgehensschritte zu Grunde gelegt, Bild 4.

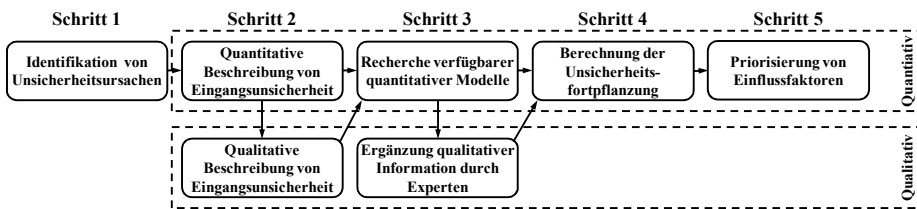


Bild 4: Vorgehen zur Ergänzung qualitativer Information im Rahmen einer Unsicherheitsanalyse im Produktlebenslauf

In **Schritt 1** wird mit Hilfe des vorgestellten Prozessmodelles die Prozesskette des Produktlebenslaufs aufgenommen und anschließend die wirkenden Einflussgrößen umfassend identifiziert. Zur Beschreibung möglicher Schwankung wird in **Schritt 2** zunächst die Verfügbarkeit quantitativer Information überprüft. Nicht quantitativ beschreibbare Einflussgrößen werden anschließend auf Basis von Expertenabschätzungen qualitativ ergänzt. Das gleiche Vorgehen gilt in **Schritt 3** für die Beschreibung bestehender Wirkzusammenhänge. Zunächst wird die Verfügbarkeit quantitativer Modelle überprüft, die den durchlaufenen Produktionsprozess oder das Produktverhalten beschreiben. Diese werden anschließend visualisiert, um fehlende Informationen durch Expertenmeinung zu ergänzen. In **Schritt 4** erfolgt die Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung, d. h. der resultierenden Schwankung eines Zielwerts, bevor in **Schritt 5** die wirkenden Einflussfaktoren entsprechend ihrer Bedeutung für diese Ausgangsschwankung priorisiert werden können.

3.2 Sensitivitätsmatrix

Während der erste Schritt der Analyse ausschließlich auf einer Anwendung des Prozessmodells basiert, wurden im Rahmen des SFB 805 für den zweiten und dritten Schritt sogenannte Sensitivitätsmatrizen entwickelt. Die im Prozess auftretenden Einflussgrößen werden auf Basis einer Matrixdarstellung durch die jeweilige Schwankung der Eingangswerte und die im Prozess bestehenden Abhängigkeiten ergänzt.

Bild 5 zeigt die vereinfachte Sensitivitätsmatrix für den abschließenden Reibprozess bei der Herstellung von Präzisionsbohrungen [vgl. auch Bild 4]. Dieser stellt am Ende der Wertschöpfungskette sowohl hinsichtlich der Qualitätsanforderungen als auch der Wirtschaftlichkeit den entscheidenden Prozess dar [8]. Beispielhaft sind eine Produkteigenschaft im Anfangszustand, interne und externe Prozessgrößen sowie die Zielgröße, radiale Abweichung der Bohrung, im Ausgangszustand aufgeführt. Die bestehenden Wirkzusammenhänge werden über quantitative oder qualitative Sensitivitätsindizes abgebildet. Für

das Beispiel des Reibprozesses können dabei zur stark vereinfachten Beschreibung von typischen internen Wirkgrößen im Prozess Schnittkraftmodelle herangezogen werden [8]. Das Modell vernachlässigt jedoch den späteren Einfluss von ggf. schwankenden Schnittgrößen auf die Bohrungsqualität genau wie den Einfluss von Störgrößen. Diese können durch die Einschätzung von Experten in der Analyse berücksichtigt werden. Insgesamt bietet die Sensitivitätsmatrix eine umfassende, übersichtliche Visualisierung von Wirkzusammenhängen in Einzelprozessen bzw. der gesamten Prozesskette und zeigt somit die Verfügbarkeit quantitativer Information.


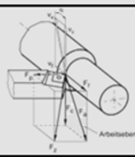


				Produkt		Prozess						Produkt		
				Eingangszustand (Vorbohrung)		Störgrößen			Arbeitsmittel			Ausgangszustand (Bohrung)		
				Schrägheit		Temperatur	Schwingung	Verunrein.	Schnitttiefe	Vorschub	sp. Schnittkraft	Schnittkraft		rad. Abw.
				nied.		nied.	mittel	mittel	?		?		?	
Produkt	Eingangszustand (Vorbohrung)	Schrägheit	mittel										sehr niedrig	
		Störgrößen	Temperatur										niedrig	
Schwingung	mittel													
Verunreinigung	mittel													
Prozess	Arbeitsmittel	Schnitttiefe	?											
		Vorschub												
		spez. Schnittkraft												
		Schnittkraft	?											
Produkt	Ausgangszustand (Bohrung)	rad. Abweichung	?										sehr hoch	

Bild 5: Sensitivitätsmatrix Bohrprozess

3.3 Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung

Durch die Darstellung von bestehenden Wirkzusammenhängen in der Sensitivitätsmatrix werden im Regelfall verfügbare mathematische Beschreibungen durch qualitative Experteneinschätzungen ergänzt. Weit verbreitete Methoden zur Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung, z. B. Simulationen zur Bestimmung der resultierenden Schwankung eines Zielwerts, können jedoch nur auf Basis einer umfassenden mathematischen Beschreibung angewendet werden [s. Abschnitt 1]. Um im vierten Vorgehensschritt sowohl die

quantitative als auch die qualitative Beschreibung von Wirkzusammenhängen zu berücksichtigen, wird der Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung die Entwicklung einer Taylorreihe zu Grunde gelegt. Dies entspricht der Analyse der Unsicherheitsfortpflanzung bei Softwarekomponenten [9] oder im Rahmen der Variation Mode and Effects Analysis [10].

Für das Beispiel der Einflussgrößen x und y ist die Funktion $f(x,y)$, mit der sich die Einflüsse auf eine gewünschte Ausgangsgröße z auswirken unbekannt. Die Zufallsvariablen x , y und somit auch z werden als Zufallsvariablen angenommen, Formel (1). Zur Berechnung der resultierenden Unsicherheit wird eine Taylorreihe um den Entwicklungspunkt $x_0 = \mu_x$ und $y_0 = \mu_y$ entwickelt:

$$z = f(x, y) \tag{1}$$

$$z \approx f(\mu_x, \mu_y) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\mu_x, \mu_y} (x - \mu_x) + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{\mu_x, \mu_y} (y - \mu_y) \tag{2}$$

$$+ \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{\mu_x, \mu_y} \frac{(x - \mu_x)^2}{2} + \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{\mu_x, \mu_y} \frac{(y - \mu_y)^2}{2} + \left. \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} \right|_{\mu_x, \mu_y} \frac{(y - \mu_y)(x - \mu_x)}{2}$$

Auf der Grundlage der Taylorreihe können die statistischen Momente der Zufallsvariable z bestimmt werden. Der Erwartungswert μ_z wird dabei mit einer Taylorreihe 2. Ordnung berechnet. Zur Bestimmung der Varianz σ_z^2 wird die Taylorreihe zur Vereinfachung der Rechnung nach dem ersten Glied abgebrochen. Es gilt:

$$E[X - E[X]] = 0 \tag{3}$$

$$E[(X - E[X])^2] = E[X^2] - (E[X])^2 = Var[X] \tag{4}$$

$$Var[aX + bY + c] = a^2 \cdot Var[X] + b^2 \cdot Var[Y] + 2ab \cdot Cov[X, Y] \tag{5}$$

Unter der Annahme stochastisch unabhängiger Eingangsvariablen, d. h. $Cov(x,y)=0$ ergibt sich mit den Formeln (2), (3), (4) und (5) der Erwartungswert und die Varianz der Zufallsvariable z somit zu:

$$\mu_z \approx f(\mu_x, \mu_y) + \left(\left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{\mu_x, \mu_y} \right) \cdot \sigma_x^2 + \left(\left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right|_{\mu_x, \mu_y} \right) \cdot \sigma_y^2 \tag{6}$$

$$\sigma_z^2 \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\mu_x, \mu_y} \cdot \sigma_x^2 + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{\mu_x, \mu_y} \cdot \sigma_y^2 \tag{7}$$

Die ersten Ableitungen der Funktion $f(x,y)$ in Formel (7) geben die Steigung der Funktion in Punkt $E(x)$, $E(y)$ an. Sie können damit als Sensitivität des Zielwerts z gegenüber einer Veränderung der Eingangsgrößen interpretiert werden. Die zweiten Ableitungen der Funktion $f(x,y)$ in Formel (6) kann als Veränderung der Sensitivität interpretiert werden. Obwohl keine umfassende mathematische Beschreibung der Wirkzusammenhänge vorliegt kann die Bedeutung verschiedener direkter Einflussfaktoren, S_1 bis S_n sowie σ_1 bis σ_n , sowie die Bedeutung indirekter Einflüsse, z. B. S_{21} bis S_{2m} sowie σ_{21} bis σ_{2m} , bei der Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung berücksichtigt werden.

$$\sigma_z^2 \approx S_1^2 \cdot \sigma_1^2 + S_2^2 \cdot (\sigma_{21}^2 \cdot \sigma_{21}^2 + S_{22}^2 \cdot \sigma_{22}^2 + \dots + S_{2m}^2 \cdot \sigma_{2m}^2) + \dots + S_n^2 \cdot \sigma_n^2 \quad (8)$$

Ist für Teilbereiche der Sensitivitätsmatrix eine mathematische Beschreibung der Wirkzusammenhänge bekannt, werden die Sensitivitätsindizes in Formel (8) analytisch bestimmt. Ist dies nicht der Fall müssen diese durch Experten abgeschätzt werden. Als Einschränkungen zu beachten ist hierbei allerdings die Annahme von normalverteilten, stochastisch unabhängigen Zufallsvariablen. Zudem gilt die Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung aufgrund der Linearisierung (Taylorreihe 1. Ordnung) nur für kleine Schwankungen der Eingangsgrößen. Statt einer genauen Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung wird nur die Bedeutung einzelner Werte für die resultierende Variation der Zielgröße bestimmt. Durch die Entwicklung einer Taylorreihe höherer Ordnung kann die Genauigkeit jedoch verbessert werden.

4 Anwendung

Die Sensitivitätsmatrix in Bild 6 gibt die Wirkzusammenhänge zwischen Eigenschaften der hergestellten Bohrung und den im Reibprozess wirkenden Größen an. Ausschließlich der Zusammenhang zwischen den Wirkgrößen, Schnitttiefe a , Vorschub f , spezifischer Schnittkraft k_c und resultierender Schnittkraft F_c , kann über ein Spankraftmodell grob beschrieben werden.

$$F_c = a \cdot f \cdot k_c \quad (8)$$

Die Unsicherheit des eingehenden Vorschubs f wird dabei als normalverteilt mit Erwartungswert $\mu_f = 0,2^{mm/U}$ und Standardabweichung $\sigma_f = 0,04^{mm/U}$ angegeben. Die spezifische Schnittkraft ist konstant, $k_c = 2184^{N/mm^2}$. Die übrigen Einflussfaktoren sind nicht quantitativ beschreibbar. Die im Schnittkraftmodell berücksichtigt Schnitttiefe a mit Erwartungswert $\mu_a = 1^{mm}$ wird durch Störgrößen beeinflusst, die radiale Abweichung der hergestellten Bohrung als Zielgröße durch die Schnittkraft F_c sowie die Schrägheit α der Vorbohrung. Sowohl die Unsicherheit als auch die bestehenden Zusammenhänge werden

auf einer qualitativen, sechsstufigen Bewertungsskala durch Experten ergänzt. Zu berücksichtigen ist, dass die berechneten Sensitivitätsindizes S_{ap} und S_{kc} entsprechend dieser Skala normiert werden müssen. Für die Berechnung ergibt sich ein mehrstufiger Zusammenhang zwischen Ziel- und Eingangsgrößen, Bild 6, der die Grundlage für die Priorisierung der Einflüsse und somit für die Auswahl geeigneter RD-Strategien bzw. Prinzipien darstellt.

Berechnete Sensitivitätsindizes (für Schnittkraft F_c [N])

Einflussfaktor	Sensitivität	S_i normiert	Unsicherheit
Schnitttiefe a [mm]	$S_{ap} = 437$	$S_{ap} = 1$	$\sigma_{ap} = ?$
Vorschub f [mm/U]	$S_f = 2184$	$S_f = 5$	$\sigma_f = 0,04$
spez. Schnittkraft k_c [N/mm ²]	$S_{kc} = 0,6$	$S_{kc} = 0$	$\sigma_{kc} = 0$

Qual. Skala	Wert
sehr Hoch	5
hoch	4
Mittel	3
niedrig	2
sehr niedrig	1
keiner	0

Qualitative Expertenabschätzung

für Schnitttiefe

Einflussfaktor	Sensitivität	Unsicherheit
Temperatur [°C]	$S_{Temp} = 1$	$\sigma_{Temp} = 1$
Schwingungen [Hz]	$S_{Schw} = 4$	$\sigma_{Schw} = 4$
Verunreinigungen [%]	$S_{Veru} = 3$	$\sigma_{Veru} = 4$

für radiale Abweichung

Einflussfaktor	Sensitivität	Unsicherheit
Schrägheit α	$S_\alpha = 1$	$\sigma_\alpha^2 = 3$
Schnittkraft F_c	$S_{F_c} = 5$	$\sigma_{F_c}^2 = ?$

Unsicherheit der Ausgangsgröße (radiale Abweichung w [mm])

$$\sigma_w = S_{F_c}^2 \cdot \left[S_a^2 \cdot \left(S_{Temp}^2 \sigma_{Temp}^2 + S_{Schw}^2 \sigma_{Schw}^2 + S_{Veru}^2 \sigma_{Veru}^2 \right) + S_f^2 \sigma_f^2 + S_{kc}^2 \sigma_{kc}^2 \right] + S_\alpha^2 \sigma_\alpha^2$$

Bild 6: Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung

5 Fazit & Ausblick

Trotz einer Vielzahl von RD-Ansätzen basiert der Einsatz entsprechender Strategien und Prinzipien insbesondere in frühen Entwicklungsphasen weitestgehend auf Experteneinschätzungen. Im vorliegenden Paper wird aus diesem Grund ein Ansatz zur Integration qualitativer und quantitativer Informationen bei der Analyse von Unsicherheit in Prozessketten vorgeschlagen. Basierend auf einer Taylorreihenentwicklung werden die Wirkzusammenhänge zwischen Einflussgrößen angenähert, so dass verfügbare quantitative Modelle durch Experteneinschätzungen ergänzt werden können. Die detailliertere Analyse bietet für die Entwicklung robuster Produkte die Möglichkeit, relevante Störgrößen frühzeitig zu identifizieren und geeignete Strategien auszuwählen.

Der vorgeschlagene Ansatz ist Teil der im SFB 805 entwickelten RD-Methodik. Aufbauend auf der Analyse von Unsicherheit werden geeignete Strategien und Prinzipien erarbeitet, um bereits in frühen Entwicklungsphasen zielgerichtet die Entwicklung robuster Produkte zu unterstützen.

Literatur

- [1] Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Wu, Y.: "Quality Engineering Handbook", John Wiley & Sons, New Jersey (USA), 2005.
- [2] Andersson, P.: "Approach on Robust Design in the Conceptual Design Phase – a qualitative approach", Journal of Engineering Design, Vol. 8, Nr. 1, S. 75-89.
- [3] Jugulum, R.; Frey, D.D.: "Toward a taxonomy of concept designs for improved robustness", Journal of engineering Design, Vol. 18, Nr. 2 (2007), S. 139-156.
- [4] Matthias, J; Engelhardt, R.; Kloberdanz, H.; Birkhofer, H.: "Strategies and principles to design robust products", Proceedings of the International Design Conference – DESIGN 2010, S. 341-350.
- [5] Kreye, M. E., Goh, Y. M., Newnes, L. N.: "Manifestation of uncertainty – a classification", Proceedings of the International Conference on Engineering Design – ICED 2011, Kopenhagen, 2011, pp. 96-107.
- [6] Hanselka, H.; Platz, R.: "Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus", Konstruktion, Vol. 11/12 (2010), S. 55-62.
- [7] Eifler, T.; Enss, G.C.; Haydn, M.; Mosch, L.; Platz, R.; Hanselka, H.: "Approach for a consistent description of uncertainty in process chains of load carrying mechanical systems", Applied Mechanics and Materials, Vol. 104 (2012), S. 133-144.
- [8] Abele, E., Hauer, T., Haydn, M.: „Modellierung der Prozesskräfte beim Reiben mit Mehrschneidenreibahlen“, Werkstattstechnik online, Vol. 101, Nr. 6 (2011), S. 407-411.
- [9] Goseva-Popstojanova, K., Kamavaram, S.: "Software Reliability Estimation under uncertainty – generalization of the method of moments", Proceedings of IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (2004).
- [10] Johansson, P., Chakhunashvili, A., Barone, S., Bergman, B.: "Variation Mode and Effects Analysis – a practical Tool for quality improvement", Quality and Reliability Engineering International, Vol. 22 (2006), S. 865-876.

Matrix based approach in assessing optimum robust product architectures

Krešimir Osman, Dorian Marjanović

Department of Design, Chair of Design and Product Development

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia

1 Abstract

This paper proposes a matrix based approach with aim to help mechanical designers tackle the problem of risk emerging in assessing product architecture under the uncertain operating conditions in early design stages. The presented approach combines existing matrix based methods - Quality Function Deployment (QFD) and Multiple-Domain Matrix (MDM) methods with the Function-Based Failure Propagation (FBFP) method. The QFD method is an integrated set of tools for recording user requirements, engineering characteristics that satisfy these requirements, and any trade-offs that might be necessary between the engineering characteristics, while the MDM method is applied to model structural arrangements and dependencies between the domains and within themselves. The FBFP method is applied at the functional level providing information of potential failure based on product functions during conceptual design in product subsystems. As a result of the proposed approach, risk analysis of subsystems becomes possible and feedback on structural analysis of product architecture could be provided. To obtain the optimum robust product architectures from available alternative solutions a continuous risk analysis of the system is proposed. The analysis is performed through all stages from initialization through later refinements with several evaluation criteria: complexity, interdependency and process duration.

The following section presents the background of this research, related work and research motivation. Third section will provide more detailed description of proposed matrix based approach. Fourth section four will provide to evaluate and test validity of the proposed matrix approach. A real case study will be presented here. Conclusions and future research close this paper.

Zusammenfassung

Diese Foeschungsarbeit schlägt die matrixbasierte Betrachtungsweise vor, mit dem Ziel, den Mechanikdesignern zu helfen, das Problem der Risikoerscheinung in der Bewertung der Produktarchitektur unter unsicheren Arbeitsbedingungen in den frühen Desingphasen zu lösen. Die dargestellte Betrachtungsweise kombiniert die bestehende matrixbasierten Methode – die Gütefunktionsaufstellung (QFD), und die mehrfachen Matrix domainmethoden (MDM) mit der funktionsbasierte Fehleraufbreitungsmethode. Die QFD Methode ist ein integrierter Satz von Werkzeugen, die Benutzeranforederungen aufnehmen, wie auch Ingenieureigenschaften, die diese Anforderungen treffen, und auch alle Abstimmungen, die zwischen den Ingenieureigenschaften nötig sein könnten, wenn die MDM Methoden gebraucht werden, um Strukturanordnungen und Abhängigkeiten zwischen den Domains und innerhalb derjenigen zu modellieren. Die FBFP Methode wird andererseits auf der funktionellen Ebene verwendet, sie sichert die möglichen Fehlerinformationen auf Grund von Produktfunktionen während des konzeptuellen Dessings in Produktsystemen. Als Ergebnis der vorgeschlagenen Betrachtungsweise wird die Rizikoanalyse von Subsystemen möglich, und das Feedback zur Strukturanalyse des Systems wird vorgeschlagen. Die Analyse wird in allen Phase durchgeführt, von der Initialisierung durch weitere Verbesserungen mit einigen Bewertungskriterien: Komplexität, Abhängigkeitsverhältnis und Prozessdauer.

2 Introduction and motivation

The product architecture can have major impacts on all phases of its lifecycle, but its qualitative nature means that it is not easy to define a “design space” of architectures [1]. It is typically established during the concept development phase of product development [2]. During conceptual design stage, an abstract description of the product is created that serves as the basis for subsequent design stages and decisions. It is recognized that the initial stages of design are most influential on the quality and success of the product [3]. System architects in most product development cases start with the existing architecture of the product (or a similar one) and modify it to

map the added functionality into the product [4]. Matrix-based architecture models are the most conventional representations and have the great advantage to provide a common modelling tool for product architecture. It represents the system structure (list of its elements and their relationships) as a matrix. The dependencies between components or modules within a product explain changes in which module will have effect on which other modules. Effectively managing risks in new product architecture development can reduce the likelihood of cost, schedule, and performance deviations during execution. How to make a robust plan for new product architecture development has become an important concern for enterprises, especially for the hi-tech industry. To provide this a systematic approach is needed in product architecture development and evaluation.

3 Proposed matrix approach

Matrix based approach (see Figure 1), presented in this paper is based on Theory of Technical Systems (TTS) [5] and VDI 2206 standard [6]. It focuses on making the system performance immune to variations, under uncertain operating conditions. Variations are everywhere, wanted and unwanted, but the unwanted variations can lessen the quality of the provided products. The aim with a robust design is not to try and eliminate the variations, but rather to make the product insensitive to them. The steps in the approach are introduced as follows:

1. Forecast the overall customer requirements

Mapping of the overall design requirements regarding market segmentation grid is the first step. The market segmentation grid is an attention-directing tool providing a link between management, marketing and engineering designers to help identify potential opportunities. Thus, the overall design requirement could be generated by integrating all of the market segmentation. In product definition phase, marketing and data collection work should be complete before modelling the procedure beginning.

2. Customer requirements/ Market segment

Here is try to determine the overall customer requirements, for each group within customer base. It includes different requirements from different market segment grid. Customer base is given from the generated list from the first step. Market segmentation grid is created based on the size of the product family. Importance data is given corresponding to the customer requirements and market segment (some importance is set to zero to represent that there is no requirement).

3. QFD analysis – phase I

In this step is importing the overall customer requirements (CRs) rating and customer requirement to House of Quality (HoQ) [7] to obtain the engineering characteristics. On the left side of QFD matrix, the importance value is presented by the overall rating from the previous step. The engineering requirements (ERs), which can satisfy customer requirements, are determined as shown on top and the relationships between them are given.

4. QFD analysis – phase II

Following the QFD procedure [7], input the engineering requirements (ERs) with weighting to the left side of QFD phase II, and the parts characteristics are determined and the relationships between engineering requirements and parts characteristics (PCs) are also obtained. Further, the interdependencies between parts characteristics are represented on the roof of QFD phase II.

5. Product functional modelling

Functional modelling is a design tool that describes a product or system in terms of the functions it performs [8]. Our model is based on the function of a product.

6. Multiple Domain Matrix (MDM) analysis

According to the procedure of structural complexity management [9], the system definition was carried out first, using the Multiple-Domain Matrix (MDM). The key domains that can be found here are namely: requirements, technical processes, functions and components (according to the Theory of Technical Systems – TTS [5]). In the next step, the types of dependencies between domains (inter-domain) were defined. As we can see from Figure 5, the dependency meanings have not been indicated for all possible domain combinations represented by the matrix subsets. That, which are not shaded, indicate that dependency information which is available, but here is not required for further system investigation (architecting and refinement). Finally, meanings for the intra-domain dependencies of components, functions, technical processes and requirements were defined.

7. Functional dependency matrix

To perform the function-based failure propagation method [10], a functional dependency matrix is generated from the functional model of the system using the flows as the common interface. Functions are directly dependant on the functions that are connected to them by one or more flows. The functional dependency matrix is then populated with the likelihoods of a failure propagating to a particular function from one it is dependent on. The

initiating functions are the functions that fail initially, and the dependent functions are those that the failure propagates to. For this method, the likelihood values are decimal values between zero and one, zero denoting no likelihood of propagation, and one representing certain propagation of the failure. This is done to allow the use of Boolean operators [11] in the calculation of the total likelihood of propagation. In places where there is no dependency, there is no likelihood of propagation, and thus the place filled in with a zero or left empty (see Figure 7).

8. Propagation tree

Next, using the functional dependency matrix [10], propagation trees are built for each function in the model. These trees trace the path of a potential failure to each possible function that can propagate its failure to the end function. Each branch represents a different starting function, travelling to the same "root".

9. Total likelihood of risk propagation

Finally, the total likelihood of risk propagation is calculated. Using the direct likelihoods generated from the functional dependency matrix and the propagation trees, the total propagation likelihood is calculated using the Boolean operators "AND" and "OR" [11]. Wherever there are multiple functions that failures can propagate from, the "OR" calculation is used. If a branch can only propagate a failure to a single function, the "AND" calculation is used. In order to properly use this method, historical data pertaining to failure propagation must exist. Finally, these failures were then tabulated into a matrix showing the number of times that each function pair had appeared. These numbers were then normalized, using the most frequently occurring failure propagation pair as the normalizing factor. In this way, each value collected becomes a decimal value between zero and one. It is unlikely for each possible failure mode that a function might fail by has the same likelihood of propagation. Some failure modes might have higher or lower likelihoods of propagation than others. However, for ease of calculation of those likelihoods, each failure mode for a function is assumed to have the same likelihood. Using a modified form of the likelihood mapping from [12], the likelihood of each function pair was then calculated (see Table 1).

10. Evaluation of product parts and properties

Evaluation is based on three information (evaluation criteria) obtained from QFD and MDM analysis: complexity, interdependency and process duration [13] (see Table 2). We choose these criteria for the early evaluation for product properties. The degrees of complexity are determined by the designer's experience. On the other hand, process duration data is adopted from

activity based DSM (technical process domain in MDM), while interdependency is adopted from the D-value (sum of columns) from component based DSM (component domain in MDM) (see Figure 4).

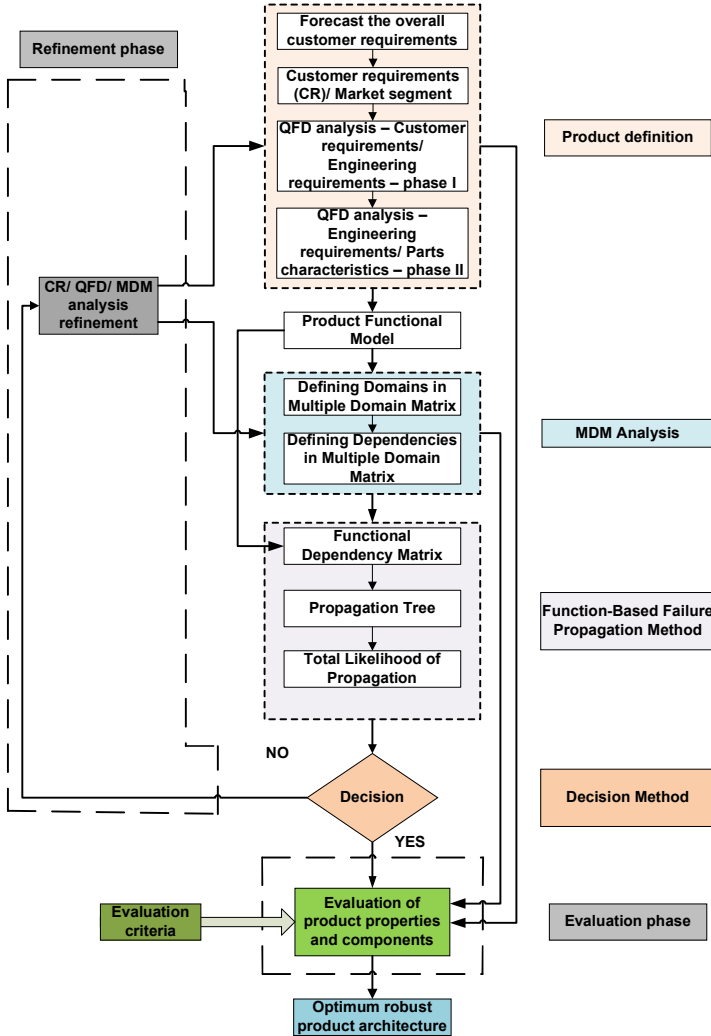


Figure 1: Schema of matrix approach

Each data is converted to the level of importance (see Table 2). Then we input the importance data to the upper side of the QFD phase II, the rating corresponding to each part characteristics is obtained by summing up the

value in the column. The lowest row and the rightmost column is calculating with the level of importance, the ratings for evaluation criteria, and relationship between engineering requirements and parts characteristics, the summed up ratings of each engineering requirements and parts characteristics are obtained (from which we can see critical components and critical properties).

4 Case study

The objective of the case study is to show how the proposed matrix approach can support mechanical designers during conceptual designing. For this purpose we used the example of a climate chamber, which is very often an integral part of HVAC systems for large objects (e.g. office buildings). Here we start with the initial climate chamber concept with operating conditions based on designer experience (see Figure 2). Our goal in the case study was to propose architecture for such operating conditions through the given procedure.

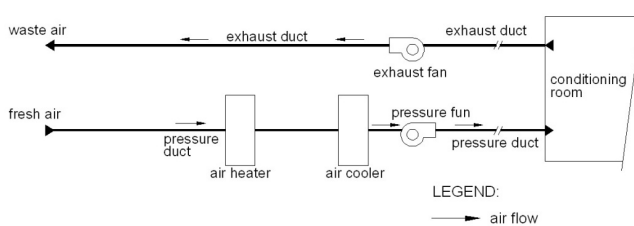


Figure 2. Simplified schema of initial concept of climate chamber

In OFD phase I, is input customer requirements in relation to the engineering requirements that can meet them. According to the calculation of the importance of customer requirements, the engineering requirements that can meet them were determined and shown on the top and their mutual relationships are provided. Phase I of the QFD procedure contains a roof, which represents the correlations between engineering requirements. These data are not relevant in this research, so the roof part has been removed. During phase II of the QFD procedure, the engineering requirements with a weighting factor are put to the left side and the parts characteristics are then determined. This was followed by determining the relationships between engineering requirements and parts characteristics. Furthermore, the interdependencies between parts characteristics are represented on the roof of phase II of the QFD procedure. After presenting a functional model of the system, an MDM analysis was provided (using LOOME0® software). Here is

started with domains for our initial climate chamber concept (see Figure 2). This case study presents a component-based DSM (component domain) for the final climate chamber concept (see Figure 3), after a few steps of refinement. After determining the dependencies between domains (inter and intra), we can start to build a functional dependency matrix for our model of the initial climate chamber concept (see Figure 4). In Figure 4, the initiating functions are shown across the top of the matrix and the dependent functions are listed along the side. Next, based on the propagation tree created and starting from the "top" function and linking it to each function, we are able to calculate total likelihood for each system. Each of these chains (branches) is linear because they have only one path from the initiator to the top function. Table 1 presents the failure propagation data collected for final climate chamber concept, after a few steps of refinement. As we can see in Table 1, if we follow this procedure (as a Function-Based Failure Propagation Method), we can see for the entire tree (our proposed system with subsystems) the individual likelihoods of each branch and determine which branch of the tree has the highest likelihood. Based on this, we can add some new elements through our refinement phase (see Figure 1).

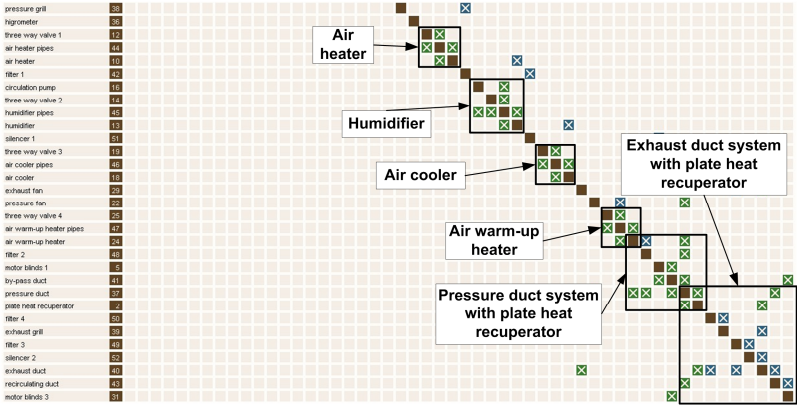


Figure 3. Component domain representation in MDM with possible modules (subsystems) identified in proposed product architecture for final concept of climate chamber (screenshots from LOOME®)

We obtain an improved model after several feedback loops within the proposed framework to reduce risk likelihood and build our system that will fulfil our initial operating conditions (see the matrix representation of the system with its subsystems after clustering [14]). The problem can be solved by adding some new elements: a heat regenerator, a bypass duct, a recircu-

lation duct, a humidifier and an air warm-up heater. The final climate chamber concept after a few feedback loops in the refinement phase is presented in Figure 5. In this current research stage, the feedback loop is performed manually based on the results given from the Total Likelihoods in Function-Based Failure Propagation Method.

Table 1. Collected failure propagation data for final concept of climate chamber

Branch	Total likelihood
F0 – F1	0,1
F0 – F1 – F6 – F7 – F8 – F13 – F14	0,000054
F0 – F5 – F6 – F7 – F8 – F13 – F14	0,000108
Full tree	0,100162

As we can see, each data element (see Table 2) is converted to a value to represent a level of importance (9 stands for strong, 3 stands for medium and 1 stands for weak). Using the information provided in Table 2, we can determine critical properties and critical parts of our proposed product architecture through QFD phase II.

		Likelihood I													
		Initiating function													
		F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
Dependent function	F0- bring waste air														
	F1 – separate share of waste air	0,1													
	F2 - accept device														
	F3 – secure device against relegation														
	F4 – bring air														
	F5 – regenerate heat to air	0,3			0,3										
	F6 – exploit waste heat to air		0,3			0,2									
	F7 – transfer heat to air							0,3							
	F8 – humidify air								0,1						
	F9 – absorb noise														
	F10 – absorb vibrations														
	F11 – absorb noise														
	F12 – absorb vibrations														
	F13 – transfer heat to air									0,2					
F14 – bring hot air to the conditioning room														0,3	

Figure 4. Functional dependency matrix for final concept of climate chamber

Putting the given criteria information on the upper side of QFD phase II, we can recalculate rating for all engineering requirements, as well as rating for all parts characteristics.

Table 2. Importance level for criteria information

Components	Process duration		Interdependency		Complexity	
	Day	Importance	Degree	Importance	Degree	Importance
12	5	3	1	1	Medium	3
44	1	1	10	9	Low	1
10	10	9	3	1	High	9
42	4	3	0	1	Medium	3
16	15	9	1	1	High	9
14	5	3	1	1	Medium	3
45	1	1	13	9	Low	1
13	14	9	18	9	High	9
51	4	3	1	1	Medium	3
19	5	3	1	1	Medium	3
46	1	1	10	9	Low	1
18	10	9	10	9	High	9
29	15	9	0	1	High	9
22	15	9	0	1	High	9
25	5	3	1	1	Medium	3
47	1	1	19	9	Low	1
24	10	9	2	1	High	9
48	4	3	10	9	Medium	3
5	4	3	3	1	Medium	3
41	2	1	13	9	Low	1
37	2	1	20	9	Low	1
2	12	9	1	1	High	9
50	4	3	1	1	Low	1
39	2	1	3	1	Medium	3
49	4	3	1	1	Medium	3
52	4	3	1	1	Medium	3
40	2	1	5	3	Low	1
43	2	1	4	3	Low	1
31	4	3	4	3	Medium	3
Importance: High 9 Medium 3 Low 1						

5 Conclusion and future research

This paper proposes a matrix-based approach, which could help designers to obtain the optimum robust product architectures through the continuous risk analysis through all stages from initialization to later refinements with several evaluation criteria: complexity, interdependency and process duration in early design stages. The Function-Based Failure Propagation method used here has great importance in analysing failure chains using functions present in the system and may be applicable before a designated product assumes its

physical form, to present functions not only as separate events, but also as dependent on other functions based on their connection with flows.

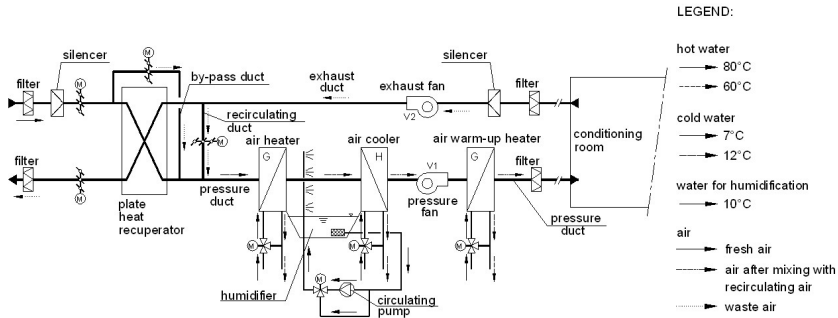


Figure 5. Simplified schema of final concept of climate chamber

It helps us determine a single likelihood of propagation for each function as well as calculate the likelihood of propagation of any function into another for our proposed model. Depending on that, designers could make refinements to the existing subsystem structures, adding new features to them. Based on the proposed framework, it is possible to analyse different product architecture arrangements of function interactions against the changes in product architecture using risk propagation. By using the Multiple-Domain Matrix, designers could also see the impact of the whole analysis on other domains (requirements, technical processes and components) to enable their refinement and changes. The framework also enables designers to evaluate robust design alternatives using the evaluation phase. Future research could be continued through several options. One of them could extend the approach to all types of product development, not only the modular or the present one. The second option could involve elaboration and implementation of the decision method in the approach on which it will be based, if it is necessary to make refinements in the QFD and MDM methods.

Acknowledgements

This research is part of funded project "Models and methods of knowledge management in product development" supported by the Ministry of Science and Technology of the Republic of Croatia.

References

- [1] Wyatt, D. F.; Wynn, D.C.; Clarkson, P.J.: „A Computational Method to Support Product Architecture Design“, Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2009, USA, 2009.
- [2] Ulrich, K.T.; Eppinger, S.D.: „Product Design and Development“, 3rd edition, McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 2004.
- [3] Reich, Y.; Ziv Av, A.: „Robust product concept generation“, Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design, ICED 2005, Melbourne, Australia, 2005.
- [4] Henderson, R.M.; Clark, K.B.: “Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms”, *Administrative Science Quarterly*, vol. 35, pp. 9-30, 1990.
- [5] Hubka, V.; Eder, W.E.: „Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design“, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [6] ... VDI 2206 - Design methodology for mechatronic systems, Verein Deutscher Ingenieure, Dusseldorf, Germany, 2004.
- [7] Akao, Y.: „QFD – Quality Function Deployment“, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 1992.
- [8] Otto, K.; Wood, K.: „Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development“, Prentice Hall, USA, 2001.
- [9] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: „Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design“, Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [10] Krus, D.; Grantham Lough, K.: „Risk due to function failure propagation“, Proceedings of the 16th International Conference of Engineering Design, ICED 2007, Paris, France, 2007.
- [11] Peruško, U.: “Digital Logic – Logic and Electric Design”, Školska knjiga, Zagreb, Croatia, 1996.

-
- [12] Grantham Lough, K.; Stone, R.B.; Tumer, I.: „The risk in early design (RED) method: Likelihood and consequence formulations“, Proceedings of the ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2006, Philadelphia, USA, pp. 1119-1129, 2006.
- [13] Lindemann, U.; Maurer, M.: „Early evaluation of product properties for individualised products, International Journal of Mass Customisation“, Vol. 1, No. 2-3, pp. 299-314, 2006.
- [14] Steward, D.: “The Design Structure Matrix: A Method for Managing the Design of Complex Systems”, In: IEEE Transaction on Engineering Management, Vol. 28, No. 3, pp. 321-342, 1981.

M. Sc. Krešimir Osman
Department of Design
Chair of Design and Product Development
Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
University of Zagreb
Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb
Tel: +385-01-6168-431
Fax: +385-01-6168-284
E-mail: kresimir.osman@fsb.hr
URL: www.cadlab.fsb.hr



Vorschlag zur funktionsorientierten Kategorisierung von CAD-Templates am Beispiel eines Entwicklungsprozesses in der Automobilindustrie

A. Afkari¹, D. Roth², H. Binz²

¹*Technologie Transfer Initiative (TTI GmbH)*

²*Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)
Universität Stuttgart*

This paper presents a recommendation for classifying CAD templates in the automobile development process and to determine an exact definition of template categories and their possible applications as well as limits. This classification is achieved on the basis of the product lifecycle and construction of the template. This approach can lead to a consistent product description on different abstraction levels in the development environment, as well as to a reduced template complexity, increasing robustness and project/task-independency. The awareness of possible applications and limits of existing templates will allow a target-oriented development of templates in the future while focusing on the essential functions and required information. Based on the proposed categorisation, the developed templates may fulfill the needs of various design processes, without overloading them with unnecessary information and knowledge.

1 Einleitung und Motivation

Heutige Unternehmen stehen vor der Herausforderung, qualitativ hochwertige Produkte in immer kürzeren Zeitabständen zu produzieren. Die Verkürzung der Konstruktionszeit stellt dabei einen wesentlichen Treiber im Entwicklungsumfeld dar, der unter anderem zu einer Intensivierung der betroffenen Prozesse und damit einhergehend einer steigenden Komplexität der Abläufe führt. Innerhalb dieses Spannungsfeldes aus verkürzten Entwicklungszeiten und steigender Entwicklungskomplexität ist es die Aufgabe heutiger Konstrukteure, neben grundsätzlichen Konstruktionsregeln eine Vielzahl weiterer Aspekte in ihrer Konstruktion zu beachten. Hierunter fallen beispielsweise Normen, Gesetze und Richtlinien sowie relevante DfX-Kriterien (montage-, ergonomie-, recycling- und herstellungsgerechte Konstruktion usw.).

CAD-Templates repräsentieren eine Möglichkeit, Konstrukteure bei Entwicklungsprozessen zu unterstützen. Im Rahmen der Template-Entwicklung stehen den Konstrukteuren immer funktions- und leistungsfähigere Templates zur Verfügung, die im täglichen Arbeitsalltag verschiedenste Aufgaben erfüllen. Hierzu gehören zum Beispiel das Sichern wichtiger Konstruktionsinformationen sowie die Unterstützung bei sich wiederholenden Aufgaben.

Der Beitrag setzt sich folgendermaßen zusammen. Im Abschnitt Stand der Technik wird eine Auflistung der in der Industrie gängigsten Template-Arten vorgestellt. Hierauf aufbauend werden in Abschnitt 3 wesentliche Probleme dieser Templates benannt und aus dieser Problembeschreibung das Ziel des Beitrags abgeleitet. Abschnitt 4 beschäftigt sich daher im Wesentlichen mit der Klassifizierung von Templates anhand des Produktlebenszyklus. Dies beinhaltet das Aufstellen allgemeiner Ordnungskriterien sowie einen Vorschlag zur Kategorisierung der Templates. Ein Beispiel aus der Automobilindustrie zeigt die Anwendung dieses Ansatzes. Abschließend folgen in Abschnitt 5 eine kurze Zusammenfassung und ein Ausblick.

2 Stand der Technik

Zur Erarbeitung eines Vorschlags für eine funktionsorientierte Kategorisierung von CAD-Templates ist es zwingend notwendig, einen Überblick über die gängigsten vorliegenden Formen von Templates zu erhalten. Hierzu erfolgt zunächst eine Auflistung der recherchierten Template-Begrifflichkeiten. Werden dabei der Fokus auf verschiedenste Unternehmen ausgeweitet und relevante Literaturstellen berücksichtigt, so kann festgehalten werden, dass bisher unterschiedlichste Begrifflichkeiten zur Definition von Templates benutzt werden (siehe Tabelle 1). Hierbei wird ersichtlich, dass die im industriellen

Umfeld eingesetzten Templates in ihrer Komplexität, Flexibilität, ihrem Aufbau, ihrem beinhaltenden Wissen und weiteren Parametern sehr stark divergieren. Häufig erfolgt eine singuläre Generierung einzelner Templates mit stark kontextspezifischer Ausrichtung. Diese Entwicklungstendenz ist damit konträr zum eigentlichen Zweck der Template-Erstellung, wobei wirtschaftliche Aspekte noch nicht einmal berücksichtigt wurden.

Tabelle 1: Template-Begrifflichkeiten in der Literatur

Teil-Template [5]	Toleranz-Template [5]	Konzepttemplate [5]
Berechnungstemplate [5]	SFK-Template [5]	Ergonomie-Template [5]
Zusammenbau-Template [5]	Part-Template [2, 6]	Block Functional Template [2]
Connecting Rod KBE Template [2]	Block Product Template [2]	Motion Model Template[2]
Engineering-Template [2]	Drawing-Template [2]	Manufacturing-Template[2]
Assembly-Template [2, 6]	Geometrie-Template [2, 7]	Design-Template [2]
CAE-Template [2, 7]	Struktur-Template [3]	Auslegungstemplate [7]
Konstruktion-Template [6]	Study Templates [6, 7]	Absicherungstemplate [5]
Analysen-Template [5]	Test-Template [5]	Bauteil-Template [6]
Werkzeug-Template [7]	Baugruppen-Template [7]	Process Downstream Template [7]
Geometrical Part Template [7]		

Dieser Zustand ist dem Umstand geschuldet, dass Templates verschiedenste Funktionen übernehmen. Sie können in Entwicklungsprozessen bei der Geometrieerstellung Anwendung finden, als Verlinkungsschnittstelle zwischen Bauteilen existieren, unterstützend bei der Vorbereitung von FEM- oder DMU-Untersuchungen zum Einsatz kommen, bei Simulations- und Optimierungsvorgängen sowie in vielen weiteren Anwendungsfeldern eingesetzt werden. Zeitlich eingliedern lässt sich die Anwendung von Templates beginnend in den frühen Phasen der Produktentwicklung bis hin zur Fertigungsplanung und den darauf folgenden Prozessen.

Zusammenfassend kann formuliert werden, dass bisher keine einheitliche Klassifizierung der Template-Arten mit der Beschreibung ihrer Einsatzmöglichkeiten wie auch –grenzen existiert. Im nächsten Abschnitt werden die aus diesem Zustand resultierenden Probleme dargestellt und Ziele dieses Beitrags festgelegt.

3 Problemstellung und Ziele

Aufbauend auf der Erkenntnis einer fehlenden einheitlichen Klassifizierung von Templates und damit verbundener Einsatzmöglichkeiten und –grenzen im vorangegangenen Kapitel leitet sich die grundsätzliche Problematik ab, dass Templates häufig unterschiedlich interpretiert werden und diese nicht wiederkehrend bei ähnlichen Anwendungsfällen zweckbestimmt zum Einsatz kommen. In der Regel entstehen sehr anwendungsspezifische Templates mit sehr singulärer Einsatzhäufigkeit. Ein wiederkehrender Einsatz, eines der ursprünglichen Ziele bei der Entwicklung von Templates, findet oft keine Beachtung.

Darüber hinaus stellt die zu hohe Komplexität von Templates ein weiteres problembehaftetes Charakteristikum dar, das sich durch ein Anreichern des Templates mit nicht benötigten Informationen ergibt. Dies bedingt fehlende Robustheit, eine geringere Transparenz bei der Anwendung (sinkende Nutzerakzeptanz) sowie Defizite bei der Laufzeitstabilität („Update“-Probleme).

Durch Adressierung der Forschungshypothese, dass „eine Kategorisierung der CAD-Templates anhand des Produktlebenszyklus und der Produktstruktur erreicht werden kann“, soll indirekt eine Reduzierung vormals angesprochener Probleme erreicht werden. Folgende Forschungsfragen müssen beantwortet werden:

- Wie können die vorhandenen Templates eingegliedert und kategorisiert werden?
- Aus welchen Komponenten bestehen unterschiedlichen Template-Arten?

Die Beantwortung der Forschungsfragen wird im Folgenden unter Berücksichtigung eines Entwicklungsprozesses in der Automobilindustrie erfolgen. Die angestrebte Kategorisierung der Templates soll eine höhere Transparenz im Entwicklungsprozess, eine reduzierte Informationsfülle in den Templates und eine damit einhergehende erhöhte Laufzeitstabilität sicherstellen.

4 Klassifizierung von Templates

Im Folgenden werden Definitionen für Template-Kategorien sowie deren Einsatzmöglichkeiten wie auch –grenzen vorgeschlagen. Nach Katzenbach [4] stellen dabei generische CAD-Modelle, sogenannte Templates, vordefinierte und vorstrukturierte CAD-Modelle mit integriertem Wissen dar. Katzenbach schlägt vor, aus Konstruktionstemplates spezialisierte Templates für verschiedene Absicherungsprozesse abzuleiten. „Damit erfüllen die Templates die

Belange der verschiedenen Absicherungsschritte, ohne dass die Konstruktions-templates mit [unnötigem] Wissen und Informationen überladen werden“ [4].

Gemäß diesem Grundgedanken sollten auch für andere Funktionen im Produktlebenszyklus verschiedene Template-Arten existieren. In Abschnitt 4.1 werden zuerst die möglichen Ordnungskriterien zur Kategorisierung erläutert. Abschnitt 4.2 beinhaltet die vorgeschlagene Kategorisierung. Anhand eines Industriebeispiels wird exemplarisch die Anwendung des Ansatzes dargestellt. Es erfolgt zudem eine Einordnung der komplexitätsbestimmenden Komponenten zu den Template-Kategorien.

4.1 Mögliche Ordnungskriterien zur Template-Kategorisierung

Eine Kategorisierung der Templates kann nach unterschiedlichen Ordnungskriterien erfolgen. Produktentwicklungsprozess [9], Produktstruktur (Gesamtprodukt, Komponente, Teile), Produktlebenszyklus, Komplexitätsgrad usw. sind einige Kriterien. Dem Beitrag liegt der Produktlebenszyklus als wesentliches Ordnungskriterium zugrunde, das durch Analyse der Templates aus dem Stand der Technik extrahiert werden konnte.

Produktlebenszyklus

Templates können in den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus [1] unterschiedliche Funktionen übernehmen. Beispiele hierfür sind: Untersuchung möglicher Prinzipien sowie Konzeptfindung in der Vorentwicklung (Produktplanung), detaillierte Geometrieerstellung und Wiederverwendung von standardisierten Produktstrukturen und Unternehmensmethodiken in der Gestaltungsphase (Konstruktion), Unterstützung der Folge-Prozesse (FEM, DMU, MKS, usw.) als Teil des Absicherungsprozesses (Konstruktion und Arbeitsvorbereitung) usw.

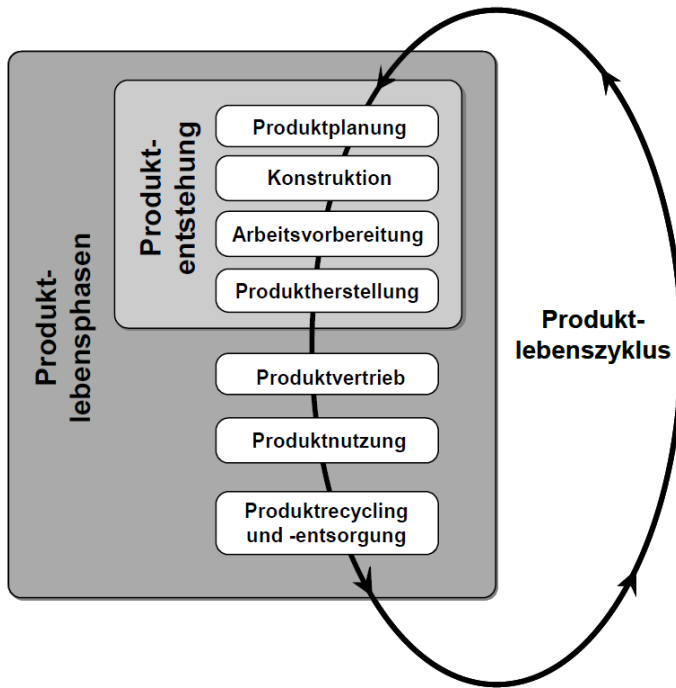


Bild 1: Phasen des Produktlebenszyklus [1]

Komplexitätsgrad

Templates können sich stark in ihrem Aufbau unterscheiden und setzen sich aus einem oder mehreren der folgenden Komponenten zusammen:

- Parameter
- Algorithmen (z. B. Skript-Programme)
- Regeln (Formeln und Checks¹)

¹ Ein Check ist ein Werkzeug, um einen Zusammenhang zu überprüfen und den Benutzer über einen Verstoß zu informieren. Im Gegensatz zu der Regel (Rule) hat es keine Auswirkungen auf die Parameter-Werte. Checks ermöglichen die Steuerung von Design-Modifikationen und die Vermeidung von Fehlern.

-
- Strukturvorlagen
 - Verlinkungen

In verschiedenen CAD-Programmen werden häufig unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet. Die Grundbausteine wissensbasierter Konstruktion sind allerdings immer gleich. Auch andere Methoden zur Bereitstellung dieser Bausteine (z. B. *design-table* zur Bereitstellung der Konstruktionsparameter) beeinträchtigen den hier vorgestellten Beitrag nicht.

Templates können, abhängig von der Anzahl unterschiedlicher Bausteine, komplex oder auch einfach aufgebaut sein. Ein Template, das aus vielen Konstruktionsschritten, Formeln und Skripten, Verlinkungen zwischen Bauteilen etc. besteht, wird als komplexeres Template angesehen. Ein Part-Template mit weniger Konstruktionsschritten kann als niederkomplexer eingestuft werden.

Folgende Punkte sind für die Beurteilung des Aufbaus und der damit verbundenen Komplexität relevant:

- Anzahl der anwenderdefinierten Parameter
- Anzahl der abgebildeten/beinhalteten Konstruktionsschritte
- Anzahl der Formeln und Checks
- Anzahl der Skript-Programme

4.2 Template-Kategorien

Auf Basis der vorgestellten Ordnungskriterien wird im Folgenden ein Kategorisierungsvorschlag für die Templates in der Automobilindustrie dargestellt (Bild 2). Theoretisch kann jedes Template in dieser Matrix eingeordnet werden. Für einige theoretisch beschreibbare Templates existieren allerdings keine Anwendungsbeispiele in der Industrie. Diese Kategorisierung kann auch auf andere Industriezweige angewendet werden.

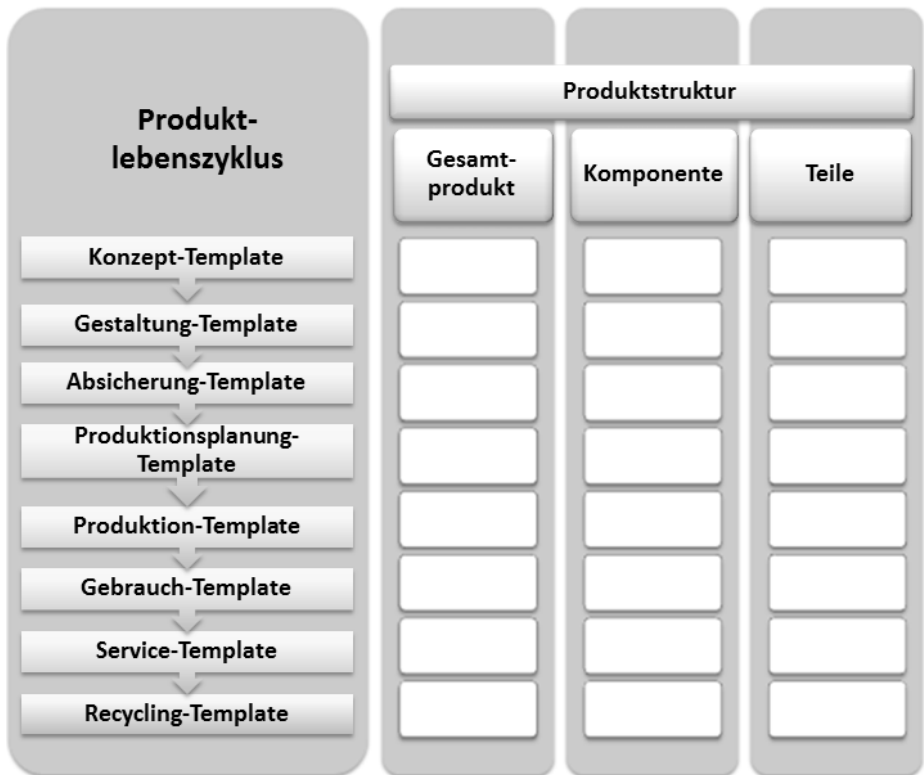


Bild 2: Vorgeschlagene Template-Kategorisierung anhand Produktlebenszyklus mit unterschiedlichen Produktstrukturen

4.3 Anwendung der Kategorisierung

In diesem Abschnitt werden, anhand eines Beispiels aus der Automobilindustrie, die drei Kategorien von Templates und deren Verknüpfung dargestellt. Bild 3 zeigt, wie die drei Template-Kategorien den Übergang zwischen konzeptionellen Überlegungen, die Gestaltung der Seitenwand-Teile und die Absicherung unterschiedlicher Vorschriften und Anforderungen unterstützen können. Im Folgenden werden diese drei Kategorien definiert.

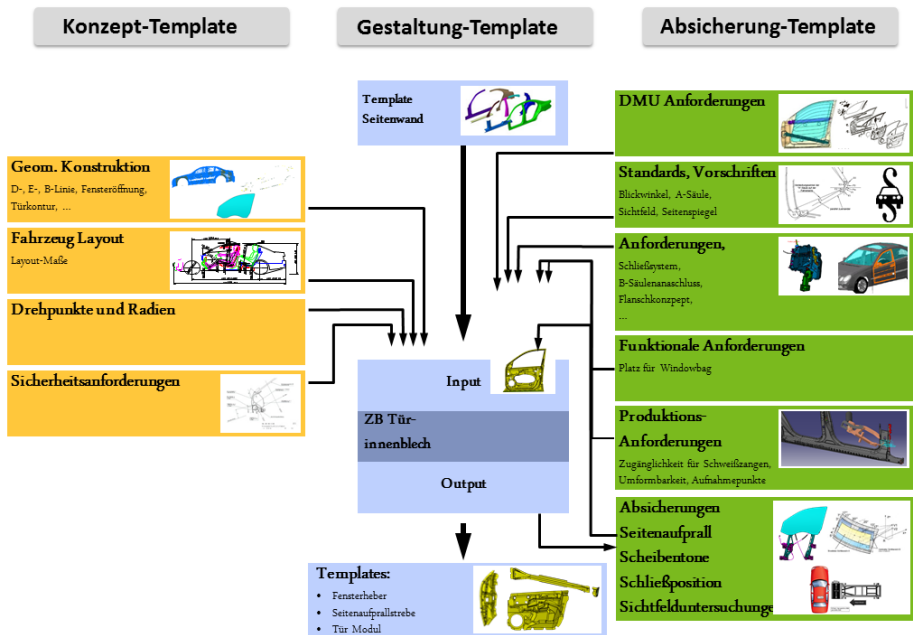


Bild 3: Verknüpfung von drei Template-Kategorien in einem realen Beispiel [6]

- **Konzept-Template:** Konzept-Templates werden für die Untersuchung und Gegenüberstellung denkbarer Prinzipien und Varianten entweder in den frühen Entwicklungsphasen, und damit vor dem tatsächlichen Projektstart, oder in den späteren Entwicklungsphasen für verschiedene Baugruppen-Konzepte (beispielweise Riementriebauslegung) eingesetzt. Konzept-Templates können 3D-CAD Modelle enthalten (generische Bauteile mit hoher Verlinkungskomplexität). Sehr oft besteht ein Konzept-Template jedoch nur aus einer Beschreibung (Bsp. Excel-Tabelle) mit integrierten Abhängigkeiten und Regeln (z. B. Motorkenndaten²). Für die Variantenuntersuchung der Baugruppen-Konzepte verwenden viele OEMs interne Tools. Die Entscheidungsergebnisse werden im Anschluss an die Untersuchung in das 3D-CAD-System importiert.

² Eine Excel-Tabelle, in der grundlegende Motor-Parameter (wie Hub, Bohrung, Zylinderabstand usw.) für Motorneuentwicklung untersucht und festgelegt werden, bevor man mit tatsächlicher Konzept-Konstruktion angefangen hat.

Durch einen generischen Aufbau der einzelnen Bauteile können Gesamt-Systeme, wie beispielweise das Gesamt-Fahrzeug oder der Gesamtmotor, übersichtlich mit beherrschbaren Verlinkungen erzeugt werden, ohne an Grenzen der Robustheit zu stoßen.

- *Gestaltung-Template:* Wenn in der Industrie von Templates gesprochen wird, ist oft diese Kategorie gemeint. Das generische Template stellt projektübergreifend einheitliche Geometrien bereit und reduziert damit zugleich Entwicklungsaufwand und Entwicklungszeit bei Neukonstruktionen. Einzelbauteile und Zusammenbauten in den frühen oder späteren Konstruktionsschritten, mit unterschiedlichem Komplexitätsgrad (hier die Anzahl der Konstruktionsschritte), werden mit dieser Template-Art abgebildet. Ziel dieses Templates ist die Automatisierung wiederkehrender Aufgaben (wiederholende Konstruktionsschritte). Die automatische Geometrieauslegung inkl. Berechnung und Analyse im Hintergrund können auch mit diesen Templates durchgeführt werden. Das Template untersucht, optimiert und konstruiert automatisch anhand der Randbedingungen und hinterlegter Informationen eine Geometrie. In der Konzeptphase werden damit die wichtigen Auslegungen, wie z. B. die Luftansaugwege für den Motor, festgelegt. Diese Aufgabe wird üblicherweise mit einer größeren Anzahl an Formeln und Checks sowie Skripten realisiert.
- *Absicherung-Template:* Ziel des Absicherung-Templates ist das Untersuchen, Simulieren, Analysieren sowie das Optimieren des Produkts, der Prozesse und Ressourcen³ (in Anlehnung an [6]). Es wird zur funktionalen Absicherung von Produktfunktionen ohne Geometrieerzeugung, wie beispielweise Sichtfelduntersuchungen der Windschutzscheibe, oder für Folgeprozesse, wie zum Beispiel FEM⁴, MKS⁵, DMU⁶ usw., eingesetzt. Die Geometrie ist dabei in der Regel vorkonstruiert und im Template an dem dafür vorgesehenen Platzhalter (so genannte Adaptermodel) vorgehalten. Aufgabe des Templates ist es, das Modell konstruktiv an die Belange der Funktionsuntersuchung anzupassen (Konzentration auf wesentliche Konstrukti-

³ Produktionsumgebung und -anlagen, z.B. Koordinatenmessgeräte und Sensoren

⁴ Finite Elemente Methode

⁵ Mehrkörpersimulation

⁶ Digital Mock-Up

onsschritte) und die Untersuchungen durchzuführen. Dies geschieht mittels integrierten Regeln/Checks und (wenigen) Skript-Programmen. Beispielweise kann damit der Raum zur Demontage eines Bauteils im Service sichergestellt werden oder notwendige Entfernungen zwischen benachbarten Bauteilen überprüft werden. In Tabelle 2 wird dargestellt, aus welchen Bestandteilen die jeweiligen Templates bestehen sowie die Anzahl der zugehörigen verschiedenen Konstruktionsparameter, Regeln/Checks und Skript-Programme abgeschätzt. Die Abschätzung basiert auf den vorhandenen gleichwertigen Templates in einem Automobilkonzern. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich Anwendungsgrenzen, im Sinne „wann ein Template Anwendung finden sollte“, ableiten.

Tabelle 2: Anzahl definierbarer Parameter, Checks und Rules sowie Skript-Programme in verschiedenen Template-Kategorien

○: keine, ◐:wenige, ●: viele.

	Definierbare Parameter	Regeln/ Checks	Skript-Programme
Konzept-Template	●	◐	○
Gestaltung-Template	◐	●	○
Absicherung-Template	○	◐	●

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Veröffentlichung beinhaltet einen Vorschlag zur Kategorisierung wesentlicher CAD-Templates am Beispiel der Automobilindustrie. Anhand erarbeiteter Kategorien ist es möglich, eine prozessübergreifende Strukturierung zur vollständigen Beschreibung aller Template-Varianten darzustellen und die Anforderungen für die Entwicklung neuer Templates zu definieren. Dieses Vorgehen kann unter anderem zu einer konsistenten Produktbeschreibung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen im Entwicklungsumfeld führen, bei gleichzeitig sinkender Komplexität, verbessertem Update-Verhalten sowie einer größeren Projekt-/ und Aufgabenunabhängigkeit. Die Kenntnis von Funktionsumfängen und Anwendungsbereichen, in denen die bestehende Templates benutzt werden können, erlaubt künftig eine zielorientierte Entwicklung von Templates bei gleichzeitiger Fokussierung auf die wesentlichen Funktionalitäten und hierzu benötigten Informationen.

Literatur

- [1] Anderl R.: Skript zur Vorlesung: Virtuelle Produktentwicklung A - CAD-Systeme und CAX-Prozessketten, Technische Universität Darmstadt, Wintersemester 2007/2008
- [2] Bautz, J.: Ford integrated design & analysis template-based methodology drives upfront quality engineering decisions, Ford Motor Company, PLM Road Map 2011
- [3] Gmeinwieser, K.: LKW Strukturtemplate, 1. MAN Partnertag CAD, MAN Nutzfahrzeuge AG, 2010
- [4] Katzenbach, A.; Ehrenberg, B.: Produkte schneller, kostengünstiger, langlebiger entwickeln - Digitaler Prototyp - Chancen und Grenzen. In: XI Internationales Produktionstechnisches Kolloquium, Berlin September 2004
- [5] Katzenbach, A.; Schulze, H.; Vettermann, S.; Kooperationen in der Automobilentwicklung –Status und Perspektiven- Stuttgarter Impulse Fertigungstechnik für die Zukunft, 2008
- [6] Katzenbach, A.: Skript zur Vorlesung: Informationstechnik und Wissensverarbeitung in der Produktentwicklung, Universität Stuttgart (IKTD), Wintersemester 2009/2011
- [7] Lamberti, R.: Skript zur Vorlesung: Effiziente Kreativität, Karlsruhe Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau, Sommersemester 2010
- [8] Liese, H.: Wissensbasierte 3D-CAD Repräsentation. Dissertation, Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion, Darmstadt, 2003
- [9] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [10] Roth, D.; Binz, H.; Watty, R.: "Generic structure of knowledge within the product development process". In: Marjanovic et al.: Proceedings of the 11th International Design Conference DESIGN 2010, pp. 1681-1690.
- [11] Yamasaki, Y.: Konstruktionshilfsmittel für die parametrische Konstruktion. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, TH Aachen, 2008

Effiziente Datenaufbereitung zur Simulationsplanung unter Berücksichtigung von Marktkontext und Entwicklungssituation

Jochen Reitmeier und Kristin Paetzold
*Institut für Technische Produktentwicklung;
Universität der Bundeswehr München*

1 Einleitung

Die im Produktentwicklungsprozess (PEP) zu erreichenden Produkteigenschaften müssen sich an der verfolgten Marktstrategie des Unternehmens orientieren, um ein ökonomisch erfolgreiches Produkt zu installieren. Die transparente Darstellung von festgelegten Entwicklungszielen und deren Herkunft kann folglich als ein essentieller Erfolgsfaktor für den PEP angesehen werden. Des Weiteren ist der PEP vielen Einflussfaktoren unterworfen. Die diesbezügliche Prozessgestaltung ist stark durch die Randbedingungen der Entwicklungssituation und die jeweils spezifischen Anforderungen an die Entwicklungsaufgabe geprägt [1]: hier gilt es Methoden und Werkzeuge bereitzustellen um operative Tätigkeiten zielgerichtet zu unterstützen.

Fokus aktueller Forschung ist die prozessorientierte Unterstützung (der virtuellen Produktabsicherung mittels Simulationen: per Simulationsplanung sollen entsprechende Methoden und Werkzeuge effizienter in Entwicklungsprozesse integriert werden, um die virtuelle Produktabsicherung zielgerichteter ausgestalten zu können [2]. Die grundsätzliche Idee beruht hierbei darauf, Produktdaten und -informationen so aufzubereiten, dass diese kontextspezifisch bewertet und verwendet werden können. Als Grundlage hierfür dient die in [3] aufgegriffene Unterscheidung von Produktdaten in Merkmale und Ei-

genschaften (CPM-Ansatz), welche dem Entwickler geeignete Stellschrauben aufzuzeigen kann um seine Lösung zu optimieren. Zudem ist eine Verknüpfung von Produktdaten zu den wechselseitigen Entwicklungsschritten Synthese und Analyse gegeben (PDD-Ansatz). Bei der Datenaufbereitung im Simulationskontext werden, neben dem Kernfokus der Merkmals- Eigenschafts-Verknüpfung, im Wesentlichen folgende Ziele verfolgt:

- Einbezug von Sensitivitätsanalysen zur Quantifizierung von Abhängigkeiten und Ermittlung bisher unbekannter Abhängigkeiten [4]
- Anknüpfung der in einer DfX-Hierarchie verankerten Unternehmensstrategie zur Bereitstellung/Gewichtung adäquater Vergleichskriterien
- Bewertung der vorliegenden Datenqualität und hierauf zu erwartender Aussagequalität virtueller Absicherungen [5]
- Einbezug von Metadaten zur Erfassung der Entwicklungssituation zur effizienteren Steuerung von virtuellen Produktabsicherungen

Im Kern gilt es die für Simulationen benötigten Daten (aktuelle Konstruktionsdaten und Referenzkriterien) zu identifizieren, bereitzustellen und hinsichtlich ihrer Konkretisierung bzw. Qualität zu beurteilen [5]. Dies wird genutzt, um die Sinnhaftigkeit von Analyseprozessen zu bewerten, diese entsprechend gegebener Daten- und Ressourcenverfügbarkeit (Methoden, Werkzeuge, Personal,...) anzustoßen, sowie nachgelagerte Prozessschritte auf Basis der Aussagequalität zielgerichteter zu steuern (Bild 1): dieser Beitrag beschränkt sich auf die Abbildung von Marktfokus in einer DfX-Hierarchie zur zielgerichteten Ableitung von Referenzkriterien (Soll-Eigenschaften) sowie der grundlegenden Datenaufbereitung im Simulationskontext.

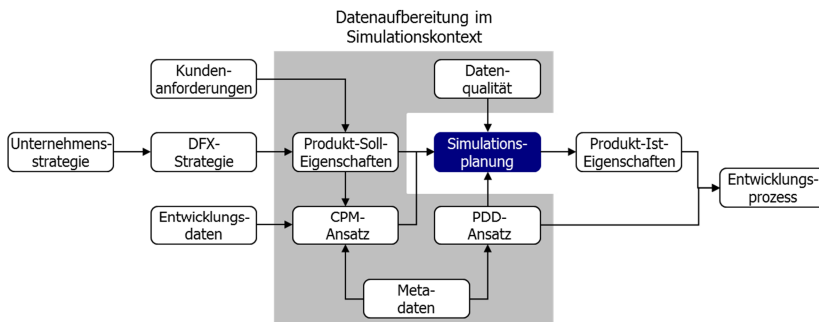


Bild 1: Kontextspezifische Datenaufbereitung zur Simulationsplanung

2 Nutzung der DfX-Strategie zur Berücksichtigung des Marktkontext

Design for X (DfX) bezeichnet ein Wissenssystem, welches Erkenntnisse, wie einzelne Eigenschaften technischer Systeme im Konstruktionsprozess zu erreichen sind, sammelt und ordnet [6]. Neben der reinen Funktionserfüllung eines Produktes sind auch mannigfaltige Anforderungen verschiedenster Fachbereiche („X“) zu beachten, um ein marktfähiges und erfolgreiches Produkt zu entwickeln. DfX steht mit Blick auf die in der Literatur verwendeten Definitionen dabei für alle Anstrengungen, die richtigen Entscheidungen im Produktentwicklungsprozess unter Berücksichtigung aller Restriktionen auf der Grundlage einer hinreichenden und universell einsetzbaren Wissensbasis zu treffen [7]. Das Wissenssystem DfX ist folglich ein adäquates Hilfsmittel um vielfältige Produktanforderungen (aus Kundensicht wie auch unternehmens- oder produktstrategischer Sicht) im PEP zu beachten.

2.1 Strukturierungsansätze und Definition eines Sollzustandes

Zur effizienten Nutzung des DfX ist die Anwendung geeigneter Strukturierungsverfahren notwendig [7], wofür in der Literatur verschiedene Ansätze angeboten werden: als wesentliche Ansätze sind hier die Gliederung von DfX-Aspekten entsprechend ihrer Herkunft aus dem Produktlebenszyklus [8], die Unterscheidung zwischen funktionsorientierten und zielorientierten DfX-Aspekten [9], wie auch das hierarchische Modell nach [10] zu nennen. Nachteilig an diesen Ansätzen ist das ein konkreter Bezug zu marktorientierten Unternehmensstrategien fehlt, dies aber als wichtig für den ökonomischen Erfolg anzusehen ist. Diese Lücke gilt es zu schließen, um zum einen den Produktentstehungsprozess effizienter gestalten und zum anderen im Gesamtunternehmen eine konsistente und für jeden Beteiligten transparente Strategie hinsichtlich Anforderungsherkunft verfolgen zu können.

In Kapitel 2.2.2 wird darum ein Ansatz aufgezeigt, der das Potential in sich birgt, marktbezogene Aspekte noch konsequenter im PEP zu verfolgen. Dieser weist in seinem Aufbau Ähnlichkeiten zum hierarchischen Modell nach [10] auf, da hier Abhängigkeit zwischen den Phasen der Produktentwicklung und Zielsetzungen bzw. Detaillierungsgrad der DfX-Richtlinien einbezogen werden können. Ebenso wird ein Bezug zur Klassifizierung von Produktmerkmalen nach [3] aufgezeigt. Dies ist im Rahmen der Simulationsplanung von Vorteil, da aus den DfX-Richtlinien entsprechende DfX-Kriterien abgeleitet werden sollen, die hinsichtlich der Entwicklungsphase eine entsprechende Detaillierung aufweisen und genutzt werden sollen um adäquate Soll-Eigenschaften für Eigenschaftsabsicherungen mittels Simulation bereitstellen zu können. Um den Erfüllungsgrad einer verfolgten Strategie zu bestimmen,

ist diejenige Hierarchieebene auszuwählen, bei der zum Evaluierungszeitpunkt die größtmögliche Übereinstimmung zwischen Informationsbedarf und Informationsangebot herrscht [10]. Ebenso können aus den abgeleiteten Anforderungen, in der Phase der Merkmalsfestlegung, Hinweise für notwendige Nachweisverfahren abgeleitet werden. Des Weiteren bedarf es zu Überlegungen zur Simulationsplanung eines detaillierten Prozessmodells, welches auch konkretere Rückschlüsse zur Daten- und Informationsentstehung zulässt: als Basis hierfür soll das FORFLOW-Prozessmodell ([11]) dienen, zu welchem eine prinzipielle Zuordnung von Methoden der Simulation in [2] erfolgte.

Des Weiteren soll aus einer derartigen Strukturierung die Bedeutung von DfX-Richtlinien bzw. abgeleiteten Kriterien/Solleigenschaften herausgestellt werden und sich in entsprechenden Gewichtungsfaktoren niederschlagen. Dies soll einerseits genutzt werden um den Fokus auf essentielle Aspekte der Produktentwicklung zu schärfen und andererseits in die Ermittlung der situativ vorhandenen Datenqualität einbezogen werden [5]. Eine entsprechende Möglichkeit zur Ermittlung von Gewichtungsfaktoren findet sich [7]. Dieser ermöglicht auch verschiedenartige Wechselwirkungen (Komplementarität, Konkurrenz, Widerspruch, Indifferenz) mannigfacher Anforderungen zu beachten (die Entscheidung ob z.B. kostengerecht oder sicherheitsgerecht gearbeitet wird, beeinflusst die Produktausprägungen wesentlich). Die Zielsetzungen im PEP werden folglich auf Basis der Auswahl und Priorisierung geeigneter Richtlinien und abgeleiteter Kriterien konkretisiert und entsprechend der Entwicklungssituation überprüft. Parallel dazu sollen prozessorientierte Strukturierungsansätze, z.B. [12], herangezogen werden: einerseits wird dadurch eine Zuordnung von DfX-Methoden zu Prozessschritten möglich, andererseits konkretisiert es den Prozesseinfluss auf die Produktbeschreibung (Gewichtung von DfX-Kriterien, Verfügbarkeit von Daten und Informationen,...).

2.2 Einbezug marktorientierter Unternehmensstrategien

Um sich im marktwirtschaftlichen Wettbewerb erfolgreich zu behaupten ist es für Unternehmen essentiell, sich entsprechender Erfolgsfaktoren die zum Aufbau nachhaltiger Wettbewerbsvorteile dienlich sind bewusst zu sein. Diese müssen sich an den Kundenwünschen bzw. am anvisierten Marktsegment orientieren. Die hieraus abgeleiteten Produkthanforderungen gilt es bestmöglich umzusetzen. Marktorientierte Strategien können durchaus weiterführende Ausrichtungen implizieren: beispielhaft können Innovationsstrategien zielgerichtete Ressourcenstrategien (Fertigungsanlagen, Fachkräfte,...) bedingen. Im Rahmen dieses Beitrags wird sich auf die Berücksichtigung des Marktfokus beschränkt, da dieser aus Sicht der Autoren als der notwendige Kernfokus jeder Unternehmung angesehen werden kann und somit in stärker-

rem Maße die Rahmenbedingungen für verzahnte strategische Ausrichtungen (z.B. Innovationsstrategie) setzt, als dies umgekehrt der Fall ist. Derartige Verknüpfungen wie auch die Berücksichtigung von branchenspezifischen Besonderheiten (z.B. Technologiezyklen) und unternehmensinternen Perspektiven (z.B. Ressourcenstärke) bei Anwendung der in der Literatur allgemein formulierten Strategieoptionen sind in einem weiteren Schritt zu beachten.

2.2.1 Erfolgsfaktoren für nachhaltige Wettbewerbsvorteile

Zur Erlangung von Wettbewerbsvorteilen steht eine Vielzahl strategischer Konzepte zur Verfügung (z.B. [13], [14], [15], [16]). Die gängigsten Marktstrategien lassen in ihren zugrunde liegenden Ausprägungen Gemeinsamkeiten bezüglich verfolgter Grundphilosophien erkennen: diese stehen in engem Bezug zu den erfolgversprechenden Grundtypen einnehmbarer Wettbewerbsstrategien nach [17] (Kostenführerschaft, Differenzierung, Schwerpunktbildung); somit stellen diese nach [16] strategische Optionen dar und dienen sowohl zur Systematisierung möglicher Strategien als auch als Ausgangspunkt für strategische Überlegungen. Im Folgenden werden die wesentlichen Erfolgsfaktoren im Marktkontext (mit beispielhaften Erläuterungen anhand des Automobilmarktes) dargelegt, da diese einerseits die Entwicklungsaufgabe konkretisieren bzw. die Gestaltungsfreiheit des Entwicklers einschränken und andererseits als Grundlage für eine marktorientierte DfX-Strategie bzw. DfX-Hierarchie (Kap. 2.2.2) dienen.

Bei **Differenzierungsstrategien** ist es das Ziel, die Funktion von Wettbewerbsprodukten ebenfalls zu erfüllen und einen zusätzlichen Leistungsvorteil (vom Kunden wahrgenommen und akzeptiert) anzubieten bzw. sich von diesen in ausreichendem Maße zu unterscheiden (Bsp.: Motorisierte Mobilität stellt die Grundfunktion, Fahrerassistenzsysteme einen Zusatznutzen dar). Je konkreter Marktbearbeitungsansätze zu befriedigende Kundenbedürfnisse fokussieren, umso konkreteren Vorgaben unterliegt die Aufgabenstellung. Zu erreichende Produkthanforderungen und -eigenschaften sind folglich genauer definierbar, als es bei allgemeiner formulierten Leistungsstrategien der Fall ist. In der Regel wird ein kleinerer Konsumentenkreis, dessen Bedürfnisse genauer spezifiziert werden können, anvisiert: Kundenzielgruppen und nicht Produkteigenschaften sind die Ausgangsbasis.

Die **Preisführerschaft** impliziert ein Produkt zu günstigeren Konditionen als die Konkurrenz anzubieten, wobei nicht nur der Kaufpreis sondern auch die anschließenden Nutzungskosten (Kraftstoffverbrauch, Serviceintervalle,...) ebenfalls beachtet werden müssen. Ein Kernziel bei Verfolgung von Preisstrategien ist es, ein niedriges Herstellkostenniveau, z.B. durch einfache Produkti-

onsabläufe, zu erhalten. Zudem gilt es auch Technologiepotenziale, wie beispielweise die Leichtbau-Mischbauweise aus Aluminium, hochfestem Stahl und Faserkunststoff (Gewichtsreduktion fördert Verbrauchsreduktion bei gleichzeitiger Erfüllung von Sicherheitsaspekten, Rohstoffeinsparung, etc.) zu nutzen. Des Weiteren erweisen sich die Verwendung von Normteilen und Gleich-/Wiederholteilen als vorteilhaft, was bei Mehrproduktstrategien zusätzliche Synergiepotentiale offeriert.

Ein weiterer Aspekt der berücksichtigt werden muss ist die **Produktqualität**. Die technische Sichtweise des Begriffes Qualität kann aber nicht direkt auf das Qualitätsverständnis eines Kunden übertragen werden. Bedeutung und Bewertung verschiedener Produktmerkmale und -eigenschaften kann je nach Kunde, basierend auf individuellen Anforderungen und Vorstellungen, differieren. So können auch Aspekte zur Qualitätsbewertung herangezogen werden, ohne zur Erfüllung technischer Anforderungen und Produktfunktionen besonders relevant zu sein (z.B. exklusive Designelemente oder Materialien im Interieur). Grundsätzlich ist festzustellen, dass bei Verfolgung von Differenzierungsstrategien, vor allem bei Produkten im oberen Preissegment des Angebotsspektrums, Qualitätsaspekte besonders zu beachten sind; bei Kostenstrategien muss ebenso ein angemessenes Qualitätsniveau erreicht werden.

Die Dauer des Produktlebenszyklus ist je nach Produktart und Branche sehr unterschiedlich. Der festzustellende Trend zu immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen hat zur Folge, dass auch die **Entwicklungszeit** für vergleichbare Entwicklungsaufgaben reduziert werden muss. Deshalb müssen Entwicklungswerkzeuge, -methoden und organisatorische Abläufe stets effizienter gestaltet werden, um einen möglichst frühzeitigen Markteintritt zu gewährleisten. Verzögerte oder zu langwierige Entwicklungsprojekte bedeuten in der Regel Umsatzeinbußen, v.a. wenn Wettbewerbsprodukte bereits länger am Markt vertreten sind und nur eine schwächere Marktposition eingenommen werden kann.

2.2.2 Marktorientierte DfX-Strukturierung und Richtlinienzuordnung

Die im vorangegangenen Kapitel aufgezeigten Erfolgsfaktoren dienen nun als Basis um eine marktorientierte DfX-Hierarchie aufzubauen: Leistung, Kosten und Qualität werden im Sinne von „Überkriterien“ auf oberster Ebene abgebildet. Zudem wird das Überkriterium „Other Aspects“ als Sammelpool für Aspekte die ebenfalls zu beachten sind, den andern Überkriterien aber nicht zugeordnet werden, eingeführt (Bild 2). Diese Überkriterien fungieren als Ordnungsschemata für alle bereits existierenden DfX-Richtlinien bzw. deren konkretere Ausprägungen als DfX-Kriterien.

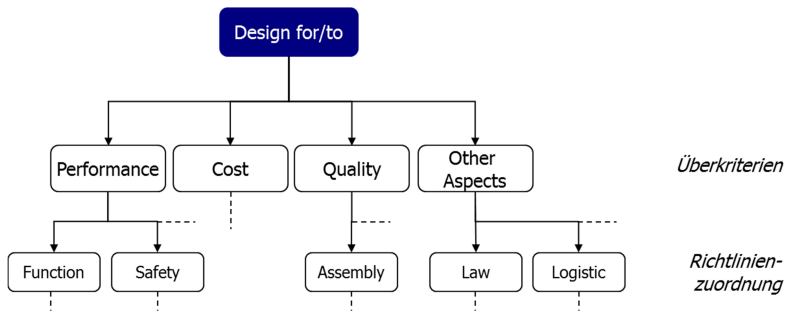


Bild 2: Marktorientierte DfX-Strukturierung

Zwei Erfolgsfaktoren werden mit derzeit angewendeten Methoden sehr gut abgedeckt:

- Mittels Design to Cost (DtC) werden **Kosten** als gleichberechtigter Entwurfparameter neben technischen Aspekten beachtet, um möglichst frühzeitig kostenvermeidend zu agieren. Konkrete Werkzeuge wie z.B. Target Costing, Wertanalyse oder Benchmarking zielen in interdisziplinärer Weise, unter Einbezug des Top-Managements, darauf ab, die beste technische Lösung im Rahmen des vorgegebenen Kostenzieles zu erreichen. Dies trägt zu Kostensensibilisierung und -transparenz im gesamten Entwicklungsprozess bei.
- Zur Berücksichtigung der **Entwicklungszeit** kann auf klassische Elemente und Hilfsmittel des Prozess- und Projektmanagements zurückgegriffen werden. Beispielhaft können Meilensteine bzw. Quality Gates genannt werden, deren Festlegung zielgerichtet erfolgen muss: hier kann eine marktorientierte DfX-Struktur erfolgsrelevante Produkteigenschaften verdeutlichen und somit deren Festlegung unterstützen. Folglich können Entwicklungsaktivitäten zielgerichteter ausgestaltet und abgeprüft werden.

Die Auswahl und Einordnung relevanter DfX-Richtlinien bzw. DfX-Kriterien hinsichtlich der vorgestellten Überkriterien unterliegt nicht nur spezifischem Fachwissen und subjektiven Einschätzungen, sondern auch der marktorientierten Anforderungsherkunft. Dies wird beispielhaft an der Richtlinie „Design for Environment“ näher betrachtet: unter diesem Aspekt können im Falle eines PKW grundsätzliche Produkteigenschaften wie „Kraftstoffverbrauch“ (i.S.v. Ressourcenverbrauch) und „Emissionswerte“ Beachtung finden. Im

Rahmen der Produktplanung gilt es die Zielorientierung dieser Produkteigenschaften festzulegen (Bild 3A):

- Stehen diese für Kunden unter funktionalen Gesichtspunkten im Vordergrund sind entsprechende Richtlinien unter dem Überkriterium „**Performance**“ einzuordnen. Als Beispiel ist die vorwiegende PKW-Nutzung im innerstädtischen Gebiet zu nennen: hier spielt neben einem geringen Kraftstoffverbrauch auch die Zuteilung der so genannten Umweltplakette (berechtigt, basierend auf Emissionswerten, zur Einfahrt in innerstädtische Umweltzonen [18]) beim Fahrzeugkauf eine erhebliche Rolle.
- Wird z.B. durch Marktforschung festgestellt, dass Kunden diese Aspekte nicht der Funktionserfüllung, sondern vorwiegend der qualitativen Produktumsetzung zurechnen, bedeutet dies eine Einordnung unter qualitätsrelevanten Aspekten („**Quality**“).
- Ökologisch orientierte Kriterien können auch dem Überkriterium „**Other Aspects**“ zugeordnet werden. Sportwagenhersteller zielen vorwiegend darauf ab, ihren Kunden eine schnelle und erlebnisreiche Fortbewegung zu ermöglichen. Kriterien wie Kraftstoffverbrauch oder Emission sind hier mitunter sekundär. Dies schließt aber nicht aus, derartige Aspekte mit einzubeziehen, um den immer steigenden Wünschen nach ökologisch verträglichen Produkten Rechnung zu tragen sowie einen Beitrag zur Verbesserung des Unternehmensimages zu leisten.

Des Weiteren ist eine verteilte Zuordnung von Aspekten einer ursprünglichen DfX-Richtliniensammlung, gemäß ihrem Zielfokus, möglich (Bild 3B): so kann ein niedriger Kraftstoffverbrauch nicht nur unter Ressourcengesichtspunkten sondern vorwiegend mit Blick auf die Lebenszykluskosten bewertet werden. Der Aspekt von Emissionswerten wird lediglich als Nebenkriterium (bzw. als potentieller Nebeneffekt eines niedrigen Kraftstoffverbrauchs) beachtet. Kostenbewussten Kunden wird somit ermöglicht, sich im Geltungsbereich der Feinstaubverordnung mobil zu bewegen, ohne dass dies ein relevantes Kaufkriterium, sondern lediglich einen Zusatznutzen, darstellt.

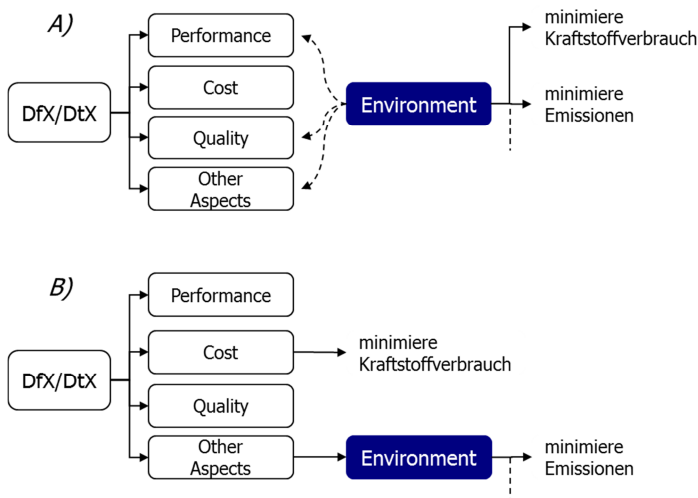


Bild 3: zielorientierte Zuordnung von Aspekten des DfX

3 Einbezug der Entwicklungssituation in die Datenaufbereitung

Eine eindeutige Definition des Begriffs Entwicklungssituation liegt nicht vor, vielmehr wird eine konkrete Entwicklungssituationen entweder beschrieben oder Kriterien bzw. Parameter genannt, die diese charakterisieren sollen [1]. PONN erachtet eine differenzierte Betrachtung der Entwicklungssituation bzw. des Entwicklungskontextes als notwendige Voraussetzung, wenn passende Hilfsmittel zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen herangezogen werden sollen und verwendet folgende Begrifflichkeiten ([19], S.14): „Als Entwicklungssituation wird dabei ein konkreter Zeitpunkt im Entwicklungsprozess definiert, der sich durch den Zustand der Produktmodelle und des Entwicklungsprozesses sowie durch Einflussfaktoren auf Produkt und Prozess beschreiben lässt. Als Entwicklungskontext wird der den Entwicklungsprozess umgebende Zusammenhang bezeichnet, der sich durch Kontextfaktoren beschreiben lässt, die Einfluss auf Produkt und Prozess ausüben.“ Zudem unterscheidet PONN in der Beschreibung der Entwicklungssituation zwischen indirekten (kein direkten Einfluss auf die Auswahl geeigneter Aufgaben im Entwicklungsprozess, für Methodenauswahl herangezogen) und direkten (durch vorliegende oder gewünschte Sachverhalte beschreibbar, Ist- bzw. Soll-Situation) Kontext [19]. Letzterer ist folglich primärer Treiber für operatives Vorgehen. Hier findet sich der Hinweis auf die zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegenden Produktmodelle sowie auf den Unterschied zwischen Ist- und Soll-Zustand, dies ist auch im Simulationskontext entscheidend: insbesondere

in frühen Phasen sind Daten durch eine hohe Unsicherheit gekennzeichnet und konkretisieren sich erst im Laufe des Entwicklungsprozesses. Damit verknüpft ist neben der reinen Verfügbarkeit von benötigten Daten auch eine mit diesen verknüpfte Datenqualität. Beides hat direkte Auswirkungen auf die Sinnhaftigkeit von Simulationen respektive der Gütequalität entsprechen erreichbare Ergebnisse [5]. Bezogen auf vorwiegend virtuelle Produktentwicklungsprozesse sind die Simulationsergebnisse wiederum Treiber für folgende Aktivitäten, da sie den Unterschied zwischen gewünschtem und aktuellem Zustand (Produktreifegrad) aufdecken und als Entscheidungsgrundlage für Iterations- (Optimierungs-)zyklen dienen.

Die grundsätzliche Denkweise nach PONN soll auch im Rahmen der zur erarbeitenden Methodik zur Simulationsplanung aufgegriffen werden; hierfür müssen allerdings adäquate Parameter bzw. Kriterien definiert werden um die Entwicklungssituation im Simulationskontext beschreibbar und bewertbar zu machen: in Bild 4 hierzu sind die essentiellen Entwicklungsrandbedingungen aus Sicht des Entwicklers aufgezeigt. Die Randbedingungen ersten Grades stehen in unmittelbarem Zusammenhang zu seiner täglichen Arbeit. Die verfolgte Strategie im Unternehmen begrenzt seine Gestaltungsfreiheit und setzt einen schwer (z.B. nur durch das Top-Management) veränderbaren Entwicklungskontext, der sich aber durch hieraus ableitbare Anforderungen auf seine tägliche Arbeit (Was genau soll ich entwickeln?) auswirkt. Ebenso schwer veränderbar ist die im Unternehmen gegebene Verfügbarkeit von Ressourcen (Software-Lizenzen, Abteilungskapazitäten,...). Diese sind zielgerichtet einzusetzen und haben insbesondere Auswirkungen auf die täglichen Arbeitsabläufe, also wie entsprechende Projekte abgearbeitet oder gesteuert werden. „Produkt“ und „Prozess“ sind hierbei die direkten Aspekte, welche es situativ zu beschreiben gilt. Ressourcen und Strategie stellen einen längerfristig gültigen Rahmen dar, müssen aber ebenso beachtet werden, da sie den direkten Entwicklungskontext determinieren. Die Entwicklungsrandbedingungen zweiten Grades erweitern den Entwicklungskontext um indirekte Aspekte. Diese finden aber auf Grund ihres höheren Abstraktionsgrades im Kontext der Simulationsplanung zunächst keine gesonderte, aber eine indirekte Beachtung: sie beeinflussen die Produktentwicklung, z.B. Prozessabläufe hinsichtlich vernetzter Entwicklung bei globalisierten Unternehmen oder explizite Produkthanforderungen auf Grund gesetzlichen Vorgaben, und fließen daher auch in den direkten Entwicklungskontext ein.

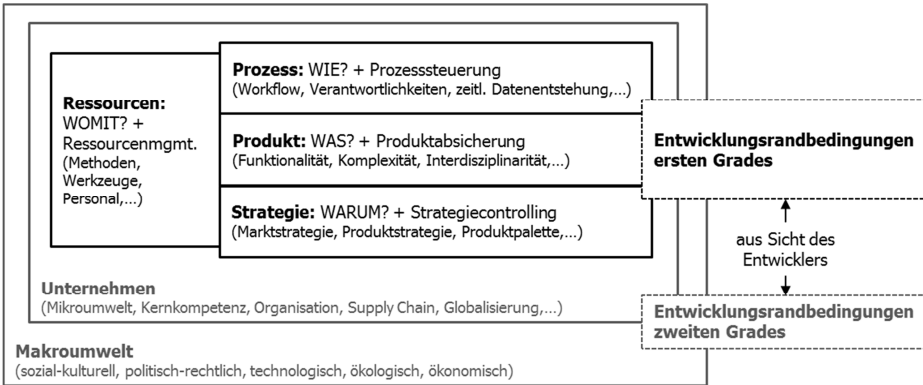


Bild 4: Entwicklungsrandbedingungen im Simulationskontext

Die tatsächliche Ausprägung von Produkteigenschaften ist folglich i.A. stark durch den Verlauf des Entwicklungsprozesses bzw. die spezifische Entscheidungssituation (welche sich aus der konkreten Ausprägung des Entwicklungskontextes ergibt) und den hiermit gekoppelten Informationen geprägt. Dies macht es erforderlich die auf der Unterscheidung von Produktdaten in Merkmale und Eigenschaften basierende Produktbeschreibung um prozessrelevante Informationen bzw. um Kriterien die diese beschreiben zu ergänzen. Dies dient letztlich zur Unterstützung der Entscheidungssituationen zur Simulationsdurchführung bzw. Ergebnisbewertung mit Blick auf die zu folgenden Aktivitäten (z.B. Iterations- bzw. Optimierungszyklen).

Erste Untersuchungen zeigen, dass eine netzwerkartige Verknüpfung von Merkmalen und Eigenschaften besteht, welche mittels Matrizen zielführend abgebildet werden kann (Bild 5). Dies ermöglicht die Erfüllung der in Kapitel 1 formulierten Zielsetzungen bzw. Anforderungen an eine effiziente Datenaufbereitung zur Simulationsplanung. Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und Eigenschaften (u.a. mittels Sensitivitätsanalysen quantifiziert bzw. identifiziert [4]) sowie jeweils untereinander sind abbildbar. Des Weiteren können, z.B. mittels untergeordneter Matrizen oder Datenbanken, prozessrelevante Metadaten (Ersteller, Zeitpunkt der Entstehung, Änderungshistorie, DfX-Richtlinien-Verknüpfung,...) zu den entsprechenden Produktdaten hinterlegt werden. Entsprechende Klassifikatoren/Parameter zum Einbezug von relevanten Metadaten werden derzeit erarbeitet, hier gilt es nicht nur Prozessparameter sondern auch andere Aspekte wie Anforderungsherkunft oder -gewichtung mit einzubeziehen. Diese sollen die bereits angesprochenen Entwicklungsrandbedingungen (Bild 4) erfassen, um die gegenwärtige Entwicklungssituation greifbarer zu machen. Eine Gruppierung bzw. ein Filtern von kontextrelevanten

ten Informationen kann ebenfalls realisiert werden: dies kann den Fokus auf bestimmte Komponenten/Baugruppen, Verantwortlichkeiten, DfX-Richtlinien, Eigenschaftsabsicherungen, domänenspezifische Sichtweisen, o.ä. unterstützen und ermöglicht folglich die Darstellung einer situativ benötigten Sichtweise.

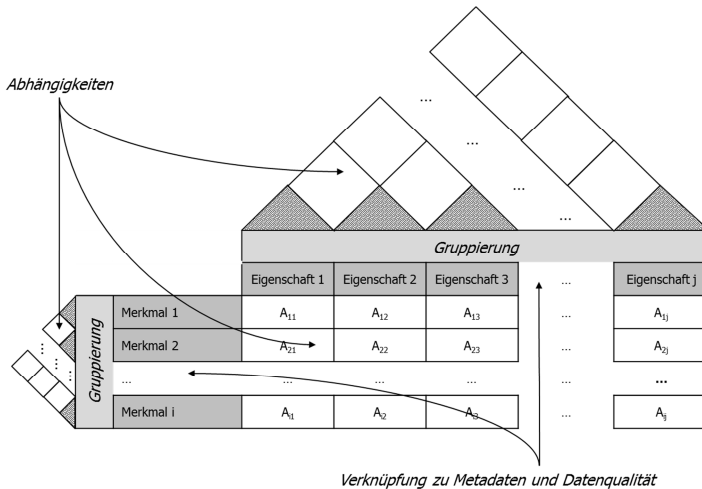


Bild 5: spezifisches Datenmodell im Simulationskontext

4 Zusammenfassung

Im Wissenssystem DfX fehlte bis jetzt der konkrete Bezug zu marktorientierten Unternehmensstrategien. Ein Ansatz wurde aufgezeigt um diese mittels Neuordnung von Entwicklungsrichtlinien stärker einzubeziehen. Dies unterstützt die Ableitung adäquater Soll-Eigenschaften, deren Gewichtung, sowie Planungen zum Abprüfen des Entwicklungsfortschrittes. Die zugrunde gelegte Datenaufbereitung ermöglicht die Bewertung der vorliegenden Entwicklungssituation und verspricht daher eine effizientere Steuerung von Entwicklungsprozessen. Letztendlich können Entwicklungsziele eindeutiger sowie transparenter definiert und verfolgt werden. ^

Literatur

- [1] Roelofsen, J.: Situationspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen, Dissertation, Dr. Hut Verlag München, 2011.
- [2] Paetzold, K.; Reitmeier, J.: Approaches for Process Attendant Property Validation of Products, Proceedings of the 1st International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes (MMEP), Cambridge - UK, 19.-20. Juli 2010.
- [3] Weber, C.: "CPM/PDD - An extended theoretical approach to modeling products and product development processes", in: Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on advances in methods and systems for development of product and processes. TU Berlin / Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), 07.-08. Juli 2005, p.159-179, Stuttgart, Fraunhofer-IRB-Verlag, 2005.
- [4] Reitmeier, J.; Paetzold, K.: Use of methods of sensitivity analysis for simulation planning. In: Marjanovic D., Štorga M., Pavkovic N., Bojcetic N. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Design Conference DESIGN 2012, Dubrovnik: 2012.
- [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] Hubka, V.: Design for - DF. Fertigungsgerechtes Konstruieren, Report, Beiträge zum 6. Symposium, H. Meerkamm (Hrsg.), Erlangen, S. 1-6, 1995.
- [7] Bauer, S.: Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 404 Düsseldorf 2009.
- [8] Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren, Shaker Verlag, Aachen, 1998.
- [9] Andreasen, M. M.; Mortensen N. H.: Basic thinking patterns and working methods for multiple DFX, in: Fertigungsgerechtes Konstruieren, Beiträge zum 8. Symposium, H. Meerkamm (Hrsg.), Schnaittach, 1997, S. 7-12.

-
- [10] Bauer, S.: Design for X – Ansätze zur Definition und Strukturierung, in: Design for X, Beiträge zum 14. Symposium, H. Meerkamm (Hrsg.), Neukirchen, 2003, S. 1-8.
- [11] Krehmer, H.; Eckstein, R.; Lauer, W.; Roelofsen, J.; Stöber, C.; Troll, A.; Weber, N.; Zapf, J.: Coping with multidisciplinary product development - a process model approach, In: Proceedings of the 16th International Conference of Engineering Design (ICED 09), August 24-27, 2009, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- [12] Stöber, C.; Meerkamm, H.: Einfluss der Aspekte des Design for X auf den Produktentwicklungsprozess. Flexible Prozessunterstützung in der Produktentwicklung: Prozesse-Daten-Navigation, "Bayerischer Forschungsverbund für Prozess- und Workflowunterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung", Abschlussbericht 01.10.2006 -30.09.2009, S.141-160, ISBN 978-3-8322-6-8640-8, Shaker Verlag, 2009.
- [13] Abell, D. F.: Defining a business – The Starting Point of Strategic Planning, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1980.
- [14] Ansoff, H. I.: The New Corporate Strategy, New York, 1988.
- [15] Freter, H.: Markt- und Kundensegmentierung. Kundenorientierte Markterfassung und –bearbeitung, 2. Auflage., Stuttgart: W. Kohlhammer Druckerei GmbH+Co. KG 1983.
- [16] Kotler, P.; Keller, K. L.; Bliemel, F.: Marketing-Management. Strategien für wertschaffendes Handeln, 12. Auflage, München: Imprint von Pearson Education.
- [17] Porter, M. E.: Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors, New York: Free Press, 1980.
- [18] 35. BImSchV: Fünfunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 2006.
- [19] Ponn, J.: Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte, München: Dr. Hut 2007, ISBN: 978-3-89963-654-3.

Mechanische Absicherung automatisierter Montageanlagen mit physikbasierten Simulationen

Dipl. Ing. Anton Strahilov
DAIMLER AG

Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova
Institut für Informationsmanagement in Maschinenbau (IMI)
KIT-Karlsruhe

Dr. Thomas Bär
DAIMLER AG

1 Einleitung

Die Entwicklung komplexer und automatisierter Montageanlagen ist ohne den Einsatz rechnergestützter Simulationen nahezu undenkbar. Um die Aussagekraft dieser Simulationen zu erhöhen müssen die Simulationsmodelle immer weiter der Realität angenähert werden. Eine Möglichkeit die Realitätsnähe zu steigern bietet die Erweiterung dieser Simulationsmodelle um die physikalischen Eigenschaften. Verschiedene Ansätze zeigen wie physikalische Eigenschaften zur Untersuchung physikalischen Verhaltens von Anlagenkomponenten abgebildet werden können. Dazu zählen unter anderem kinematische Abhängigkeiten, Dynamik und Festigkeit von Anlagenkomponenten. Mittels des Einsatzes der physikalischen Methoden aus der Computerspiel-Industrie wird eine zeitreduzierte Anlagensimulation angestrebt. Welche IT-Tools dazu in Frage kommen wird im Rahmen dieser Publikation vorgestellt. Außerdem wird eine Methode vorgestellt mit dessen Hilfe die Simulationsmo-

delle mit wenig Aufwand erzeugt werden können. Diese wird im Rahmen der Publikation als Rollenbasierte Anlagenentwicklung vorgestellt.

2 Motivation

Damit ein Fahrzeug wirtschaftlich, also in hohen Stückzahlen, produziert werden kann werden hoch komplexe automatisierte Anlagen benötigt. Die Planung dieser Anlagen beherbergt häufig eine große Anzahl von Fehlern, die erst während der realen Inbetriebnahme entdeckt werden [1]. Aus Zeitmangel werden diese meist nur provisorisch behoben. Dabei handelt es sich typischerweise um Montageanlagen welche in der Regel im Rahmen mehrerer Produktvarianten erstellt werden. Während der Planung dieser Montageanlagen stehen jedoch nicht immer alle Produktvarianten zur Verfügung. Aus diesem Grund ist die Absicherung durch den Anlagenbauer unter Einbezug aller Varianten nicht möglich. Weitere typische Merkmale von automatisierten Montageanlagen sind ausgewählte physikalische Effekte. Diese werden eingesetzt um bestimmte Abläufe in den Montageanlagen zu simulieren. Ein typisches Beispiel dafür ist die gewollte Reibung zwischen Förderband und der geförderten Komponente. Die physikalischen Effekte die zwischen den Produktkomponenten auftreten sind ebenfalls für das korrekte physikalische Verhalten der Anlagenkomponenten von großer Bedeutung. Des Weiteren stellen die Kabel und Schläuche in der Montageanlage eine enorme Fehlerursache dar und können mit den heutigen Planungs- und Absicherungsmethoden nur unter enormem Zeitaufwand in der Simulation abgebildet werden.

3 Stand der Technik

3.1 Physik-Engines

In den letzten Jahren wurden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten entwickelt, wie die von der Computerspielindustrie kommenden Physik-Engines, welche auch für die Bedürfnisse der Industrie eingesetzt werden können [2][3]. Selbstverständlich sind die Anforderungen an die Physik-Engines von Seiten der Industrie nicht identisch mit den Anforderungen an ein Computerspiel, weswegen zusätzlich Anpassungen an die Industrie notwendig sind. Beispiel dafür ist die Kollisionserkennung bzw. -behandlung. Da sich diese auf die geometrische Form des Objektes in der Szene bezieht ist sie für die korrekte physikbasierte Simulation nicht ohne weiteres einsetzbar [3]. Grund dafür ist die eingeschränkte Verwendung von 3D-Geometriemodellen (nur konvexe Geometrie) [4]. Um diesen Nachteil bzw. Mangel zu optimieren wird in [3] eine Methode vorgestellt die aus einem komplexen konkaven 3D-Geometriemodell mehrere einfache konvexe Modelle erzeugt. Diese Methode

orientiert sich stark an materialflussintensiven Produktionsanlagen. Weiter hin ist die Anzahl bzw. sind die Arten von Gelenken (Eng. Joints) und Bedingungen (Eng. Constraints) zur eine korrekten physikbasierten Simulation für die Industrie von großer Bedeutung [9]. Dies bezieht sich hauptsächlich auf die Simulationen von komplexen Montageanlagen.

Wie die Anzahl dieser Joints bzw. Constraints in den verschiedenen Physik-Engines sich auf die Stabilität bzw. Rechenzeit auswirkt wird in [5] vorgestellt. In der Regel werden in automatisierten Montageanlagen nicht nur einfache Kinematiken abgebildet, wie z. B. eine Translationsbewegung, sondern auch mehrere voneinander abhängige Kinematiken. Eine genauere Betrachtung dieser Kinematiken wird in [6] durchgeführt. Weiterhin sind neben den Rotations-, Translations- und Kugelgelenken weitere Kinematik-Typen, wie z. B. Kurven-Kurven Verbindungen vorhanden [7]. Einige bekanntere Physik-Engines sind u. a. Bullet, NVIDIA, Havok, ODE, etc. [5]. Basierend auf den Physik-Engines aus der Computerspielebranche wurden eigenständige Physik-tools entwickelt. Zwei davon sind industrialPhysics (Bullet) und V-Rep (Bullet, ODE).

3.2 Mehrkörpersysteme

Sobald zwei oder mehrere Körper durch Joints und Constraints (Koppelemente[9]) in einer gewissen kinematischen Abhängigkeit zu einander stehen kann dieses System als ein Mehrkörpersystem und die Simulation als eine Mehrkörpersimulation bezeichnet werden. In [9] wird das Mehrkörpersystem auch als ein Modell bezeichnet, das die Bewegung eines realen Objektes in der Simulation reproduziert. Dabei wird nicht nur die Bewegung (Kinematik) sondern auch die dafür benötigten bzw. daraus resultierenden Kräfte berücksichtigt (Dynamik). Eine weitere Unterteilung wird in [9] gemacht, welche wiederum nicht nur die Kinematik und Dynamik der Objekte sondern auch deren Festigkeit berücksichtigt. Einige Anwendungsbeispiele der Mehrkörpersimulation mit flexiblen Objekten (FEM) werden in [11] und [12] vorgestellt. Speziell dafür entwickelte IT-Tools sind z. B. SIMPACK, RecurDyn, etc.. Diese werden im Weiteren als MKS-Tools bezeichnet.

3.3 Digitale Absicherung von automatisierten Montageanlagen

3.3.1 Unterstützung bei der mechanischen Konstruktion

In [2] wird ein Konzept vorgestellt das mit Hilfe eines physikalischen Modells die Entwicklung von Produktionsanlagen unterstützen soll. Dabei liegt der Fokus dieser Arbeit auf den Produktionsanlagen, in denen Fördertechnik

im Vordergrund steht. Die Problematik bei solchen Produktionsanlagen liegt darin, dass ein enormer Aufwand zur Darstellung komplexerer Förderprozesse in der Simulation entsteht. Darüber hinaus ist die realitätstreue solcher Simulationen nur begrenzt gegeben. Außerdem werden hauptsächlich nur starre Komponenten betrachtet. Dabei werden sowohl Kinematik und Dynamik als auch die Reibung zwischen den Komponenten mit Hilfe von den Physik-Engines simuliert.

3.3.2 Absicherung von biegeschlaffen Komponenten in Montageanlagen

Biegeschlaffe Komponenten werden sowohl während der mechanischen Absicherung als auch während der Virtuellen Inbetriebnahmen bis heute nicht behandelt. Grund dafür ist die Einzelfertigung von automatisierten Montageanlagen. Das bedeutet dass solche Anlagen nach Kundenwunsch entwickelt und produziert werden und somit in aller Regel Unikate sind. Zusätzlich ist der Modellierungsaufwand von Kabeln und Schläuchen enorm groß, wodurch sich eine digitale Absicherung wirtschaftlich nicht lohnen würde. Es wäre denkbar und sinnvoll eine automatisierte Kabel- bzw. Schlauchverlegung für die Montageanlagen zu entwickeln um den Modellierungsaufwand zu verringern.

3.3.3 Virtuelle Inbetriebnahme

In [1] wird die Virtuelle Inbetriebnahme als eine Methode zur Absicherung der Steuerungstechnik noch vor der realen Inbetriebnahme vorgestellt. Um die Virtuelle Inbetriebnahme durchzuführen wird ein Modell der Anlage benötigt, das als mechatronisches Anlagenmodell bezeichnet wird. Dieses Modell wird in ein erweitertes 3D-Geometriemodell und in ein Verhaltensmodell eingeteilt. Erfolgreiche Versuche zur Simulation des physikalischen Verhaltens in einer Produktionsanlage mit Hilfe von Physik-Engines, während der Virtuellen Inbetriebnahme, werden in [2] und [3] vorgestellt. Diese Funktionalität wird z. B von dem Physiktool industrialPhysics (Bullet) unterstützt.

4 Simulation des physikalischen Verhaltens bei der digitalen Absicherung von automatisierten Montageanlagen

4.1 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept wird in drei Schritte eingeteilt. Im ersten Schritt wird das physikbasierte Anlagenmodell erstellt, das in [13] detailliert beschrieben

ist. Im zweiten Schritt wird anhand des physikbasierten Simulationsmodells die physikbasierte, mechanische Absicherung durchgeführt. Im dritten und letzten Schritt des Konzeptes wird die Virtuelle Inbetriebnahme mit dem physikbasierten Anlagenmodell durchgeführt.

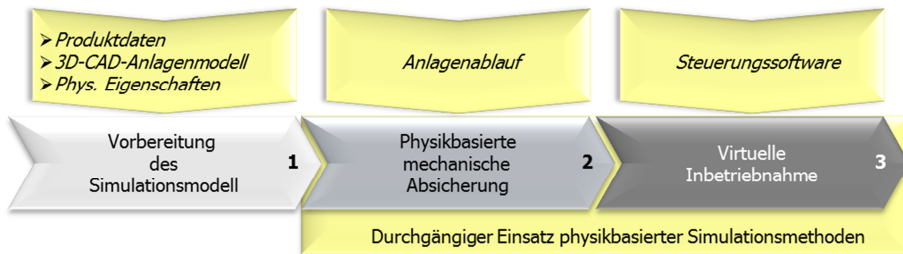


Bild 1: Gesamtkonzept

In Rahmen dieses Beitrages wird auf den zweiten Schritt des Konzeptes tiefer eingegangen. Des Weiteren wird die Rollenbasierte Anlagenentwicklung, die bereits in [13] erläutert wurde, an einer konkreten Umsetzung vorgeführt.

4.2 Mechanische Absicherung von automatisierten Montageanlagen mit physikbasierten Simulationen

Die physikbasierte, mechanische Absicherung wird in folgende Schritte unterteilt (Bild 2):

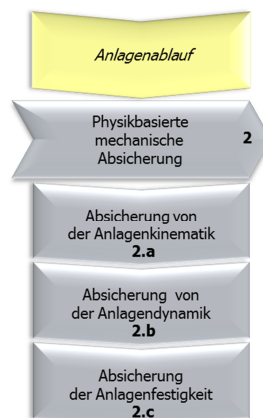


Bild 2: Unterpunkte der physikbasierten mechanischen Absicherung

1. Absicherung der Anlagenkinematik

In diesem Schritt wird die Anlagenkinematik behandelt. Es werden alle gewollten bzw. nicht gewollten Kinematiken überprüft. Dabei wird untersucht ob die gewünschten Anfahrpositionen unter Berücksichtigung der Begrenzungen, die sich von der Konstruktion ergeben, erreichbar sind.

2. Absicherung der Anlagendynamik

Im zweiten Schritt werden alle relevanten dynamischen Größen (wie z. B. Trägheitskräfte, Reibung, etc.), basierend auf der Anlagenkinematik und hinsichtlich der Absicherung, betrachtet. Ziel ist es zu überprüfen ob die eingesetzten Antriebe (bedingt durch die wirkenden Kräfte) die gewollten Anfahrpositionen ansteuern können. Als Beispiel sei hier ein Pneumatik-Zylinder genannt.

3. Absicherung der Anlagenfestigkeit

Im diesem Schritt werden auf Basis der bisherigen Betrachtungen (Kinematik und Dynamik) die Deformationen der einzelnen Bauteile berücksichtigt (Festigkeit). Dabei sind die Bauteile die für die jeweilige Montageanlage konstruiert wurden von besonderem Interesse. Diese werden im weiterem als Tragstrukturen bezeichnet.








5 Rollenbasierte Anlagenentwicklung

Die Grundidee ist es anhand von vordefinierten Rollen, die nicht direkt von der Geometrie abhängen, verschiedene Eigenschaften bzw. Informationen abzuleiten. Auf diese Weise wird das generieren von verschiedenen Simulationsmodellen anhand dieser Rollen automatisiert. Die Interpretation von den Rollen für das Erstellen des jeweiligen Simulationsmodells muss gegeben sein (Tabelle 2). Dabei können die Rollen in zwei Gruppen eingeteilt werden: Hauptrollen und Zusatzrollen (Tabelle 1).

1. Die **Hauptrollen** bestimmen die Kinematik des Objektes in der Simulation. Teilweise können diese auch je nach Interpretation die Dynamik der Objekte vorgeben. Dies wäre der Fall wenn den Objekten keine Zusatzrollen zugeordnet wurden.
2. Die **Zusatzrollen** haben die Aufgabe zusätzliche Eigenschaften an das Geometriemodell zu vergeben. Sie werden benötigt um die Objekte

bestimmter Simulationsmodelle bei erzeugen der Modelle korrekt zu interpretieren. Die Rolle „Sensor“ z. B. wird beim erzeugen des Simulationsmodells für die Virtuelle Inbetriebnahme benötigt, damit das Objekt später auch als Sensor erkannt wird.

Tabelle 1: Rollenübersicht

Hauptrollen	Zeichen	Beispiel
Antrieb		Pneumatikzylinder mit Kinematik
Beweglich		Kolben
Fest		Zylinder
Zusatzrollen		
Sensor		Induktivsensor
Tragstruktur		Befestigungsplatte
Verbindungselement		Schrauben, Muttern etc.
Maschinenelement		Feder, Dämpfer etc.

Jede Konstellation zwischen den Hauptrollen „Beweglich“ und „Fest“ in Kombination mit den Zusatzrollen ist möglich. Zu beachten ist hier dass die Zusatzrollen abhängig vom Anwendungsfall erweitert werden können. Zusätzlich zu den Rollen muss auch eine Gruppenzuweisung durchgeführt werden. Diese Gruppen haben jeweils einen eigenen Knoten: „Antrieb“, „Beweglich“ und „Fest“. Darunter können mehrere Bauteile angehängt werden.

Die Rollenzuweisung bei Standardbauteilen, wie z. B. Schrauben, sollte im Idealfall einmalig gemacht werden. Sobald der Konstrukteur ein Bauteil zu einer bestimmten Baugruppe hinzufügt wird die Rolle des Bauteils mit übernommen. Diese einmalig definierte Rolle wird beim Start des Makros erkannt und angezeigt. Nun muss der Konstrukteur nur noch das Bauteil der jeweiligen Gruppe zuordnen. Alle anderen Informationen wie z. B. Position, Orientierung, Masse, Volumen, etc. werden direkt von dem CAD-Tool (in diesem Beispiel CATIA V5) übernommen. Ein weiterer Vorteil ist die Unabhängigkeit zwischen der Baumstruktur des Konstruktionsmodells und der des Simulationsmodells, die sich in aller Regel von einander unterscheiden. Basierend auf diese Methode wurde eine prototypische Umsetzung mit VBA in CATIA V5 R19 erstellt (Bild 3).

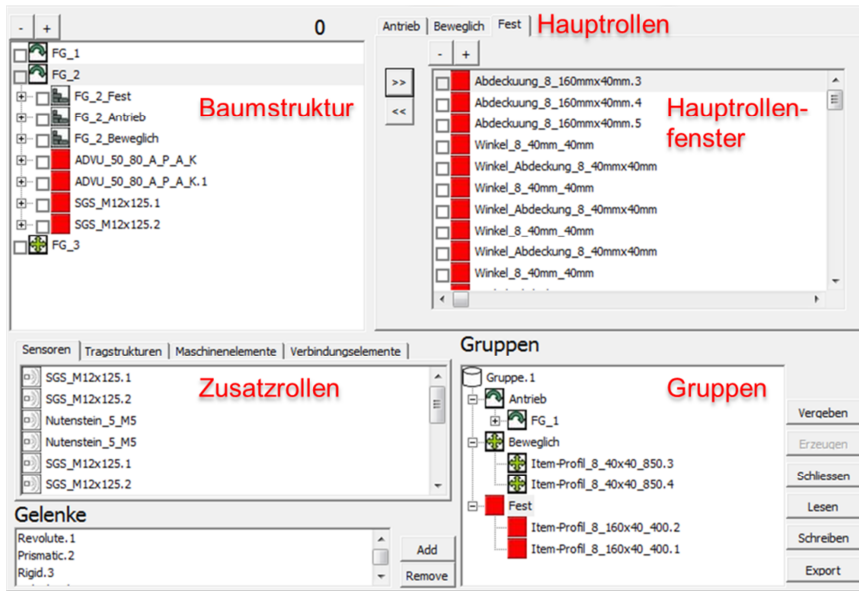









Bild 3: Übersicht auf die GUI zur Rollenvergabe in CATIA V5 (VBA)

Tabelle 2: Interpretation der Rollen für die verschiedenen Simulationsmodelle

Hauptrollen				
Schritt 2 (Bild 2)	<i>übernehmen der Kinematik, keine Geometrie</i>	<i>phys. Eigen- schaften, Kollisionsre- levant, Beweglich</i>	<i>phys. Eigen- schaften, Kollisionsre- levant, Fest</i>	
Schritt 3 (Bild 2)	<i>übernehmen der Kinematik, keine Geometrie</i>	<i>phys. Eigen- schaften, Kollisionsre- levant, Beweglich</i>	<i>phys. Eigen- schaften, Kollisionsre- levant, Fest</i>	
Zusatzrollen				
Schritt 2 (Bild 2)	<i>nicht relevant</i>	<i>Finite- Elementen- Modell</i>	<i>Finite- Elementen- Modell</i>	<i>Phys. Verhalten</i>
Schritt 3 (Bild 2)	<i>Sensorelement</i>	<i>Nicht relevant</i>	<i>Nicht Kollisionsre- levant</i>	<i>Phys. Verhalten</i>

6 Umsetzung an Beispiel einer automatisierten Montageanlage

Die Umsetzung wird an einer automatisierten Montageanlage, angetrieben durch Pneumatikzylinder, durchgeführt (Bild 4).

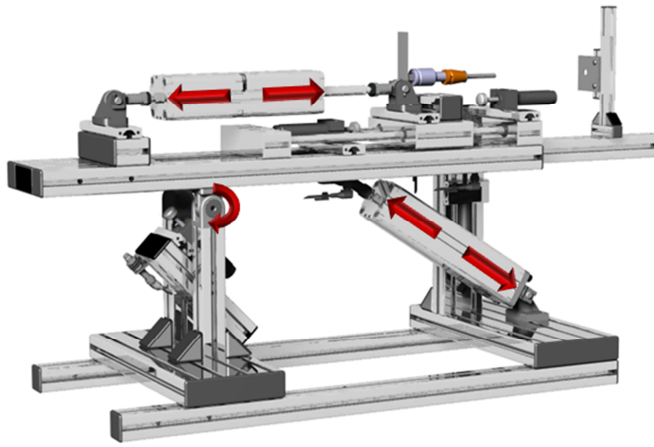


Bild 4: Das Konstruktionsmodell der Pneumatikstation

Bereits vor dem Konstruieren wurden alle Bauteile (z. B. Schrauben, Profile etc.) mit Zusatzrollen versehen. Einzig und allein die Zuweisung der Hauptrollen zu den Bauteilen musste dazu noch erfolgen. Anschließend müssen die Bauteile den Gruppen zugewiesen werden. Der zusätzliche Aufwand, der damit entstanden ist, beträgt ca. 20 Minuten. Zu guter Letzt wird das Simulationsmodell für die physikbasierte, mechanische Anlagenabsicherung automatisch erzeugt (Dauer ca. 3 Minuten für 124 Bauteile). Das Konzept wurde mit Hilfe eines MKS-Tools und einem Physik-Tool durchgeführt (RecurDyn in NX und Bullet in V-Rep). Dafür wurden zwei verschiedene Modelle benötigt, die aus den Rollen und Gruppen abgeleitet werden konnten (nicht komplett automatisiert). Die gewonnenen Erkenntnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Vergleich zwischen dem MKS-Tool NX (RecurDyn) und das Physik-tool V-Rep (Bullet)

	MKS-Tool NX (RecurDyn)	Physik-Tool V-Rep (Bullet)
Kollisionserkennung	<i>konkave und konvexe Geometrie</i>	<i>nur konvexe Geometrie</i>
Berechnungsart	<i>wird erst berechnet</i>	<i>mit Beginn der Simulation</i>
Berechnungsdauer	<i>stark abhängig von der Anzahl der betrachteten Kollisionen</i>	<i>in Echtzeit (10ms)</i>
Simulation von Maschinenelementen	<i>möglich (z. B. Federn, Dämpfer)</i>	<i>möglich (z. B. Federn, Dämpfer)</i>
Interaktion mit dem Simulationsmodell	<i>ist möglich, Ergebnis erst nach neuer Berechnung sichtbar</i>	<i>ist möglich, Ergebnis sofort sichtbar</i>
Absicherung der Anlagenkinematik	<i>möglich</i>	<i>möglich</i>
Absicherung der Anlagendynamik	<i>möglich</i>	<i>möglich</i>
Absicherung der Anlagenfestigkeit	<i>möglich</i>	<i>nicht möglich</i>

Durch ableiten der konvexen 3D-Geometriemodelle aus der originalen konkaven Geometrie, das durch die Physik-Engine [4] geschieht, entsteht eine Verfälschung der Kollisionserkennung und somit entsteht ein falsches Gesamtergebnis im Physiktool. Außerdem sind die Joints bzw. Constraints bei größerer Beschleunigung nicht stabil genug und brechen in der Physiksimulation einfach durch. Weiterhin sind die Einstellparameter in den Physiktools nicht direkt von den Materialeigenschaften konvertierbar, Bsp.: Die Steifigkeit für die Kollisionsbehandlung in V-Rep (Bullet) kann von 0 bis 1 angegeben werden. In NX (RecurDyn) wiederum kann die Steifigkeit direkt von den Materialeigenschaften übernommen werden. Ein weiterer Nachteil von Physik-Engines ist die fehlende Möglichkeit die Festigkeit von Bauteilen zu simulieren. Andererseits sind die Physik-Engines im Vergleich zu den MKS-Tool deutlich schneller was die Rechenzeit angeht.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In Rahmen dieses Beitrages wird das Konzept einer physikbasierten, mechanischen Anlagenabsicherung vorgestellt. Außerdem wird ein Vergleich zwischen zwei IT-Werkzeugen mit unterschiedlichen Berechnungsarten gemacht. Ziel ist es die Möglichkeiten und Grenzen als auch die Eignung für die physikbasierte, mechanische Absicherung dieser IT-Werkzeuge aufzuzeigen. Der Vergleich findet zwischen einem MKS-Tools (NX mit RecurDyn) und einem Physik-Tool (V-Rep mit Bullet) statt. Des Weiteren wird die Rollenbasierte Anlagenentwicklung anhand einer prototypischen Umsetzung mit CATIA V5 VBA (Visual Basic for Applications) erläutert. Ein weiteres Ziel ist es aufzuzeigen, dass die auf Physik-Engines basierenden Physik-Tools sich für die physikbasierte, mechanische Anlagenabsicherung eignen.

Dabei besteht Optimierungsbedarf bei den folgenden Punkten:

1. Verwendung von konkaven 3D-Geometrien für die Kollisionserkennung bzw. -behandlung
2. Simulation der Anlagenfestigkeit
3. Stabilität der Joints bei größeren Belastungen
4. Bestimmung der Aussagekraft der physikbasierten Simulation

Literatur

- [1] Zäh, M.; Wunsch, G.: "Schnelle Inbetriebnahme von Produktionssystemen", Werkstattstechnik 95 H. 9, S. 699-704, 2005
- [2] Spitzweg, M.: „Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen“, Dissertation, 2009
- [3] Reinhard, G.; Lacour, F., Physikbasierte mechanische Simulation materialflussintensiver Produktionsanlagen, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (IWB), Uni München, 2010

-
- [4] Coumans, E.: "Bullet 2.80 Physics SDK Manual", 17.07.2012 (http://www.bulletphysics.com/ftp/pub/test/physics/Bullet_User_Manual.pdf)
- [5] Boeing, A.; Bräunl, T.: "Evaluation of real-time physics simulation systems", School of Electrical, Electronic and Computer Engineering University of Western Australia, Proceedings of the 5th international conference on computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia
- [6] Song, P.: "Modeling, analysis and simulation of multibody systems with contact and friction", Dissertation in mechanical engineering and applied mechanics, University of Pennsylvania, 2002
- [7] Lee, S.; Terzopoulos, D.: "Spline joints for multibody dynamics", ACM Trans, 2008
- [8] Eberly, D.H.: "Game Physics", Morgan Kaufmann Publishers, 2004
- [9] Vajna, S.; Weber, Chr.; Bley, H.; Zeman, K.: „CAx für Ingenieure“, Auflage 2, Springerverlag, 2008
- [10] Bremer, H.; Pfeiffer, F.; „Elastische Mehrkörpersysteme“, Stuttgart, 1992
- [11] Schaeffer, T.; Paule, M.; Świdergał, K.: „MKS mit nachgiebigen Bauteilen- Optimierung eines Leitungsschutzschalters“, GT-Kolloquium, Aachen, 2009
- [12] Heckmann, A.: „Modelling and Simulation of Rigid and Flexible Multibody Systems in Modelica“, Tutorial at the Modelica'2011 Conference, Dresden, 2011
- [13] Strahilov, A.: "Development of the physics-based assembly system model for the mechatronic validation of automated assembly Systems", Winter Simulation Conference (WSC), Berlin, 2012

Möglichkeiten der Informationsvisualisierung in der Montageabsicherung

Rainer Späth¹, Miriam Hesse¹, Andreas Kohn²

¹ *BMW Group*

² *Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München*

The product development process in the automotive industry comprises a large number of interdisciplinary actors. This results in very complex communication situations, with a large variety of information sources, storage and transfer methods, thus leading to media breaks, which may complicate the information transfer process. An example is the representation of part geometries as three-dimensional CAD visualizations. Additional information, for example assembly sequences or simulation results, are generally available in different formats (e.g. text documents). This paper presents a solution to bridge the gap between geometric representations (in CAD systems) and other information types. In a case study at a German car manufacturer, assembly validation processes as part of the product development serve as a basis to create a visualization concept.

1 Ausgangssituation, Problemstellung und Aufbau des Beitrags

Der Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie umfasst eine große Anzahl von Akteuren, die interdisziplinär zusammenarbeiten. Dadurch ergeben sich eine sehr komplexe Kommunikationssituation und eine starke Heterogenität von Informationsquellen, -speichern und -transferwegen [1]. Eine Beeinträchtigung der erforderlichen Informationsverfügbarkeit und Informationsvermittlung ist die Folge. Dies kann sich negativ auf den Produktentwicklungsprozess auswirken, da ein ausreichender Informationsstand die Voraussetzung für die Effektivität der Entwicklungsschritte ist [2]. Dieser Bei-

trag fokussiert die Unterstützung der Informationsvermittlung in der Montageabsicherung als Teilschritt der Produktentwicklung. Eine Möglichkeit zur Überwindung der Heterogenität der Informationsquellen im Kontext der Montageabsicherung ist die Repräsentation von Informationen an Bauteil- bzw. Produktgeometrie in CAD-Systemen. Denn während für die Absicherung erforderliche Informationen über die geometrischen Bauteilabmessungen direkt in CAD-System vorliegen, liegen zusätzlich wichtige Informationen bezüglich z.B. Montagereihenfolge oder Simulationsergebnissen in der Regel in anderer Form vor (z.B. als Textdokumente). Durch diese Heterogenität der Informationsquellen entstehen an vielen Stellen Medienbrüche, die eine notwendige Informationsübertragung erschweren können. Ein Beispiel hierfür ist der Medienbruch zwischen digital vorhandenen Geometrieinformationen in CAD-Systemen und physischen Bauteilen. Im Kontext der Montageabsicherung spielt dies eine besondere Rolle, da die Montageabsicherung oftmals an physischen Prototypen erfolgt, während die erforderlichen geometrischen Informationen in CAD-Systemen enthalten sind. In diesem Beitrag wird eine Lösung für die Überwindung des Bruchs zwischen Geometriedarstellungen und anderen Informationsspeichern am Beispiel des Prozesses der Montageabsicherung der Serienfahrzeugentwicklung vorgestellt. Als vielversprechender Ansatz werden hierbei die Technologien virtuelle Realität (VR) und erweiterte Realität („augmented reality“ – AR) betrachtet.

Der Aufbau des Beitrags orientiert sich an den zur Erarbeitung der Ergebnisse durchgeführten wesentlichen Teilschritten. Zunächst werden die erforderlichen Grundlagen in Bezug auf Absicherungsmethoden, Informationsbedarf und Visualisierungstechniken als Resultat einer Literaturrecherche vorgestellt. Der Montageabsicherungsprozess der BMW Group und die daran beteiligten Abteilungen dienen als Anwendungs- und Evaluationsbeispiel. In einem zweistufigen Verfahren werden basierend auf strukturierten Interviews mit ausgewählten Mitarbeitern einzelner Abteilungen und einer Analyse der Absicherungsprozesse die benötigten Informationsarten identifiziert und durch Mitarbeiterbefragungen priorisiert. Techniken der Visualisierung (AR und VR) werden bezüglich ihrer Eignung zur Darstellung dieser Informationen auf die Produktgeometrie und damit der Überwindung des oben beschriebenen Medienbruchs bewertet. Als Ergebnis wird ein System zur gleichzeitigen, geometriebezogenen Visualisierung vorgeschlagen und evaluiert. Da Informationen als Daten in einem bestimmten Kontext definiert werden können (vgl. [3]), und in diesem Beitrag alle Betrachtungen im Kontext der Absicherung ange stellt werden, steht die Differenzierung zwischen den beiden Begriffen „Daten“ und „Information“ hier nicht im Fokus.

2 Grundlagen Absicherung, Informationsbedarf und Visualisierung

2.1 Absicherungsmethoden

Die Absicherung der Montierbarkeit umfasst zahlreiche Methoden, die auf verschiedenen Technologien basieren und verschiedene Produkt- und/oder Prozesseigenschaften absichern [4]. In der Literatur werden verschiedene Absicherungsmethoden vorgestellt [5]. Ziel einer solchen Methode ist die Bestätigung der Umsetzbarkeit einer Konstruktion bzw. der Identifikation von Problemen hinsichtlich effizienter Montierbarkeit. Ein Problem ist hier als Unstimmigkeit zwischen Produkt und Produktionssystem zu verstehen, die eine störungsfreie Montage verhindert oder erschwert. Es gilt, diese Probleme frühzeitig zu detektieren und die Bewertungsergebnisse an die Konstrukteure zurückzugeben. Die eingesetzten Methoden zur Problemdetektion basieren auf der Bewertung verschiedener Modelle des Absicherungsumfangs. Diese können in drei Modelltypen unterschieden werden: virtuelle Repräsentationen (virtuelle Mock-Ups), physische Modelle und Kombinationen beider Modellarten (Augmented Reality) [4]. Anhand dieser Modelle werden wichtige Informationen für Produktentwicklungsentscheidungen gewonnen.

2.2 Informationsbedarf

Informationen stellen die Grundlage aller Entscheidungsprozesse dar. Der dafür erforderliche Informationsbedarf wird durch die „[...] Art, Menge und Beschaffenheit von Informationen definiert, die ein Entscheidungsträger für die Erfüllung seiner Aufgabe benötigt [...]“ [6]. Es wird dabei zwischen objektivem und subjektivem Informationsbedarf unterschieden. Der objektive Informationsbedarf beschreibt den Bedarf an Informationen, der resultierend aus der Gestaltung und Strukturierung der Aufgabe erforderlich ist, die in einem sachlichen Zusammenhang zur Lösung eines Problems stehen. Er wird in erster Linie durch die Entscheidungsaufgabe festgelegt und basiert auf den Kontextfaktoren (z.B. Marktgegebenheiten, Aufgabenbeschreibung) der Entscheidung. Den subjektiven Informationsbedarf bilden die Informationen, die der jeweilige Entscheidungsträger zur Lösung seiner Aufgaben als erforderlich empfindet [7]. Er hängt stark von dessen individueller Einschätzung der Entscheidungssituation ab. Objektiver und subjektiver Informationsbedarf können von einander abweichen. Dabei ist die Erfüllung des subjektiven Informationsbedarfs entscheidend für die Akzeptanz der Informationen seitens der Entscheidungsträger und folglich dafür, ob eine Entscheidung getroffen wird oder nicht. Oft wird nur ein Teil des Informationsbedarfs explizit nachgefragt (vgl. [7]). Durch die Befriedigung der Informationsnachfrage wird ein spezifischer Informationsstand bei dem Entscheider erzeugt. Wie vollständig die

Informationsnachfrage gedeckt werden kann ist vom verfügbaren Informationsangebot abhängig. Durch die Entwicklungen der Informationstechnik ist die Verfügbarkeit und Speicherung von Information wesentlich erleichtert worden. Die Herausforderung liegt aktuell vielmehr darin, die verfügbaren Informationen zu strukturieren, zu filtern und effizient bereitzustellen. Dabei soll das Informationsangebot auf einen Umfang reduziert werden, der durch den Entscheider verarbeitet werden kann und die Entscheidung bestmöglich unterstützt. Eine Strukturierung kann über eine Klassifikation des Informationsbedarfes mit Hilfe verschiedener Attribute wie beispielsweise Adressat, Zielsetzung der Entscheidung, Informationsart, Qualität, Menge, Sicht, Zeitpunkt, Ort und Medium erfolgen [8]. Der Informationsbedarf kann über eine Informationsbedarfsanalyse ermittelt werden. Dabei wird der aktuell und zukünftig benötigte Informationsbedarf zur Erfüllung einer Aufgabe erfasst.

2.3 Visualisierung von Informationen

Die Möglichkeiten der Bereitstellung der benötigten Informationen sind vielfältig. Die wichtigste Informationsdarstellungsform ist die visuelle, da der Mensch einen Großteil der Informationen über visuelle Reize aufnimmt [9]. Unter Visualisierung ist im Allgemeinen eine „[...] rechnergestützte visuelle Präsentation von Daten, Informationen und Wissen in einer für den Menschen adäquaten und für die jeweilige Anwendung in diesem Kontext sinnvollen Form zu verstehen“ [10]. Etwas zu visualisieren bedeutet also etwas optisch so zu betonen und herauszustellen, dass dadurch Aufmerksamkeit erregt oder ein komplexer Sachverhalt verständlich dargestellt wird. Dabei müssen grundlegende Anforderungen an eine Visualisierung bezüglich Qualität, Effektivität, Expressivität und Angemessenheit erfüllt werden [10]. Bei Informationen mit örtlichem Bezug (hier Bauteilbezug oder 3d-Koordinate) kann die lagerichtige Visualisierung Vorteile für die Verarbeitung durch den Menschen bringen.

Es existieren verschiedene Faktoren, die eine Visualisierung beeinflussen [10]. Den größten Einfluss haben dabei die zugrundeliegenden Daten und deren Eigenschaften, weshalb diese hier betrachtet werden. Dabei sind *Dimensionalität*, *Wertebereich* und das *Datenformat* von besonderer Bedeutung. Die Dimensionalität der Daten wird von der Zahl der Merkmale in einem bestimmten Beobachtungspunkt bestimmt. Univariate Daten besitzen pro Beobachtungspunkt nur ein Merkmal mit einer Ausprägung, multivariate Daten besitzen mehrere Merkmale [10]. Für die Visualisierung multivariater Daten eignet sich die Textform besser als z.B. die symbolhafte Darstellung. Desweiteren können Merkmale entsprechend ihres Wertebereiches als *qualitativ* oder *quantitativ* klassifiziert werden. Qualitative Merkmale verwenden nicht-metrische Skalen, die lediglich eine Aussage über Gleichheit- oder Ungleich-

heit (nominal) sowie bei vorhandener Ordnungsrelation auch Richtung (ordinal) verschiedener Ausprägungen zulassen. Bei einer Visualisierung muss berücksichtigt werden, dass nicht alle visuellen Variablen (Darstellungsformen von Daten) für jeden Datentyp geeignet sind. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die Eignung der visuellen Variablen für die verschiedenen Datentypen.

Effektivität	Quantitativ	Ordinal	Nominal
	Position	Position	Position
	Länge	Helligkeit	Farbton
	Winkel	Sättigung	Textur
	Orientierung	Farbton	Verbindung
	Fläche	Textur	Umfassung
	Volumen	Verbindung	Helligkeit
	Helligkeit	Umfassung	Sättigung
	Sättigung	Länge	Form
	Farbton	Winkel	Länge
	Textur	Orientierung	Winkel
	Verbindung	Fläche	Orientierung
	Umfassung	Volumen	Fläche
	Form	Form	Volumen

Abbildung 1: Bewertung der Effektivität grafischer Variablen und Attribute zur Visualisierung von Daten bezüglich der Datenart [11]. Die grau dargestellten Variablen sind für den jeweiligen Datentyp ungeeignet.

Als Visualisierungsmedien existiert eine Vielzahl technischer Lösungen, die zur Darstellung einer Visualisierung und Interaktion mit dieser geeignet sind. Die verschiedenen Ein- und Ausgabegeräte unterscheiden sich dabei in Größe, Gewicht, Leistung und Kosten erheblich und sind somit anwendungsspezifisch auszuwählen. Als Ausgabegeräte für eine computergestützte Visualisierung eignen sich zum Beispiel 2D/3D-Monitore, Tablet-PCs, Smartphones, Head-Mounted-Displays, CAVEs oder Projektionen. Als Eingabegeräte sind unter anderem 2D/3D-Mäuse, Flysticks, Datenhandschuhe und Tracking zu nennen.

3 Informationsbedarfsanalyse und Informationspriorisierung

Als Basis für die Konzeption eines Systems für die effiziente Informationsbereitstellung zur Unterstützung der Absicherungsarbeit wurde zunächst eine Informationsbedarfsanalyse in Abteilungen der Montageabsicherung der BMW Group durchgeführt. Die potentielle Nutzergruppe des Systems wurde hierfür zunächst im Rahmen einer Organisationsanalyse ermittelt. Darauf aufbauend

wurde in einer induktiven Analyse über Interviews mit ausgewählten Mitarbeitern der Absicherung der subjektive Informationsbedarf ermittelt. Gegenstand der Befragung waren die jeweiligen Hauptaufgaben, die dazu verwendeten Systeme und Datenbanken sowie der zur Erfüllung der Aufgaben notwendige Informationsbedarf. Zur Ermittlung des objektiven Informationsbedarfs wurde parallel dazu eine deduktive Analyse der Absicherungsprozesse durchgeführt. Darin wurden die Ziele und Aufgaben der Montageabsicherung, sowie die dafür existierenden Methoden auf den benötigten Informationsbedarf untersucht.

Zur Auswahl der relevanten und visualisierbaren Informationen wurden die aus deduktiver und induktiver Analyse identifizierten Informationen in einem nächsten Schritt anhand der Aspekte Datenmerkmale und Datenqualität klassifiziert. Um die vorliegende Informationsmenge nach ihrer Relevanz zu priorisieren wurde die Wichtigkeit der ermittelten Informationen für die Montageabsicherung bei den an der Absicherung beteiligten Mitarbeitern in Form eines Fragebogens abgefragt. Die Umfragebeteiligung lag dabei bei 21%. Anhand der Befragung der Mitarbeiter konnten diejenigen Informationen identifiziert werden, die eine übergeordnete Rolle im Absicherungsprozess einnehmen und zusätzlich für eine Visualisierung an der Fahrzeuggeometrie sinnvoll sind. Die Datenmerkmale wurden nach den im vorherigen Kapitel beschriebenen Aspekten klassifiziert, um sie dann für eine mögliche Visualisierung zu bewerten. Eine Schwierigkeit bei der Informationsbereitstellung in Entwicklungsprozessen liegt in der Darstellung von geometriebezogenen Informationen, da zur Visualisierung dieser Informationen ein Bauteilbezug in Form einer Sachnummer (SN) oder Koordinate existieren muss. Des Weiteren ist entscheidend, wo die Daten innerhalb des Unternehmensnetzwerkes abgelegt sind. Hier ist eine zentrale Speicherung der Daten für einen vereinfachten Zugang erforderlich. Abbildung 2 zeigt einen Auszug der Klassifizierung der ermittelten Informationsmenge anhand der hier vorgestellten Klassifizierungsaspekte.

Information	Merkmale			Datenqualität		Inf.- nachfrage durch MA
	Dimensionali- tät	Werte- bereich	Daten- format	Speicher- ort	SN- Bezug	
CAD-Modelle	multivariat	quantitativ	jt,CATPart	zentral	ja	96
Montagereihenfolge	multivariat	ordinal	txt	zentral	ja	56
Toleranzen	multivariat	quantitativ	xls,jt,CAT- Part	dezentral	ja	52
Ansprechpartner	multivariat	nominal	txt, xls	zentral	ja	44
Messpunkte	multivariat	quantitativ	vrml, xls, i-	zentral	ja	44
Produkt-Problem- Meldungen	univariat	ordinal	txt	zentral	nein	40
Befestigungs- elemente	univariat	nominal	jpg, txt	zentral	ja	36
Fugenplan	univariat	quantitativ	xls,ppt	dezentral	nein	28

Abbildung 2: Klassifikation der Informationen (Auszug)

Anhand der vorliegenden Klassifizierung und Priorisierung der Informationsmenge können nun die Informationen ausgewählt werden, welche in der Software-Lösung des angestrebten Visualisierungs-Systems umgesetzt werden sollen. Für den ersten Konzeptvorschlag wurden nur Informationen berücksichtigt, die von mehr als 30% der Mitarbeiter nachgefragt wurden. Neben den CAD-Geometrien, die virtuelle Modelle der realen Fahrzeugkomponenten sind und bereits in diversen Visualisierungsprogrammen dargestellt werden, sind dies Montagereihenfolge, Toleranzen, Ansprechpartner sowie Messpunkte, Produkt-Problem-Meldungen und Befestigungselemente. Bei Informationen mit dezentralem Speicherort sowie fehlender exakter Bauteilzuordnung ist eine Visualisierung an der Fahrzeuggeometrie nur sehr schwer umsetzbar und wird daher im Rahmen dieses Beitrags nicht weiter betrachtet.

4 Informationsvisualisierung in der Montageabsicherung

Für die Visualisierung der identifizierten Informationen besteht eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten, die vor allem von den gegebenen Anwendungsfällen aber auch verschiedenen allgemeinen Anforderungen abhängig sind. Grundsätzlich kann (wie in Kapitel 2.1 beschrieben) zwischen verschiedenen Modellen der Montageabsicherung unterschieden werden, woraus sich unterschiedliche Anwendungsfälle der Informationsbereitstellung ergeben. Zusätzliche Informationen können dabei zum Einen rein virtuell und zum Anderen überlagert mit dem realen Objekt mit Hilfe von Augmented Reality (AR) dargestellt werden.

4.1 Anforderungen an die Informationsvisualisierung

Neben den bereits beschriebenen allgemeinen Anforderungen bezüglich Datenqualität und Zugänglichkeit zu den Daten, müssen weitere anwendungsspezifische Anforderungen an das zu erstellende Visualisierungssystem berücksichtigt werden. Dabei sind neben den allgemein zu berücksichtigenden Anforderungen an eine Software [12] und den in Kapitel 2.3 beschriebenen Anforderungen an eine Visualisierung vor allem die technischen Anforderungen des Anwendungsfalles von entscheidender Bedeutung (Abbildung 3).

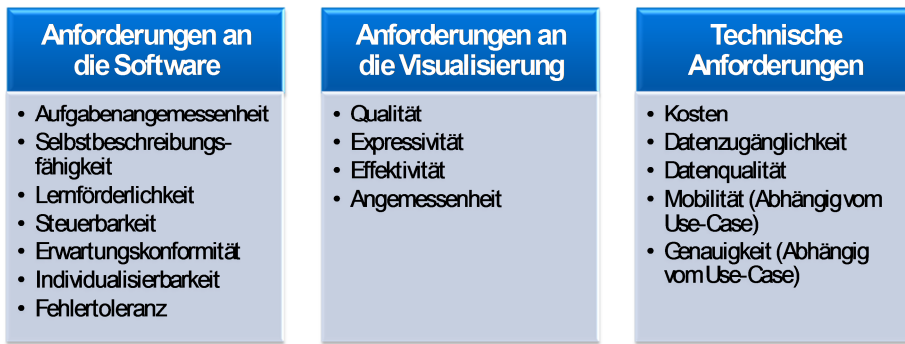


Abbildung 3: Anforderungen an das Visualisierungskonzept

Nachdem die Zugänglichkeit der Daten und eine ausreichende Datenqualität bereits als Ausschluss-Kriterien beschrieben wurden, ist auch der Kostenrahmen ein grundlegendes Auswahlkriterium. Darüber hinaus bestehen noch anwendungsspezifische Anforderungen an das Visualisierungskonzept. Bei einer rein virtuellen Absicherung besteht keine Anforderung an die Mobilität des Informationsbereitstellungssystems. Soll ein solches Visualisierungskonzept aber als Informationssystem während der Hardwareabsicherung dienen und ein Mitarbeiter der Absicherung dieses demnach mit sich führen, sind gewisse Forderungen bezüglich Gewicht und Größe des Systems (Mobilität) zu berücksichtigen. Ebenso ist die gewünschte Genauigkeit einer AR-Visualisierung bei einer Überlagerung mit der Realität ausschlaggebend für die technische Lösung.

4.2 Möglichkeiten der Informationsvisualisierung

Unter Berücksichtigung der beschriebenen Anforderungen und Anwendungsfälle können die unter Abschnitt 2.3 beschriebenen visualisierungstechnischen Mittel sowie bestehende technische Hardwarekomponenten für Tra-

cking, Ein- und Ausgabegeräte zu einem anwendungsspezifischen Visualisierungskonzept kombiniert werden. Abbildung 4 zeigt den Morphologischen Kasten mit einer Lösungskombination für das Beispiel der Messpunkte. Die einzelnen Lösungskonzepte unterscheiden sich dabei nur anhand der unterschiedlichen Auswahl von Hardwarekomponenten.

Teil-funktionen	Teillösungen							
	1	2	3	4	5	6	7	8
technische Lösung	AR-System mit mechanischem Tracking	AR-System mit optischem Tracking	AR-System ohne Tracking	VR-System (CAA)				
Ausgabegerät	HMD	Monitor	Tablet/Smartphone	Powerwall	CAVE	Projektion		
Eingabegerät	2D Eingabegerät (Maus/Tastatur)	Multi-Touch Display	Farboarm+2D Eingabegerät (Maus/Tastatur, Touchdisplay)	Datenhandschuh (3D)	Flystick (3D)	3D-Maus	Ringmouse	
Abbildungstechnik 1	Abbildung auf Position	Abbildung auf Größe	Abbildung auf Orientierung	Abbildung auf Struktur	Abbildung auf Form	Abbildung auf Farbe	Abbildung auf Textur	Text
Abbildungstechnik 2-n	Abbildung auf Position <i>Ort der Messung</i>	Abbildung auf Größe	Abbildung auf Orientierung	Abbildung auf Struktur	Abbildung auf Form	Abbildung auf Farbe	Abbildung auf Textur	Text
Interaktionstechnik 1	Übersicht und Detail	Fokus und Kontext	Geometrischer Zoom	Semantischer Zoom	Camera Movement	Level of Detail	Scrolling und Panning	Details on Demand
Interaktionstechnik 2-n	Übersicht und Detail	Fokus und Kontext	Geometrischer Zoom <i>Veränderung der Informationsfülle</i>	Semantischer Zoom	Camera Movement	Level of Detail	Scrolling und Panning	Details on Demand

Abbildung 4: Morphologischer Kasten zur Lösungsauswahl

4.3 Visualisierungskonzept für die ausgewählten Informationen

Je nach Anwendungsfall und damit verbundenen anwendungsspezifischen Anforderungen (siehe Kapitel 4.1) eignen sich andere Teillösungen für das Visualisierungssystem. Dies sollte so gestaltet sein, dass es für möglichst viele Anwendungsfälle verwendet werden kann. In Abhängigkeit der ausgewählten Information erscheinen, je nach Anwendungsfall, informationsspezifische Informationsicons auf den realen oder virtuellen Bauteilen. Im Folgenden soll die Umsetzung des in Abbildung 4 dargestellten Beispiels der Messpunkte erläutert werden. Bei Anklicken des Info-Icons für Messdaten werden die punktuellen Abweichungen eines vermessenen Ist-Standes des ausgewählten physischen Bauteils zum Soll-Stand (CAD-Geometrie) in Form von farbigen

Kugeln angezeigt. Abbildung 5 zeigt die Visualisierung der Messpunktdaten eines Blechteils dargestellt am realen Fahrzeug. Die Anzahl der Kugeln gibt dabei den Grad der Abweichung wieder, während die Farbe zeigt, ob die Abweichung noch innerhalb einer definierten Toleranzgrenze liegt (grün), oder nicht (rot). Die Richtung in der die Kugeln aneinandergereiht sind zeigt die Richtung der Abweichung im Fahrzeugkoordinatensystem an. Durch die Auswahl einer bestimmten Abweichung lässt sich das ausführliche Messprotokoll aufrufen (Details on Demand).

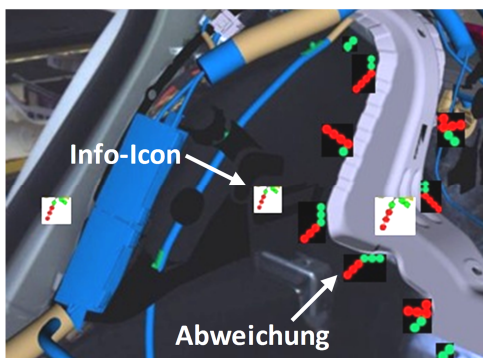


Abbildung 5: Visualisierung der Informationen über die Messpunkte

Eine Umsetzung des Visualisierungskonzeptes kann beispielsweise auf einem Tablet-PC/Smartphone als Augmented Reality ausgeführt werden. Durch Bewegen des Gerätes und somit der integrierten Kamera (Camera Movement) lässt sich der Bildausschnitt verändern und damit auch die Auswahl an angezeigten Informationen. Je nach Entfernung zum betrachteten Objekt verändert sich die Anzahl an dargestellten Informationen (geometrischer Zoom). Das anhand des Beispiels der Messpunkte vorgestellte Visualisierungskonzept ist in ähnlicher Weise für die übrigen Informationen umgesetzt. Da bei Informationen bezüglich der Montager Reihenfolge für die Absicherer vor allem von Interesse ist, welche Bauteile im Montageablauf bereits vorher verbaut wurden, werden hierbei alle vorher verbauten Bauteile visualisiert und alle anderen ausgeblendet. Als Zusatzinformation lässt sich die genaue Montagebeschreibung mit Montagezeiten und Montageort aufrufen. Bei Auswahl der Information „Ansprechpartner“ werden Zusatzinformationen wie Name, Telefonnummer, Email-Adresse, Abteilung und Foto des für das Bauteil zuständigen Konstrukteurs, Qualitätsingenieurs, sowie Absicherers angezeigt. Befestigungselemente werden über die entsprechenden Icons positionsgenau angezeigt und bieten bei Bedarf zusätzliche Informationen wie Sachnummer und Beschreibung.



5 Evaluation des Lösungskonzepts

Die erste Evaluation des in Kapitel 4.3 vorgestellten Visualisierungskonzeptes wurde gemeinsam mit Mitarbeitern der Absicherungsabteilung durchgeführt. Dazu wurde der Konzeptentwurf mit einem „Klick“-Dummy umgesetzt. Zusammen mit den Experten wurde das Konzept durchgesprochen und auf mögliche Verbesserungspotentiale untersucht. Mit einem Evaluierungsfragebogen wurden der generelle Nutzen, die Informationsauswahl sowie die allgemeine Gestaltung und Bedienung des Visualisierungssystems bewertet. Daraus wurde in erster Linie ersichtlich, dass ein solches Lösungskonzept für eine geometriebezogene Visualisierung als sinnvolle Ergänzung bestehender Systeme anzusehen ist und die Absicherungsarbeit aufgrund der schnellen und einfachen Informationsbereitstellung unterstützen würde. Mit den ermittelten Informationen wird der wesentliche Informationsbedarf voll abgedeckt. Zudem ist der Aufbau der Software einfach und übersichtlich gestaltet und auf die Anforderungen der täglichen Arbeit zugeschnitten.

6 Diskussion und Ausblick

Durchgängigkeit und Verfügbarkeit von Informationen stellen zentrale Erfolgsfaktoren in der Produktentwicklung dar. Der vorliegende Beitrag zeigt ein Konzept zur Unterstützung der Informationsnutzung in dem Prozessschritt der Montageabsicherung. Die Ergebnisse basieren auf einer Literaturrecherche und dem Fallbeispiel der Montageabsicherung der BMW Group. Unterschiedliche Möglichkeiten der Informationsvisualisierung und Visualisierungstechniken wurden gesammelt und in Form eines ersten Prototypen exemplarisch evaluiert. Verbesserungspotential bietet die Tatsache, dass die Ermittlung der Anforderungen an den Lösungsansatz und dessen Evaluation im gleichen Fallbeispiel durchgeführt wurden. Dennoch können die erarbeiteten Methoden und gewonnen Erkenntnisse auch auf andere Anwendungsbeispiele übertragen werden. Besonders das zweistufige Verfahren zur Identifikation der erforderlichen Informationen und deren darauf folgende Priorisierung anhand Mitarbeiterbefragungen und technischen Kriterien hat sich als vielversprechend erwiesen. Weitere Fallbeispiele – zum Beispiel in anderen Absicherungsabteilungen des Unternehmens oder auch Montageabsicherungen in anderen Unternehmen – sind Möglichkeiten, eine breitere Grundlage für die Evaluation des Ansatzes zu bieten. Potential für Erweiterungen bietet der entstandene Prototyp. Da es sich vorläufig um einen „Klick“-Dummy handelt, können zwar wesentliche Erkenntnisse bezüglich Evaluation der ausgewählten Informationen gezogen werden, Aspekte der Softwareergonomie und der Nutzerinteraktion müssen allerdings in entsprechend zu entwickelnden Softwareprototypen evaluiert werden.

Literatur

- [1] Bossmann, M.: "Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung", Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 38, Saarbrücken, 2007.
- [2] Lindemann, U.: "Methodische Entwicklung technischer Produkte", Berlin: Springer 2009.
- [3] Pietsch, T.; Martiny, L.; Klotz, M.: "Strategisches Informationsmanagement-Bedeutung, Konzeption und Umsetzung", Berlin: Erich Schmidt Verlag 2004.
- [4] Hesse, M., Weber, C.: "Bewertung von Methoden zur Herstellbarkeitsabsicherung von Serienfahrzeugen", 22. Symposium „Design for X“, Tutzing, 2011, S. 241-252.
- [5] Müller, M.: "Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie", Schriftenreihe Produktionstechnik, Saarbrücken, 2008.
- [6] Koreimann, D. S.: "Methoden der Informationsbedarfsanalyse". Berlin: de Gruyter 1976, S. 65.
- [7] Küpper, H. U.: "Controlling: Konzeption, Aufgaben und Instrumente". Stuttgart: 1997.
- [8] Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R. T.: "Die grenzenlose Unternehmung. Information, Organisation und Management". In: Lehrbuch zur Unternehmensführung im Informationszeitalter. Wiesbaden 2003.
- [9] Däßler, Prof. Rolf: "Informationsvisualisierung – Stand, Kritik und Perspektiven", in Methoden/Strategien der Visualisierung in Medien, Wissenschaft und Kunst, Wissenschaftlicher Verlag Trier, Trier 1999.
- [10] Schumann, H.; Müller, W.: "Informationsvisualisierung: Methoden und Perspektiven". In: it - Information Technology 3(2004). Oldenbourg Verlag 2004, S.135-141.
- [11] Mackinlay, J.: "Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information". ACM Transactions on Graphics, Vol. 5, Nr. 2, 1986, S.110-141.
- [12] DIN EN ISO 9241-110 Grundsätze der Dialoggestaltung.



