

**Eine systemtechnische Methode zur Absicherung konstruktionsbegleitender
Simulationen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

René Andrae

aus

Düsseldorf

Gutachter:

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

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Tag der mündlichen Prüfung: 29.05.2018

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion am Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen.

Zum Teil wurden die Inhalte im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsvorhaben und Industrieprojekten erarbeitet. Daher gilt an dieser Stelle mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und den in unterschiedlichen Projekten beteiligten Industriepartnern.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler möchte ich für die Betreuung dieser Arbeit und die Unterstützung während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl danken. Die vielen offenen und konstruktiven Gespräche förderten und prägten mich ungemein in meiner wissenschaftlichen und beruflichen Entwicklung.

Auch möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr-Ing. Armin Lohrengel für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates bedanken.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg, dem Inhaber des Lehrstuhls Konstruktion und Kunststoffmaschinen, und seinen wissenschaftlichen Mitarbeitern möchte für die ausgezeichnete Zusammenarbeit bei den durchgeführten Projekten danken.

Meinen Kollegen vom Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion möchte ich für das äußerst kollegiale und freundliche Arbeitsumfeld danken. Mein besonderer Dank geht hierbei an Herrn Thivakar Manoharan, M. Sc. und an Herrn Dr.-Ing. Yousef Hooshmand, welche mich mit zahlreichen Anregungen und fachlichen Diskussionen bei meinem Vorhaben unterstützt haben.

Danken möchte ich natürlich auch meiner Familie. Darunter meinem Schwiegervater Herrn Dr. phil. Uwe Andrae für die kritische und sorgfältige Durchsicht.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Friederike Andrae, M. A. und meinem Bruder Pascal Seidel, M. Sc.. Neben euren Durchsichten meiner Arbeit habt Ihr mich schon vom Beginn meines Studiums jederzeit unterstützt und standet mir in vielfältiger Weise immer zur Seite. Besonders Friederike war auch in schwierigen Situationen und Momenten immer mein positiver Rückhalt und konnte mir immer wieder neue Motivation schenken.

Liebe Friederike, lieber Pascal, Euch beiden widme ich diese Arbeit!

Kurzfassung

Inhalt dieser Arbeit ist die Definition einer Methodik zur Entwicklung von Unterstützungssystemen zur Absicherung konstruktionsbegleitender Simulationen in CAD-Systemen. Der Fokus der Vorgehensweise liegt auf der systemtechnischen Umsetzung im Sinne der modellbasierten Systementwicklung (MBSE). Die Methode teilt sich auf in die Erstellung einer Wissensbasis, die Systementwicklung mittels der System Modeling Language (SysML) und die Implementierung ins CAD-System.

Mit diesem Leitfaden soll gerade im Bereich der Formalisierung und der Implementierung von KBE-Systemen der Entwickler solcher Systeme bei der Kommunikation im Team und der Implementierung unterstützt werden. Zur Qualifizierung werden praktische Beispiele gezeigt, wie unterschiedliche KBE-Techniken aus einem neutralen Systemmodell abgeleitet werden können. Die Validierung erfolgt an einem aktuellen Forschungsprojekt aus dem Bereich der spritzgussgerechten Konstruktion.

Abstract

Content of this thesis is the definition of a method for the development of support systems to safeguard simulations during the design process in CAD systems. The focus of the procedure is on the technical implementation in terms of model-based system development (MBSE). The method is divided into creating a knowledge base, system development using the System Modeling Language (SysML) and implementation into the CAD system.

This guide is intended to support the developers of such systems in team communication and implementation, especially in the area of formalization and implementation of KBE systems. For qualification, practical examples of how different KBE techniques can be derived from a neutral system model are shown. The validation is carried out at a current research project in the field of injection-moulded part design.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	I
KURZFASSUNG	III
ABKÜRZUNGEN	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 Zielsetzung.....	2
1.2 Aufbau der Arbeit.....	2
2 GRUNDLAGEN ZU KONSTRUKTIONS- UND BERECHNUNGSPROZESSEN	5
2.1 Die virtuelle Produktentwicklung	5
2.1.1 Anforderungen an die Produktentwicklung	6
2.1.2 Qualitätsmethoden in der Produktentwicklung.....	9
2.1.3 Der rechnerunterstützte Konstruktionsprozess.....	11
2.1.4 Berechnung und Simulation in der Produktentwicklung.....	17
2.2 Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung in CAD-Prozessen	20
2.2.1 Analytische Berechnungsverfahren	20
2.2.2 Numerische Berechnungsverfahren	23
2.2.3 Grenzen der Berechnungsintegration	25
2.3 Optimierungsverfahren in der Produktentwicklung	26
2.3.1 Parameterbasierte Optimierungsstudien	26
2.3.2 Formbasierte Optimierungsstudien.....	27
2.3.3 Topologieoptimierung	28
2.3.4 Multidisziplinäre Design Optimierung.....	29
2.4 Simulationsdatenmanagement.....	30
2.5 Systementwicklung	31
2.5.1 Systems Engineering.....	32
2.5.2 Modellbasierte Systementwicklung (MBSE).....	33
2.5.3 Model based Engineering (MBE)	35
2.6 Wissensintegration im CAX-Bereich.....	36
2.6.1 Knowledge-Based Engineering	37
2.6.2 Erstellung wissensbasierter Systeme	39
2.6.3 Entwicklung von KBE-Systemen im CAD/CAE	41
2.7 Zwischenfazit.....	43

3	WISSENSBASIERTE ABSICHERUNG KONSTRUKTIONSBEGLEITENDER SIMULATIONEN	45
3.1	Ausgewählte Problemstellungen	45
3.1.1	Apparatebau.....	46
3.1.2	Spritzgussgerechter Bauteilentwurf.....	47
3.1.3	Schmalseiteneinheit einer Stranggussanlage.....	48
3.1.4	Lebensdauerprognose von Elastomerbauteilen	49
3.1.5	Prüfstand zur Geradheitsmessung.....	50
3.2	Anforderungen an eine Methode zur simulationsgerechten Absicherung.....	50
3.3	Systemtechnischer Ansatz.....	52
3.3.1	Erstellung der Wissensbasis.....	53
3.3.2	Systementwicklung	55
3.3.3	Implementierung in die CAD-Umgebung.....	57
3.4	Einordnung in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.....	60
3.4.1	Phasenbezogenes Frontloading	60
3.4.2	Einordnung nach Konstruktionsarten.....	61
3.5	Anwendungsbeispiel „Schmalseiteneinheit“	62
3.5.1	Wissenstransformation	62
3.5.2	Systementwicklung	63
3.5.3	Implementierung.....	66
3.6	Zwischenfazit.....	67
4	QUALIFIZIERUNG SIMULATIONSGERECHTER FEATURES UND KOMPONENTEN .	69
4.1	Simulationsgerechte Analysetechniken	69
4.1.1	Kategorie A: Geometrieanalysetools.....	69
4.1.2	Kategorie B: Qualitätsprüftools.....	73
4.2	Simulationsgerechte (Konstruktions-)Features	73
4.2.1	Kategorie A Konstruktionsfeature	74
4.2.2	Kategorie B: Featureerweiterung.....	75
4.2.3	Kategorie C: Simulationsfeature	75
4.3	Simulationsgerechte Komponenten	77
4.3.1	Kategorie A: Templates.....	78
4.3.2	Kategorie B: Familientabelle	80
4.3.3	Kategorie C: Regelmodule.....	80
4.4	Anwendung in numerischen statischen Analysen	81
4.4.1	Qualifizierung des Preprocessings.....	82
4.4.2	Qualifizierung des Processings.....	83
4.4.3	Qualifizierung des Postprocessings.....	87
4.5	Anwendung in parameterbasierten Optimierungsstudien.....	89

4.5.1	Interne Kopplung	89
4.5.2	Kopplung mit analytischen Berechnungen.....	90
4.5.3	Kopplung mit externen Simulationsumgebungen.....	92
4.6	Zwischenfazit	92
5	WISSENSBASIERTER UNTERSTÜTZUNG DES KONSTRUKTEURS HINSICHTLICH DES SPRITZGUSSGERECHTEN BAUTEILENTWURFS	95
5.1	Rahmenbedingungen des Projektes	96
5.2	Datenanbindung und Schnittstellenformate	100
5.3	Material- und Verfahrensauswahl	100
5.4	Einbindung konstruktiver Anforderungen	101
5.5	Modellierungstechniken.....	104
5.6	Simulationsvorbereitung	107
5.6.1	Geometrie-vorbereitung.....	107
5.6.2	Schnittstelle	108
5.7	Geometrierückführung	110
5.8	Praktische Umsetzung.....	110
5.8.1	Auswahlprozesse.....	111
5.8.2	Spritzgussfeature	113
5.9	Validierung des Projekts	114
5.10	Zwischenfazit	116
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	117
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	121
	LITERATURVERZEICHNIS	123
	UNVERÖFFENTLICHTE PUBLIKATIONEN AM INSTITUT FÜR PRODUKT ENGINEERING	131
	EIGENE PUBLIKATIONEN.....	133
	LEBENS-LAUF	135

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
API	Application Programming Interface
B-REP	Boundary-Representation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAO	Computer Aided Optimization
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSG	Constructive Solid Geometry
DfX	Design for X
FE	Finite Elemente
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse
GUI	Graphical User Interface
HTML	Hypertext Markup Language
IdD	Internet der Dinge
JSON	JavaScript Object Notation
KBE	Knowledge-based Engineering
KBS	Knowledge-based System
KE	Konstruktionselement
MBE	Model-based Engineering
MBSE	Modellbasierte Systementwicklung
MDO	Multidisziplinäre Design Optimierung
MKS	Mehrkörpersimulation
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Product and Manufacturing Information
QFD	Quality Function Deployment
SDL	Specification and Description
SDM	Simulation Data Management
SPC	Statistical Process Control
STEP	Standard for the exchange of product model data
SysML	System Modeling Language
UDF	User Defined Feature
UML	Unified Modeling Language
VPE	Virtuelle Produktentwicklung
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

In die virtuelle Produktentwicklung (VPE) sind immer mehr Disziplinen involviert. Daraus ergeben sich veränderte und steigende Anforderungen an qualifizierte Produktmodelle, die eine vollständige Integration und Verknüpfung aller relevanten Teilprozesse absichern müssen. Ebenso soll das Produktverständnis, wie auch die Qualität des Produktes und des Prozesses erhöht werden. Daraus folgen kürzere Innovationszyklen und eine Erhöhung der Transparenz des Prozesses.

Als wichtiger Bestandteil neben der Konstruktion und dem Versuch hat sich in der VPE die Anwendung numerischer Simulationsmethoden etabliert [PäTr+12]. Eine Absicherung durch virtuelle Prototypen in einer frühen Konzeptphase unterstützt dabei den Konstruktionsprozess. Ein Nachteil ist, dass die Verwendung virtueller Prototypen noch unzureichend in die übrigen Prozessschritte integriert und damit eine Sensibilisierung für eine vorausschauende Modellerzeugung noch nicht vorhanden ist. Ebenso ergab eine Studie, dass Berechnungsingenieure durchschnittlich 50 % ihrer Arbeitszeit auf Datenbeschaffung verwenden müssen und nur jeweils 10 % auf die Modellaufbereitung [SeWa11].

In der Literatur sind verschiedene Richtlinien wie die VDI-Richtlinie 2211 [VDI2211] verfügbar, welche eine methodische Vorgehensweise zur Anwendung von Berechnungsverfahren in Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen durch den Konstrukteur beschreiben. Zumeist setzen diese bereits fortgeschrittene Kenntnisse im Bereich der Berechnung und Simulation voraus.

Generell wird im Bereich der virtuellen Produktentwicklung zwischen zwei Typen von Simulationen unterschieden. Der erste Typ beschreibt fortgeschrittene und komplexe Simulationen, welche Aufgabe von Berechnungsexperten sind und meist in Stand-Alone-Systemen durchgeführt werden. Der zweite Typ sind konstruktionsbegleitende Simulationen, welche vom Konstrukteur durchgeführt werden und den eigentlichen Berechnungsexperten entlasten sollen. Viele Hersteller von CAD-Systemen haben diesen Trend erkannt und bieten in ihren CAD-System eine integrierte Simulationsumgebung an. Diese sind untereinander verknüpft. Eine genauere Betrachtung zeigt den unzureichenden Grad der Verknüpfung dieser Disziplinen und die Notwendigkeit neuer Methoden zur ihrer Optimierung.

Die Optimierung dieser Prozesse erfolgt zu meist über moderne KBE-Techniken (Knowledge-based Engineering), wie z. B. die Verwendung von gängigen Programmierschnittstel-

len der CAD-Systeme. Diese Prozessoptimierung ist auch Thema einiger aktueller Forschungsarbeiten und Dissertationen. Dargestellt wird aber zumeist nur die Umsetzung und nicht die Vorgehensweise, welche oft unklar bleibt. Eine erste allgemeine methodische Vorgehensweise zur Bearbeitung von KBE-Projekten beschreibt die VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 [VDI5610-2], welche im Mai 2017 veröffentlicht wurde. Laut dieser ist im industriellen Umfeld noch keine einheitliche, wie allgemeingültige Beschreibung vorhanden oder veröffentlicht. Dieselbe Richtlinie stellt eine allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung von KBE-Anwendungen zur Verfügung.

1.1 Zielsetzung

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist die Definition einer angepassten Methode zur Entwicklung von Unterstützungssystemen zur Absicherung konstruktionsbegleitender Simulationen in CAD-Systemen. Der Fokus der Methode soll dabei auf einer systemtechnischen Umsetzung im Sinne einer vollständigen Formalisierung des später zu implementierenden Systems liegen. Die Methode wird aus einer geeigneten Anforderungsentwicklung abgeleitet. Aus diesem primären Ziel lassen sich Teilziele ableiten, wie

- eine Vorgehensweise für eine direkte Identifizierung expliziter Lösungsvorschläge aus der gegebenen Form der Wissensaufbereitung,
- ein transparenter Entwicklungsprozess durch eine frühe Einbeziehung aller am Entwicklungsprozess beteiligten Personen,
- die Definition eines Systemmodells, welches eine Lesbarkeit für programmierunerfahrene Anwender wie auch die Definition unterschiedlicher Sichten auf das System zulässt,
- eine Formalisierung des Systems auf unterschiedlichen Ebenen (Funktion, Anforderungen, Struktur) und vor der eigentlichen Implementierung,
- eine Einteilung und Klassifizierung diverser KBE-Techniken in der Phase der Implementierung,
- eine ganzheitliche Validierung der entwickelten Methodik an einem aktuellen Forschungsprojekt.

Mit dieser Arbeit soll gerade für den Bereich der Formalisierung und der Implementierung von KBE-Systemen ein Leitfaden zur Verfügung gestellt werden, welcher den Entwickler solcher Systeme bei der Kommunikation im Team und der Umsetzung unterstützt.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Das *erste* Kapitel führt in die zu bearbeitende Thematik wie auch die Zielsetzung dieser Arbeit ein. Im *zweiten* Kapitel werden der Stand der Technik und die Grundlagen zu Konstruktions- und Berechnungsprozessen, wie auch zur Systementwicklung und der Wissensintegration an der Prozesskette CAD-CAE aufgezeigt.

Auch werden die Defizite aktueller Ansätze und Methoden zur Erstellung von Unterstützungssystemen untersucht.

Hieraus resultiert das *dritte* Kapitel, in welchem eine Methode für eine modellbasierte KBE-Methodenentwicklung mit dem Fokus auf die Prozesskette Konstruktion-Simulation beschrieben wird. Die Methode teilt sich auf in die Erstellung einer Wissensbasis, die Systementwicklung mittels der System Modeling Language (SysML) und die Implementierung ins CAD-System.

Das *vierte* Kapitel umfasst einzelne praktische Beispiele, wie unterschiedliche KBE-Techniken aus einem neutralen Systemmodell abgeleitet und qualifiziert werden können. Die praktischen Beispiele wurden im Rahmen von Industrie- und Forschungsprojekten, wie auch mit Hilfe von Abschlussarbeiten entwickelt.

Das *fünfte* Kapitel der Arbeit beinhaltet eine ausführliche Anwendung und Validierung der entwickelten Methodik auf ein aktuelles Forschungsprojekt aus dem Bereich der spritzgussgerechten Konstruktion. Wesentliche Ziele dieses Projektes sind die Ermöglichung einer wissensbasierten Beurteilung der Fertigungsmöglichkeiten und der Werkstoffvorauswahl, wie eine Beschleunigung der Formteilgestaltung und -auslegung durch die Reduzierung der erforderlichen Optimierungsschritte.

Das *sechste* Kapitel fasst die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen, zieht ein abschließendes Fazit und gibt einen kurzen Ausblick auf weitere Schritte in diesem Forschungsfeld.

2 Grundlagen zu Konstruktions- und Berechnungsprozessen

Der Konstruktionsprozess ist, unter der Beachtung gewisser Regeln, definiert als Ablauf aller Tätigkeiten, die zur Konstruktion technischer Produkte geeignet sind. Die Ausrichtung des Prozesses änderte sich im Laufe der Zeit. Die klassische Funktionsorientierung, welche durch eine starke Arbeitsteilung geprägt ist, wurde durch eine Prozessorientierung ersetzt. Dies führt dazu, dass Konstrukteure ihre Tätigkeiten immer mehr auf den gesamten Produktentstehungsprozess (PEP) ausrichten müssen [Co10]. Zum Stand der Technik gehört, dass der Konstrukteur dabei rechnergestützte Hilfsmittel verwendet. In diesem Kapitel werden die hier relevanten Grundlagen und der Stand der Wissenschaft dargestellt. Dabei stellen sich aktuelle Defizite hinsichtlich der Prozesskette Berechnung – Konstruktion – Simulation heraus.

2.1 Die virtuelle Produktentwicklung

Der Fortschritt von rechnergestützten Methoden führte zu einer immer effektiveren Betrachtungsweise des Produktentstehungsprozesses. Dies mündete in dem Begriff der virtuellen Produktentwicklung. Diese ist definiert als eine Arbeitsweise, welche die gesamtheitliche Sicht des Entwicklungsprozesses mit virtuellen Werkzeugen beschreibt. Als Datenbasis dient das virtuelle Produktmodell. Dieser Begriff ist in der Literatur unterschiedlich definiert, vgl. u. a. [Sp98], [Bu96], [Ch07]. Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Definitionen ist in der Dissertation von Klemme zu finden [Kl15b]. An dieser Stelle wird seine Formulierung des „digitalen Produktmodells“ übernommen [Kl15b]: *„Dabei wird der Fokus auf die Geometrie beschreibenden und semantischen Eigenschaften gelegt, während unter Produkt die zu entwickelnde technische Komponente verstanden wird. Zusätzliche Informationen wie Stammdaten und Parameter des Product Lifecycle Managements werden nicht berücksichtigt. Somit wird in Folge von einem „Datencontainer“ ausgegangen, dem unterschiedliche Rollen während der Produktentwicklungszeit zugeteilt werden“*

Im Vordergrund steht, dass unabhängig von der jeweiligen Disziplin während der Produktentwicklung auf das digitale Produktmodell als Referenz zugegriffen wird. Die dafür benötigten Schnittstellen sind bei vielen Softwaresystemen nicht oder nur ansatzweise vorhanden. Begründet werden kann dies u. a. durch konkurrierende Anforderung der Unternehmen am Markt [Kl15b]. Zur Verdeutlichung des unterschiedlichen Informationsgehalts der Daten des Produktmodells schlägt Anderl eine Aufteilung wie in Abbildung 2-1 dargestellt vor.

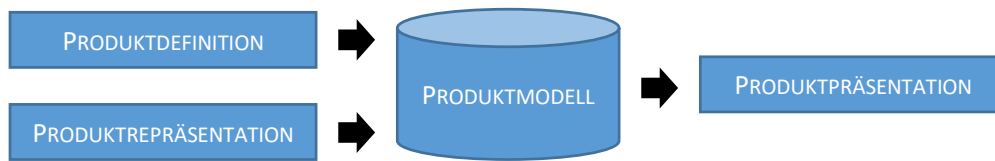


Abbildung 2-1: Informationsgehalt des Produktmodells (nach [An10])

Die Produktdefinition beschreibt eine eindeutige Identifikation des Produktes. Die Produktrepräsentation basiert zumeist auf digitalen Mastermodellen im CAD-System, welche die Grundlage fast aller digitalen Produktmodelle sind: „Aus diesem „Grundmodell“ lassen sich die Partialmodelle ableiten. Entsprechend bedeutungsvoll ist die sorgfältige Erstellung des digitalen Mastermodells. Denn nur durch sinnvoll strukturierte und insbesondere wissensangereicherte Mastermodelle kann die durchgängige wirtschaftliche Verwendung sichergestellt werden.“ [Ke14]. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden für diese Arbeit relevante Disziplinen des digitalen Produktmodells dargestellt. Dabei wird neben grundlegenden wie fortgeschrittenen Methoden auch ihr Verknüpfungsgrad bewertet.

2.1.1 Anforderungen an die Produktentwicklung

Die Reduzierung von Entwicklungszeiten- und Kosten, mehr Produktinnovationen, wie auch die Verwendung neuer Technologien sind nur einige Anforderungen an die moderne Produktentwicklung. Im Laufe der Zeit wurden immer neue Methoden entwickelt, um den bestmöglichen Kompromiss zwischen oft auch sich scheinbar ausschließenden Anforderungen zu finden. Im Folgenden sollen exemplarische und für diese Arbeit relevante Methoden vorgestellt werden.

Frontloading

Der frühzeitige Einsatz von optimierten Methoden und IT-Werkzeugen in der Produktentwicklung fällt unter den Begriff des „Frontloading“. Die Anwendung erfolgt während der Produktkonzeption, also in der Phase, in der das größte Kostenoptimierungspotenzial vorliegt, vgl. Abbildung 2-2 [EiSt09]. 70 bis 80 % der Produktkosten werden in dieser Phase festgelegt [EhKi+14]. Dem steht gegenüber, dass in diesem Zeitraum der größtmögliche Spielraum für Korrekturen vorhanden ist. Wurden früher Produktinformationen in einem einzigen System abgelegt, werden sie nun, auch bei Ablage in ein externes System, referenziert. Dem Konstrukteur, welcher dadurch immer mehr im Zentrum eines Informationssystems steht, ist damit die Möglichkeit gegeben, relevante Informationen aus internen wie auch externen Informationsquellen zu verwenden [SzBe07].

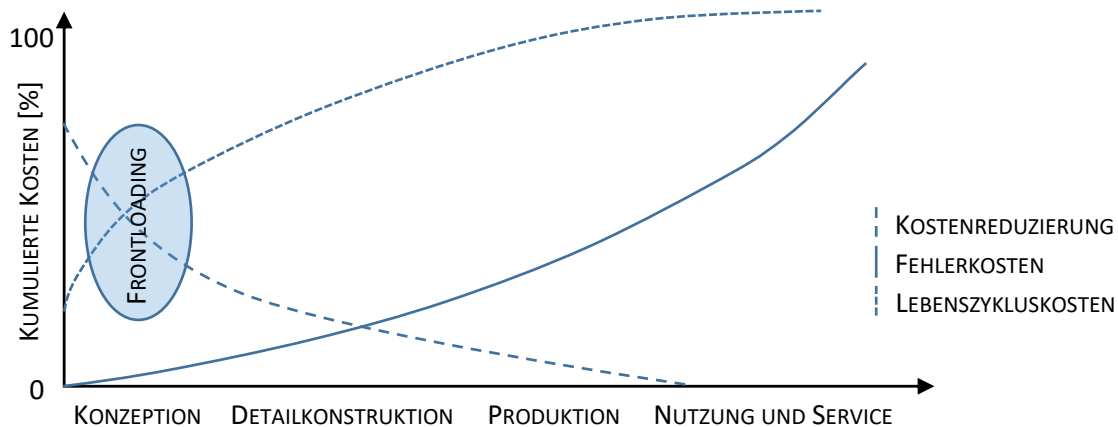


Abbildung 2-2: Frontloading im Entwicklungsprozess (nach [SzBe07])

Die Methoden des Frontloadings lassen sich durch differenzierte Sichtweisen unterteilen. Sie beziehen sich auf eine frühzeitige Kostenstrukturierung oder auf die frühzeitige Absicherung konstruktiver Randbedingungen.

Die Selbstkosten bei der Produktentwicklung gliedern sich in Herstellungskosten sowie Verwaltungs- und Vertriebskosten. Möglichkeiten zur Beeinflussung sind u. a. in [EhKi+14] dargestellt. Szeghó [SzBe07] entwickelt in ihrem Beitrag ein erweitertes Produktkostenmodell mit dem eine „zeitliche Ausdehnung der Zielkostenvorgabe über den gesamten Produktlebenszyklus realisiert“ wird. Die entwickelte genetische Kostenstruktur, welche das Forschungsziel darstellte, lässt sich mit einem vorhandenen digitalen Produktmodell verknüpfen.

Kesselmanns bezeichnet das Frontloading als den Versuch Funktionen, Betriebsverhalten, technologische und sonstige Eigenschaften eines zu entwickelnden Produktes so früh wie möglich in der Entwicklung mit Hilfe digitaler Modelle zu überprüfen [Ke14]. Gleichzeitig folgert er, dass eine Systemunterstützung in der Konzept- und Entwurfsphase noch gering ist. Hinsichtlich einer frühen Integration von numerischen Berechnungen arbeitet Hagenrainer heraus, dass dies nur durch die Definition von einem Unterstützungssystem für den Konstrukteur sinnvoll erscheint [Ha16]: „Ein Unterstützungssystem muss dementsprechend die Fähigkeit haben, selbstständig auf die entsprechende Expertensoftware zuzugreifen und das Wissen hinterlegt haben, wie die Software in den Entwicklungsprozess integriert werden kann. Außerdem muss das Ergebnis dem Anwender anschaulich dargestellt oder direkt vom System interpretiert werden.“

Design for X

Der Begriff des „Design for X“ (DfX) beschreibt das Beachten von Gerechtheiten in der Produktplanungsphase [Li16]: „DfX ist eine Vorgehensweise, in welcher Methoden und Wissen ge-

nutzt werden, um das Produkt so zu gestalten, dass das Kriterium X oder der Bereich X unterstützt wird“ Das X ist in diesem Kontext mit einer Gerechtheit zu verstehen. Dieses leitet sich aus dem gesamten Produktlebenszyklus ab. Ihren Ursprung hat diese Methode Ende der 1970er Jahre. Der Fokus lag damals zumeist auf dem fertigungsgerechten und montagegerechten Konstruieren. Die Anzahl an Gerechtheiten stieg im Laufe der Zeit stark an.

In [StGr+09] präsentiert Stöber u. a. zwei Ansätze, wie eine ganzheitliche Umsetzung des DfX innerhalb der integrierten Produktentwicklung aussehen kann. Dabei wird zu Beginn die integrierte Produktentwicklung in vier Hauptgebiete aufgeteilt: Mensch, Organisation, Methodik und Technik. Der erste Ansatz zeigt auf, wie Entwickler mit Hilfe von Richtlinien, Methoden und Werkzeugen den richtigen Umgang mit widersprüchlichen Zielen finden sollen. Inhalt des zweiten Ansatzes ist eine eigenschaftsbasierte Erfassung des Produktreifegrades und eine Betrachtung von Iterationen, vgl. auch Abbildung 2-3. Stöber arbeitet hierbei heraus, dass gerade bei der resultierenden Beeinflussung der Produkteigenschaften Simulationen einen höheren Stellenwert einnehmen. „Für deren zielgerichteten Einsatz sind sowohl etablierte Referenzprozesse als auch ein effektives Management der anfallenden Produktdaten notwendig. Andererseits bedarf es einer zunehmenden Integration zwischen Synthese- und Analyseschritten“ [StGr+09] Bei Einhaltung dieser Anforderungen wird der Berechnungsingenieur, bei einer optimalen Versorgung mit berechnungsrelevanten Daten, frühzeitig in den Produktentwicklungsprozess mit eingebunden. Dies gewährleistet eine engere Verknüpfung der Bereiche CAD-CAE [StGr+09].

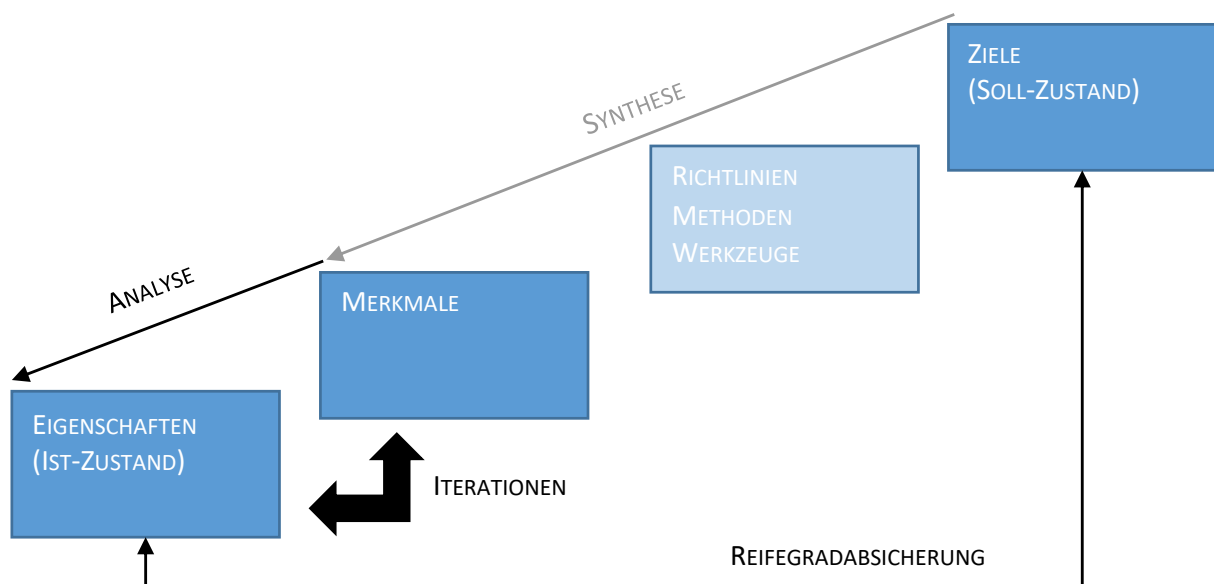


Abbildung 2-3: Ansatz für eine eigenschaftsbasierte Erfassung des Produktreifegrades (nach [StGr+09])

Klemme [Kl15b] präsentiert in seiner Dissertation Methoden für einen wissensbasierten Aufbau simulationsorientierter Produktmodelle. Er orientiert sich daran, dass die von ihm herausgearbeiteten komplexen Verknüpfungen in der modernen Produktentwicklung im Sinne des DfX noch nicht ausreichen. Seine entwickelten Methoden stützen sich auf bereits mit Wissen angereicherte digitale Produktmodelle. Verwendet werden diese als Datenbasis für gekoppelte Simulationsprozesse.

Beide Methoden zielen auf eine möglichst frühe Ermittlung von Anforderungen an das Produkt. Gewährleistet wird dies durch eine frühzeitige Unterstützung des Konstrukteurs. Für eine tiefgehende Verknüpfung von CAD-CAE sind digitale Produktmodelle erforderlich, welche auf eine einheitliche Datenbasis referenzieren. Um den Konstrukteur dabei zu unterstützen, Anforderungen verschiedener Disziplinen zu berücksichtigen, ist die Definition von Unterstützungssystemen notwendig.

2.1.2 Qualitätsmethoden in der Produktentwicklung

Die Qualität wird als das Vermögen einer Gesamtheit inhärenter (lat. innewohnender) Merkmale eines Produkts, eines Systems oder eines Prozesses zur Erfüllung von Anforderungen von Kunden und anderen Stakeholdern beschrieben [DIN9000]. Auch wenn die Qualität erst am fertigen Produkt überprüft werden kann, erfolgt die Absicherung schon ab der Planung. Hierfür liegt eine Vielzahl von Vorgehensweisen vor, welche als Qualitätsmethoden bezeichnet werden. Diese lassen sich nach [TiDe+11] in drei Gruppen aufteilen:

- Einsatz in bestimmten Produktlebensphasen: Benchmarking, Konstruktions-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), Prozess-FMEA, etc.
- Einsatz über mehrere Produktlebensphasen: Qualitätsfunktionendarstellung (engl. Quality Function Deployment, abk. QFD), Statistische Prozess Regelung (engl. statistical process control, abk. SPC), etc.
- Einsatz unabhängig von der Produktlebensphase: Checklisten, Soll/Ist-Vergleich, etc.

Bekannte Qualitätstechniken sind die QFD und die FMEA. Passek definiert die QFD als eine Systematik zur kundenorientierten Planung und Lenkung, die FMEA zur präventiven Sicherung und Verbesserung der Produkt- und Prozessqualität [Pa12]. Die DIN EN 60812 beschreibt die FMEA als eine Methode zur präventiven Qualitätssicherung mit dem Ziel, potenzielle Fehler neuer Produkte wie auch von neuen Prozessen systematisch zu erkennen, zu bewerten und durch konstruktive Gegenmaßnahmen zu reduzieren bzw. zu verhindern [DIN60812]. Die FMEA lässt sich in drei Arten unterteilen: die System-, die Konstruktions- und die Prozess-FMEA. Die methodische Vorgehensweise ist bei allen drei FMEA-Arten dieselbe, lediglich die Analysetiefe des betrachteten Systems ist unterschiedlich [TiDe+11].

Die Methoden, wie auch der Begriff Qualität, lassen sich auf unterschiedliche Sichtweisen beziehen. Im Folgenden wird vertieft auf eine simulations- und wissensbezogene Sichtweise

eingegangen. Passek stellt in seinem Beitrag eine Methodik vor, mit der sich die Qualität numerischer Simulationen gesamthaft quantifizieren, nachhaltig sichern und verbessern lässt [Pa12], vgl. auch Abbildung 2-4.

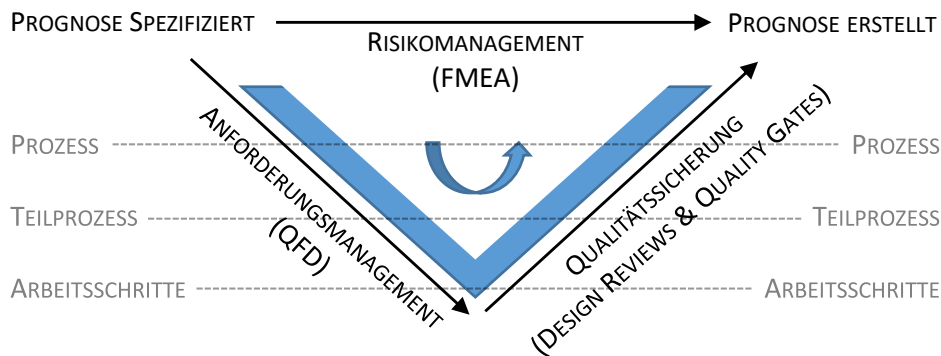


Abbildung 2-4: Systematischer Planungsansatz im CAE (nach[Pa12])

Durch die Anpassung des Methodenverbundes QFD-FMEA wurde ein Vorgehensmodell zum Management der Qualität von Berechnung und Simulation zur funktionalen Karosserieauslegung entwickelt. Dieses enthält einen eigenen QFD-Ansatz. Über eine FMEA können im Vorfeld zunächst die möglichen Fehlerquellen in der Modellbildung ermittelt und entsprechende Regeln zur Fehlervermeidung aufgestellt werden. Relevantes Wissen über fehlerrelevante Zusammenhänge, über das oft nur Spezialisten verfügen, wird in FMEA-Formularen gesammelt. Dabei stellt eine FMEA oft die erste Explikation von impliziten Wissen dar. Dieses implizierte Experten- und Erfahrungswissen der Berechnungsingenieure muss expliziert werden [Pa12]. Die zielgerichtete Nutzung des vorhandenen Expertenwissens durch den Vorteil der FMEA induziert die Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur weiteren Anwendung dieses Wissens [Di07]. Durch eine FMEA können zwei Repräsentationsformen von Wissen untersucht werden. Das prozedurale Wissen ist in der Durchführung der Analyse enthalten. Das Ergebnis der Analyse beinhaltet das deklarative Wissen. [Di07]. Damit ist die FMEA ein geeignetes Instrument, eine Wissensbasis aufzubauen, vgl. [DGQ13-11]. Oft werden die FMEA und die QFD gekoppelt und als Methodenverbund angewendet, da bei der Ermittlung der Bedeutung der Folgen eines Fehlers auf das hinterlegte Wissen aus der Durchführung der QFD zurückgegriffen wird [Di07].

Die präsentierten Beiträge zeigen auf, wie Methoden aus dem Qualitätsmanagement im Bereich der Simulation und des Wissensmanagements Anwendung finden. Die FMEA ist ein sinnvolles Werkzeug zur Quantifizierung numerischer Berechnungen im Umfeld der Prozesskette Konstruktion-Simulation. Das Wissen, welches in einer FMEA abgelegt wird, eignet sich zum Aufbau eines wissensbasierten Unterstützungssystems, wie es u. a. in Kapitel 2.1.1 gefordert wurde.

2.1.3 Der rechnerunterstützte Konstruktionsprozess

Für die Entwicklung technischer Erzeugnisse gelten systematische Vorgehensweisen entsprechend der Konstruktionsmethodik als zielführende Ansätze [BoFr+16]. In der Literatur sind eine Vielzahl von Veröffentlichungen dazu zu finden [PaFe+13], [EhMe13].

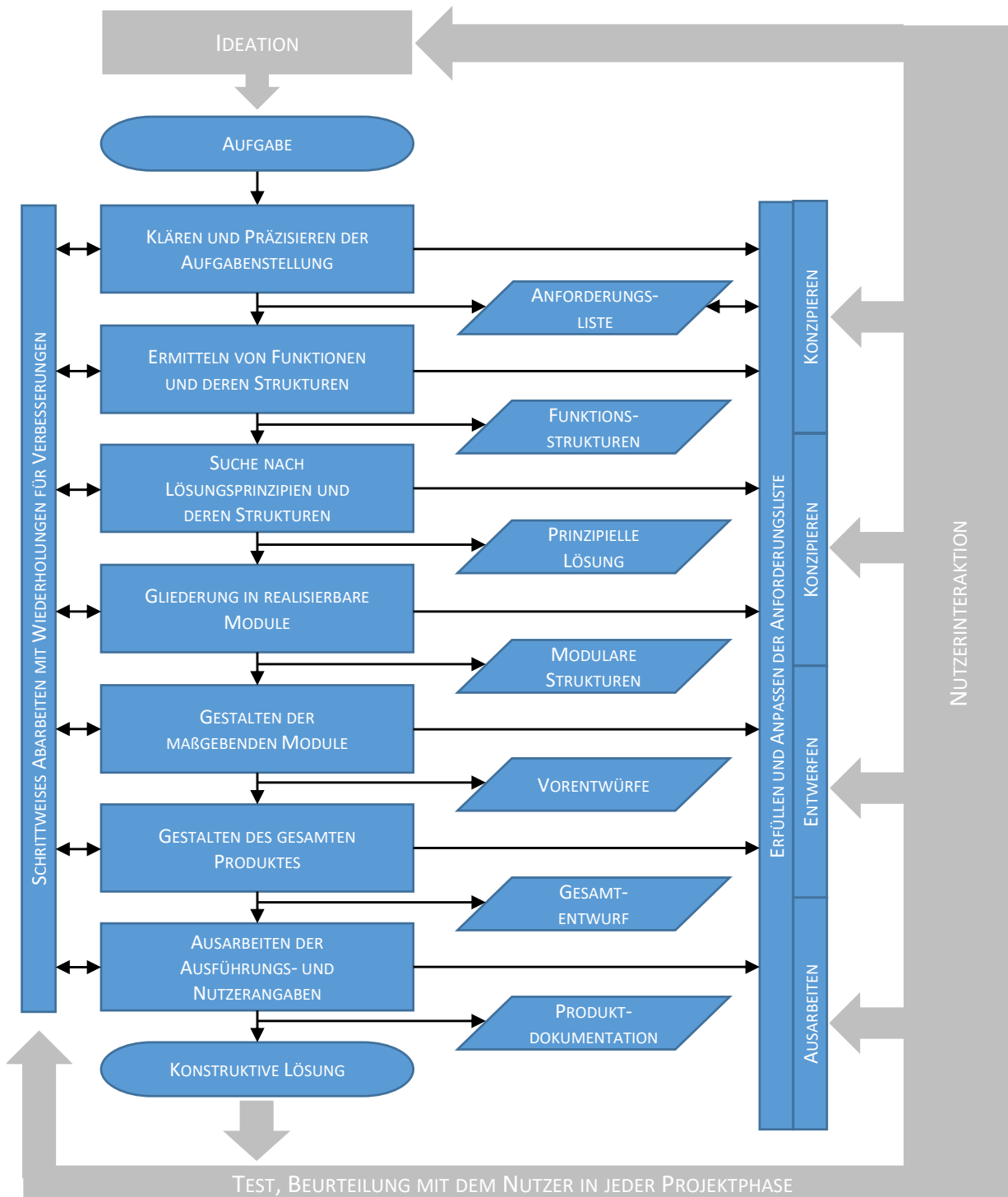


Abbildung 2-5: Konstruktionsmethodik nach VDI-Richtlinie 2221 mit integrierter Nutzerinteraktion (nach [PaFe+13], [BoFr+16])

Die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2211] ist ein allgemeiner Leitfaden für die Entwicklung und Konstruktion von technischen Produkten. Sie beschreibt ausführlich alle Arbeitsschritte, welche für die Produktentwicklung benötigt werden. Den Arbeitsschritten sind dazu Arbeitsergebnisse wie auch die vier allgemeinen Konstruktionsphasen zugeordnet:

- Planen und Aufgabe klären (informative Festlegung)
- Konzipieren (prinzipielle Festlegung)
- Entwerfen (gestalterische Festlegung)
- Ausarbeiten (herstellungstechnische Festlegung)

Boese [BoFr+16] hat in seinem Beitrag herausgearbeitet, dass in der Vorgehensweise keine explizite Rückkopplung mit dem Nutzer gefordert oder angedacht ist. Er beschreibt ausgehend vom der Schema nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI2211] eine Nutzereinbeziehung zur Lösungsfindung. Dazu ordnet er den vier Konstruktionsphasen unterschiedlichen Methoden der Nutzerintegration zu, vgl. Abbildung 2-5.

Etablierten Methoden fehlt es oft bei der Entwicklung fachspezifischer technischer Systeme an Tiefe. Grundel stellt in [GrAb16] ein hybrides Modell für die Entwicklung mechanischer und mechatronischer Systeme vor. Daraus entstand ein Modellierungsansatz zur Überwindung der Lücke zwischen einer modellbasierten, disziplinneutralen Systemdefinition und einer geometriebasierten CAD-Modellierung. Das vorgestellte SkiPo-Modell kombiniert die Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten eines Systems mit einer abstrakten Darstellung von Skizzen. Beide wissenschaftliche Beiträge zeigen auf, dass (durch eine tiefere Verknüpfung von Prozessen/Disziplinen) sich der Entwicklungsprozess für technische Produkte optimieren lässt.

2.1.3.1 Konstruktionsarten

Eine Grundvoraussetzung der konstruierenden Tätigkeit des Konstrukteurs ist die Beachtung unterschiedlicher Sichten. Die Sichten ergeben sich u. a. aus dem Neuheitsgrad der zu lösenden Aufgabe, dem Anlass des Konstruktionsauftrages und der Zuordnung des Konstruktionsbereiches. Der Neuheitsgrad wird unterteilt in drei Konstruktionsarten:

- Neukonstruktion: Ausführung aller Tätigkeiten vom Entwurf bis zum fertigen Produkt. Das Ergebnis ist ein neues Produkt.
- Anpassungskonstruktion: Ergänzende Anforderungen an gegebene Produkte, z. B. durch Kundenwünsche, werden durch neu zu konstruierende Teilbereiche erfüllt. Das Ergebnis ist ein anpassungsfähiges Produkt mit spezifischen Eigenschaften.
- Variantenkonstruktion: Nur durch Anpassung einer gegebenen Prinzipiellösung neu geschaffene Variante. Das Ergebnis ist ein Produkt, welches sich in vielerlei Anwendungen einsetzen lässt.

Nach Roller [Ro95] besitzt die Anpassungskonstruktion mit 55 % nach der Variantenkonstruktion mit 33 % den größten Anteil in der Produktentwicklung. Allerdings sind die Grenzen der jeweiligen Sichten, entsprechend des Anwenders, auf das zu entwickelnde Produkt subjektiver Natur. Nach Köhler [Kö02] lassen sich Anpassungskonstruktionen weiterhin in Produkte unterteilen, in welche die Forschung und Entwicklung involviert ist und in welche nicht. Diese Differenzierung ist für die Einordnung des Berechnungsaufwandes, wie auch zur Abschätzung des Optimierungspotenziales, hinsichtlich des Einsatzes von KBE-Methoden von Bedeutung.

2.1.3.2 Rechnergestütztes Konstruieren

Zur Bewältigung der vier Konstruktionsphasen nach Pahl/Beitz greift der Konstrukteur auf eine Vielzahl von Softwaresystemen zur Unterstützung zurück. Diese ermöglichen ihm die Durchführung von [PaFe+13]:

- Produktmodellierungen,
- Berechnungen,
- Optimierungen und
- Simulationen.

Im Bereich der Produktmodellierung bildet die Entwicklung dreidimensionaler CAD-Systeme einen Meilenstein der virtuellen Produktentwicklung. Historisch gesehen wird zwischen drei rechnerbasierten Verfahren (Draht-, Flächen- und Volumenmodelle) zur Beschreibung der Geometrie unterschieden [Ab05]. Den höchsten Informationsgehalt besitzen dabei die Volumenmodelle. Sie bieten den Vorteil einer eindeutigen, widerspruchsfreien und genauen Körperbeschreibung. Ebenso bilden sie eine detaillierte Informationsbasis, in der auch eine frühzeitige Beachtung von Fertigungs- und Berechnungsgerechtheiten möglich wird [KrGa+07]. Die Beschreibungsformen von Volumenmodellen werden in drei grundlegende Formen unterteilt, vgl. Abbildung 2-6.

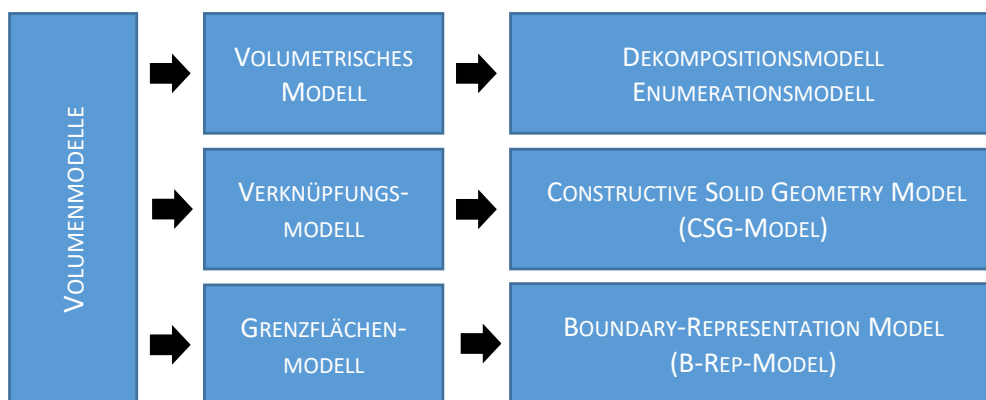


Abbildung 2-6: Arten von Volumenmodellen (nach [Lu09], [De04])

Zumeist wird im Bereich der Konstruktion eine Kombination des CSG- und B-REP-Modells angewendet, welche als hybrides Modell bezeichnet wird [Kl15b]. Volumetrische Modelle werden hauptsächlich als diskrete Geometriemodelle im Bereich der Berechnung und Simulation verwendet. Eine ausführliche Beschreibung ist u. a. in [Lu09] zu finden.

2.1.3.3 Grundlegende Modellierungstechniken

Für die Integration fortgeschrittener Simulationstechniken sind Kenntnisse über die verschiedenen Modellierungsstrategien der rechnergestützten Konstruktion unabdingbar. Die im späteren Verlauf gezeigte wissensbasierte Anreicherung eines CAD-Modells ist stark von der Art und Weise der Erzeugung und Anpassung des Geometriemodells abhängig. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigsten zusammenfasst. Ausführliche Beschreibungen sind u. a. in [VDI2209], [Kö16] zu finden.

Direkte Modellierung

Die direkte Modellierung findet Anwendung, wenn bereits ein CAD-Modell vorliegt, unabhängig ob im nativen oder neutralen Datenformat. Mit dieser Methode können unkompliziert Änderungen an der Geometrie vorgenommen werden. Dies funktioniert unabhängig von der zuvor gewählten Modellierungsstrategie. Somit sind nur bedingt Modellierungskennnisse erforderlich. Ein Einsatzgebiet ist z. B. die Definition von Idealisierungen im Rahmen eines Preprocessings bei numerischen Simulationen, wenn das CAD-Modell nur im neutralen Datenformat vorliegt. Dies ermöglicht ebenso die Durchführung von Parameteroptimierungen, vgl. Kapitel 2.3.1. Dabei wird versucht, die eigentliche Parametrik wiederherzustellen. Dazu wird eine Kombination aus direkter Modellierung und Featureerkennung genutzt. Die Voraussetzung dafür ist, dass das CAD-System über direkte Modellierung und eine integrierte Simulationsumgebung verfügt.

Parametrische Modellierung

Die Grundlage dieser Arbeitsweise stützt sich auf die bidirektionale Verknüpfung von einzelnen geometrischen Elementen durch Parameter und Zwangsbedingungen [An06], [Lu09]. Dies gewährleistet Möglichkeiten zur nachträglichen Anpassung der erstellten Modelle. Generell sind unterschiedliche Systemtechniken zur Lösung des Gleichungssystems verfügbar, wie der parametrische Ansatz oder der Variationsansatz [Du08a], [Lu09]. Parametrisch-assoziative Systeme sind die Erweiterung von reinen parametrischen Systemen [Lu09]: „*Zwischen den einzelnen Geometrieelementen und Modellobjekten können unidirektionale Assoziationen aufgebaut werden.*“ Methoden zum Aufbau parametrisch-assoziativer Modelle sind Inhalt zahlreicher Veröffentlichungen [Se94], [SpKr97], [Kö16].

Featurebasierte Modellierung

Als defacto Standard ist die featurebasierte Modellierung durch die Anwendung in den meisten CAD-Systemen definiert. Die Definition des Begriffs „Feature“ ist, bedingt durch einen hohen Interpretationspielraum, vielfach unterschiedlich. Definitionen sind u. a. in [Ru91], [Lu09], [VDI2249] zu finden. Herausgehoben werden soll die VDI-Richtlinie 2218 [VDI2218]. Kesselmans fasst die Definition dieser wie folgt zusammen [Ke14]:

- Die Aggregation von (Form-)Elementen (Flächen- oder Volumenverbänden) mit einer Option des Hinzufügens einer Semantik.
- Die Abbildung und Wiederverwendung von Expertenwissen als das Bindeglied zur Wissensverarbeitung.
- Die Integration von rechnerunterstützten Prozessketten (CAD-CAE), was sich in der Abbildung von Prozessen widerspiegelt.

Die Endgestalt eines Geometriefeatures oder Konstruktionselements ergibt sich aus der Korrelation von geometriebestimmenden Parametern und Konturen. Die Stärken der featurebasierten Modellierung zeigen sich besonders in der Kombination mit der zuvor erwähnten parametrischen Modellierung, da dadurch eng an der Fertigung orientierte Produktmodelle vorliegen [Kl15b]. Die Reihenfolge und Abhängigkeiten der einzelnen Modellierungsschritte lassen sich in der festgehaltenen Konstruktionshistorie, zumeist als Modellbaum, ableiten. Jedes CAD-System verfügt über eigene Features, welche sich systemübergreifend ähneln.

UDFs

Von großer Bedeutung ist, dass neben den vom System vordefinierten Features auch eigene (benutzerspezifische) Features (engl. User Defined Feature, abk. UDF) definiert werden können. Dabei beschränkt sich die Definition eines UDFs nicht nur auf die Geometrie. Vielmehr können zusätzlich oder lediglich nur semantische Informationen, wie auch Regeln definiert werden. Die Platzierung der UDFs kann in den meisten CAD-Systemen unabhängig oder abhängig von der ursprünglichen Referenz erfolgen.

Komponentenfamilie

CAD-Modelle, welche oft in einer unterschiedlichen Variante verwendet werden, wie Norm- und Wiederholteile, werden über Baukastensysteme definiert. Grundlage dafür ist, dass die Referenzteile durch ihren Aufbau im gewollten Rahmen anpassbar modelliert sind. Gerade in der Kombination mit UDFs findet diese Methode häufig Anwendung, [Hu16], [Lu09]. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass: *„mittels (selbstprogrammierter) Konfiguratoren ... bestimmte Zusammenhänge automatisiert und der Aufbau somit weiter beschleunigt werden“* kann [Kl15b].

Es wird deutlich, dass die Feature-Technologie als die informationstechnische Grundlage für eine integrierte Abbildung des Produktlebenszyklus gilt [VaBl+09], [Kö16]. Zu den vorgestellten Modellierungsstrategien, insbesondere der featurebasierten Modellierung, sind zahlreiche Veröffentlichungen zu finden. Exemplarisch werden im Folgenden einige für diese Arbeit wichtige vorgestellt.

Die an einem früheren Punkt besprochene Verwendung von 3D-Mastermodellen zeigt gerade in Verbindung mit der Feature-Technologie ihre Stärken. Ein erster Schritt zur simulationsgerechten Integration der Prozesskette CAD-CAE ist der Ansatz von Lee [Le05]. Er verwendet in seiner Methode ein Mastermodell, welches das geometrische Modell für das CAD und ein idealisiertes Modell für das CAE beinhaltet. Damit wird eine automatisierte Dimensionsreduktion gewährleistet.

Skypkens Smit [SmBr09] entwickelte den Ansatz von Lee weiter. Er beschreibt in seinem Beitrag einen Ansatz für eine Multiple-view-Feature-Modellierungsmethode [SmBr09]: *“Multiple-view feature modelling can do better here, by providing a separate view on a product for each development phase, and integrating all views. Each view contains a feature model of the product specific for the corresponding phase.”*

Hoffman [Ho02] zeigt, wie zusätzlich neben geometrischen und berechnungsrelevanten Informationen auch experimentell ermittelte Daten in ein Feature integriert werden können. Dazu entwickelte er das Konstruktionsunterstützungssystem „KoBo“. Dabei definiert er für die Features unterschiedliche Hierarchiestufen. Diese sind abhängig vom Informationsgehalt der Features selbst.

Neben der Integration von berechnungsrelevantem Wissen greifen viele Forschungsarbeiten auch das Thema der Fertigungsgerechtigkeit in Verbindung mit der Feature-Technologie auf. HUMPA präsentiert in seiner Dissertation am Beispiel einer Welle, wie ein fertigungsgerechter Aufbau eines CAD-Modells aussehen kann [Hu16]. Dies sichert er durch eine frühzeitige Integration von CAM-Informationen in von ihm definierten UDFs ab.

Im Bereich des spritzgussgerechten Bauteilentwurfs ist der Beitrag von Deng [DeBr+07] zu nennen. Er entwickelte ein System für eine integrierte Bauteilauslegung. Dabei wurden im Rahmen der CAD-CAE-Kopplung die Softwaresysteme Solid Edge und Moldflow verknüpft. Hier wurden spritzgussgerechte Konstruktionsfeatures und eine Schnittstelle zwischen den beiden Systemen entwickelt. Auch er verwendete zur Definition neuer Konstruktionsfeatures die Möglichkeit der Erstellung dieser als UDF.

2.1.3.4 Qualität von CAD/CAE-Daten

Wird mit CAD- und CAE-Systemen gearbeitet, muss immer auch die Qualität der Daten hinterfragt werden, vgl. [St07], [Hu16]. Stekolschik [St07] definiert die Modellqualität wie folgt:

„Die CAD-Modellqualität ist ein Maß für die Fähigkeit des CAD-Modells, eine oder mehrere Anforderungen von CAD-Modellkunden zu erfüllen.“ Unter CAD-Modellkunden versteht er *„eine Person, ein Anwendungssystem oder eine Organisationseinheit, die ein CAD-Modell oder Teile eines CAD-Modells verwendet und/oder verwertet.“* Der Ansatz ist in diesem Fall kundenbezogenen und nicht produkt- oder modellbezogen. Bei einem produktbezogenen Ansatz stehen die Eigenschaften des CAD-Modells für sich im Mittelpunkt der Betrachtungsweise.

In den meisten CAD-Systemen haben sich Prüfsysteme durchgesetzt, welche viele der Softwarehersteller in ihre Systeme von vornherein integriert haben [Hu16]. Mit diesen werden bestimmte Anforderungen des Modells, meist in Form von Checklisten, abgefragt. Die Anforderungen beschränken sich dabei nicht nur auf geometrische, sondern auch semantische Aspekte. Benutzerdefinierte Abfragen können zumeist über ein Application Programming Interface (API) implementiert werden. Eine Anwendung an der Schnittstelle CAD-CAE bieten diese Tools besonders im Rahmen des Preprocessing. Somit können geometrische Vereinfachungen, wie z. B. das Unterdrücken von Rundungen und Fasen, welche nicht im Kraftfluss liegen, bei einer frühzeitigen Prüfung der Grob- und Feingestaltung effizienter durchgeführt werden. Ebenso kann geprüft werden, wie viele Bemaßungen in einer Skizze verwendet wurden. Beim Überschreiten eines Grenzwertes wird dem Anwender ein Hinweis gegeben. Dies gewährleistet bei einer Parameteroptimierung, welche meist im Umfang konstruktionsbegleitender Simulationssysteme vorhanden ist, eine größere geometrische Stabilität [Kl15b].

Stark zeigt in seinem Beitrag [St]o14 eine globalere Sichtweise der Qualität auf. Durch die zunehmende Digitalisierung des gesamten Produktentwicklungsprozesses wird eine Optimierung der Produktentwicklung angestrebt. Auf Basis von Experteninterviews wird die Notwendigkeit einer systematischen Unterstützung zur Qualitätsabsicherung und Risikobewertung von KMUs im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung präsentiert. Dabei zeigt er auf, dass im Bereich der Simulation numerische Berechnungen durchgeführt werden und die Ergebnisse und Validierung und Plausibilitätsprüfung in die weitere Produktentwicklung mit einfließen.

2.1.4 Berechnung und Simulation in der Produktentwicklung

Durch die immer engere Verknüpfung der Disziplinen Konstruktion und Berechnung wird vom Konstrukteur erwartet, auch fortgeschrittene Berechnung selbstständig durchzuführen. Die VDI-Richtlinie 2211 [VDI2211] vermittelt dem Konstrukteur eine methodische Vorgehensweise zur Anwendung von Berechnungsverfahren in Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen. Standardmäßig erfolgt die Einordnung von Berechnungsverfahren in den Konstruktionsprozess über eine Zuordnung ihrer Aussagegüte und des Zeitaufwandes. Vor-

dergründig steht die Aussage, dass der Konstrukteur möglichst viele Berechnungen mit geringen Zeitaufwand schaffen soll [VDI2211]. Dazu wurde ein ABC-Konzept entwickelt, mit welchen sich Berechnungs- und Bewertungsmethoden zuordnen lassen, vgl. Abbildung 2-7.

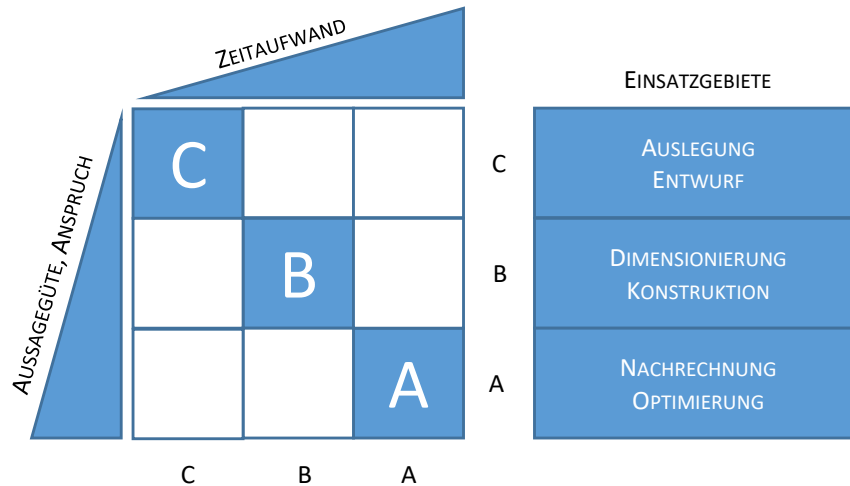


Abbildung 2-7: ABC-Konzept (nach [VDI2211])

Ziel ist es, Methoden zu entwickeln, um Berechnungen mit einer hohen Aussagegüte und Anspruch mit geringen Zeitaufwand durchführen zu können. Das heißt, dass z. B. häufig eingesetzte B- und A-Methoden mit dem Ziel optimiert werden müssen, dem Anwender als C Methode zur Verfügung gestellt zu werden. An diesem Punkt setzten viele wissenschaftliche Beiträge, welche zu einem späteren Zeitpunkt vorgestellt werden, wie auch diese Arbeit an.

Das ABC-Konzept lässt sich nicht nur auf bestehende, sondern auch auf neu zu entwickelnde Systeme anwenden. Mirkheshti zeigt in seiner Dissertation [Mi06] Konzepte zur Entwicklung und Integration von produktabhängigen und produktklassenabhängigen Berechnungen sowie von verteilten Berechnungsprozessen für den Produktentwicklungsprozess auf. Dabei arbeitet er in seiner Analyse der Systemeigenschaften heraus, dass, je höher die Ansprüche an die Aussagegüte einer Berechnung sind, das Kopplungspotenzial umso geringer einzuschätzen ist. Das Kopplungspotenzial beschreibt dabei die Möglichkeit einer bidirektionalen Kopplung zwischen Gestaltung und Berechnung. Dementsprechend ordnet er Aussagegüten, die der A- und B-Ebene entsprechen, ein geringes und mittleres Kopplungspotenzial zu.

Neben der generellen Einordnung der Berechnungsverfahren nach Aufwand und Aussagegüte können diese ebenfalls einer Berechnungsart zugeordnet werden. Allgemein wird nach den folgenden Berechnungsarten unterschieden [VDI2211]:

- Auslegungsrechnung
- Nachrechnung

- Optimierungsrechnung

Mittels der Auslegungsrechnung ermittelt der Konstrukteur bei vorliegenden Anforderungen wichtige Produkteigenschaften über die Struktur, die Abmessungen und über das Material. Wichtig ist an dieser Stelle das frühzeitige Beachten von Berechnungsvorschriften. Ob die Eigenschaften der Konstruktion die vorgegebenen Anforderungen erfüllen, wird mit einer Nachrechnung überprüft. Dementsprechend liefert diese Ergebnisse, welche das Verhalten des Produktes beschreiben. Die Optimierungsrechnung findet Anwendung, wenn ausgehend von einer bestehenden Konstruktionslösung bezüglich einer oder mehrerer Gütekriterien eine optimierte Konstruktionslösung berechnet wird.

Die genannten Berechnungsverfahren werden hauptsächlich im Rahmen der Prinzip- und Gestaltmodellierung eingesetzt, vgl. Abbildung 2-8. Für eine gezielte Vermeidung von Schwachstellen müssen Kenntnisse bestimmter Produkteigenschaften frühzeitig im Produktentwicklungsprozess vorliegen [VDI2211].

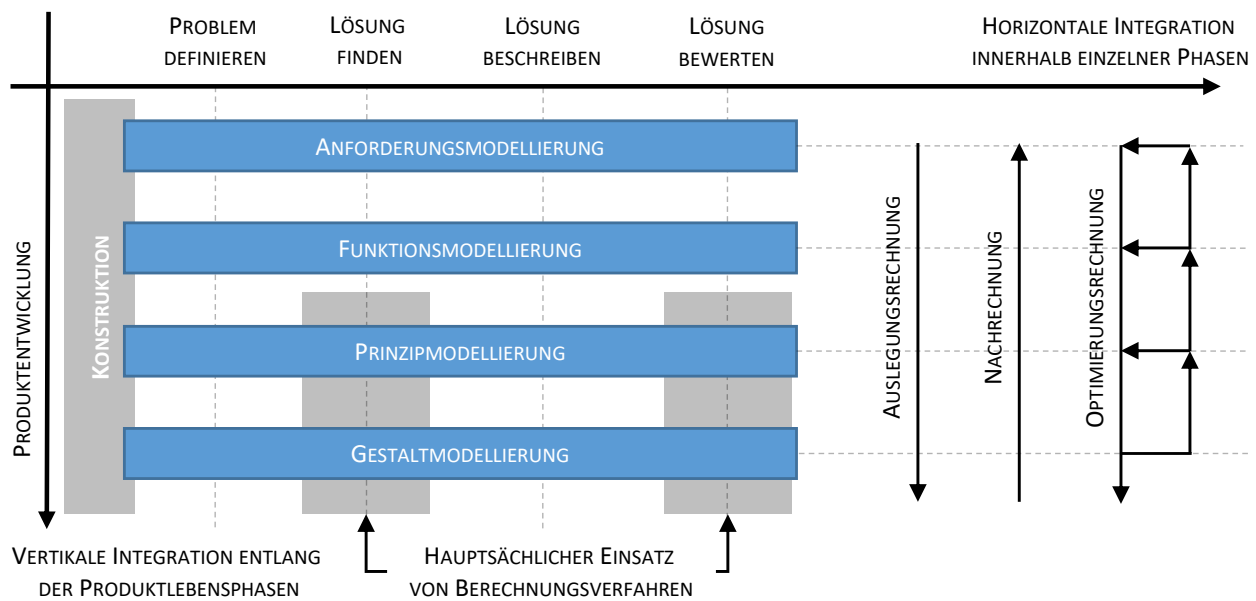


Abbildung 2-8: Integration von Berechnungsverfahren (nach [VDI2211])

Generell werden Berechnungsverfahren in analytische und numerische eingeteilt. Der Einsatz der jeweiligen Methode ist abhängig vom jeweiligen Problemfall. Die Anwendung wird teilweise durch genormte Regelwerke unterstützt, vgl. [VDI2230-2], [DIN13445]. Die Abgrenzung der beiden Methoden wird über ihre jeweiligen Vor- und Nachteile deutlich. Kesselmans definiert als Vorteile der analytischen Methoden gegenüber der numerischen Methoden [Ke14]:

- juristisch belastbarer,
- verhältnismäßig leichter Zugriff auf die Berechnung,

- Ergebnisse liegen in einer strukturierten, reproduzierbaren und personenunabhängigen Form vor,
- in der Regel geringerer Berechnungsaufwand.

Ab einer bestimmten Komplexität des Berechnungsmodells überwiegen die Vorteile der numerischen Berechnung, da keine analytisch beschreibbare Lösung gefunden werden kann. Dass numerische Berechnungen einen hohen Anteil an Expertenwissen benötigen und dementsprechend weniger personalgebunden und reproduzierbar sind, muss durch das Standardisieren von Pre- und Postprocessing-Abläufen durch Richtlinien kompensiert werden. Die zuvor genannte VDI Richtlinie 2230 [VDI2230-2] legt das Vorgehen für Schraubverbindungen fest. Allerdings handelt es sich bei dieser Richtlinie um eine der wenigen, welche sich mit der Anerkennung der numerischen Berechnungsverfahren als (belastbares) Nachweisverfahren auseinandersetzen [Ke14]. Die momentane Situation beschreibt dagegen eher die DIN EN 13445 [DIN13445]. Sie dient der Auslegung von unbefeuerten Druckbehältern und beschreibt zur Ermittlung von Strukturspannungen, dass diese durch numerische Berechnungsverfahren ermittelt und als Berechnungsbasis verwendet werden. Eine Standardisierung und Unterstützung für eine numerische Simulation bietet sie nicht.

2.2 Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung in CAD-Prozessen

Viele Forschungseinrichtungen beschäftigen sich mit neuen Lösungsansätzen zu einer tiefergehenden Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung in CAD-Systemen. Historisch gesehen war erster Schritt das von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) 1994 ausgerichtete Schwerpunktprogramm zum Thema „Innovative rechnergestützte Konstruktionsprozesse“. An dem Programm waren insgesamt 29 Forschungsstellen beteiligt [De02]. Der Fokus der Forschungsvorhaben sollte dabei auf einer ausgewogenen Verknüpfung von Konstruktions- und Gestaltungsmethodik, Konstruktionsberechnung und Informationstechnik liegen [Ke14], [Me99]. Wichtige Teilthemen ergaben sich hierbei aus der sog. Schnittstellenproblematik und den fehlenden Möglichkeiten zur Abbildung der Parametrik in neutralen Datenformaten, was eine durchgängige Verknüpfung verhindert. Bevor dies aber thematisiert wird, werden die notwendigen Grundlagen zu analytischen und numerischen Berechnungsverfahren erläutert.

2.2.1 Analytische Berechnungsverfahren

Analytische Verfahren sind definiert als Verfahren, welche einen expliziten Zusammenhang zwischen Parametern in Form mathematischer Ausdrücke beschreiben. Die Einbindung in ein CAD-System kann mit unterschiedlichen Methoden erfolgen. Im Folgenden werden einige erläutert.

Parameterbeziehung

Die Integration einfacher analytischer Berechnungen erfolgt zumeist über Parameterbeziehungen, welche direkt in das CAD-System implementiert werden. Häufig verfügen CAD-Systeme über Editoren, in denen die Berechnungsvorschrift definiert wird. Weiterhin kann unterschieden werden, ob technische Parameter (z. B. Lasten, Materialkennwerte, etc.) zuvor als lokale Parameter im Modell oder erst im Editor durch eine Wertzuweisung definiert werden. Ebenso können Parameter aus gespeicherten Analysen verwendet werden. Die Analysen beschränken sich dabei nicht nur auf einfache Geometrieanalysen. Eine Einbeziehung von Ergebnisparametern aus einer strukturmechanischen Simulation, welche konstruktionsbegleitend durchgeführt wurde, ist ebenfalls möglich. Dies gilt ebenfalls für Parameter aus Mehrkörpersimulationen. Anwendung finden Parameterbeziehungen u. a. bei Parameteroptimierungen oder bei der Definition einfacher Abhängigkeiten bei Geometrieparametern.

Mathematische Software

Eine weitere Methode ist die Einbindung von Berechnungen über Excel (Microsoft Corporation) oder mathematischer Software. Dies birgt den Vorteil eines erweiterten Funktionsumfangs, wie auch die Verwendung der jeweiligen Solver für Optimierungen. Bei einigen CAD-Systemen gehört eine mathematische Software zum Standardumfang. Durch eine integrierte Schnittstelle wird der Datenaustausch abgesichert. Der Parameteraustausch erfolgt in der Regel bidirektional.

Branchenspezifische Software

Die Einbindung branchenspezifischer Software ist die Fortführung der Einbindung reiner mathematischer Software. Die meisten Softwareprodukte laufen eigenständig und verfügen meist über Datenschnittstellen mit einem CAD-System. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig, die meisten Produkte dienen aber der Auslegung von Norm- und Wiederholteilen. Die Basis der meisten Systeme sind Normen und Richtlinien und damit bekannte, offiziell festgelegte Berechnungsvorschriften. Die Kopplung mit CAD-Systemen erfolgt in den meisten Fällen bidirektional. Für fortgeschrittene Verknüpfung verfügen einige Systeme über ein API, wie z. B. die Software KISSsoft (KISSsoft AG), welche der Auslegung diverser Maschinenelemente dient.

Eigenständig entwickelte Softwarelösungen

Sind die Möglichkeiten der mathematischen oder der branchenspezifischen Lösungen erschöpft, ist die nächste Stufe die Entwicklung individueller Softwarelösungen. Das Berechnungsprogramm kann direkt in das CAD-System implementiert werden. Dafür sind APIs notwendig, über welche die meisten CAD-Systeme verfügen.

Forschungen zur Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung fokussieren sich hauptsächlich auf die Erweiterung qualifizierter Komponentenschnittstellen, um fortgeschrittene funktionale bzw. berechnungsrelevante Abhängigkeiten zu verankern. Zum Stand der Technik werden zwei für diese Arbeit relevante Beiträge vorgestellt.

Kesselmans präsentiert in seinem Artikel einen informationstechnischen Lösungsansatz, welcher sich über den wissensbasierten Aufbau notwendiger Partialmodelle definiert [KeKö13]. Zu diesen komponentenübergreifenden Abhängigkeiten ist der Begriff der höherwertigen Konstruktionsobjekte entstanden [Ke14]. Diese sollen den Konstrukteur unterstützen, um Inkonsistenzen zwischen dem CAD- und dem Berechnungsmodell zu vermeiden. In der Abbildung 2-9 ist das Modell dargestellt. Das CAD- und das Berechnungsmodell sind bidirektional verknüpft. Das gezeigte Modell basiert auf einem parametrischen Mastermodell. Das Objekt selbst verfügt über verschiedene Schnittstellen, über welche mit dem Konstrukteur und anderen Komponenten interagiert werden kann. Für die Definition des internen Verhaltens ist es möglich, alle gegebenen Funktionen zur Spezifikation der Gestaltungsabsicht zu verwenden [Ke14].

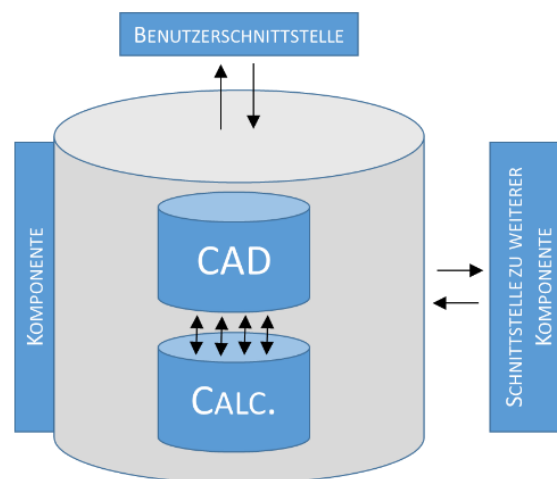


Abbildung 2-9: Höherwertige Konstruktionsobjekte (nach [Ke14])

Bei der Arbeit mit höherwertigen Konstruktionsobjekten erfolgt die analytische Auslegung einer Komponente mit der Platzierung in einer Baugruppe. Dieser Prozess erfolgt dann für alle Komponenten simultan und ist erst nach Auslegung aller Komponenten abgeschlossen [Ke14].

Dyla wählte in seiner Dissertation für eine durchgehende rechnerunterstützte Produktentwicklung den folgenden Weg. Er erstellte programmiertechnisch enge Verknüpfungen zwischen Produktmodellen und analytischen Berechnungsprogrammen. Sein Schwerpunkt lag hierbei in der Getriebeberechnung und der Verwendung systemneutraler Geometriedaten.

Seine Basis zur Sicherung und Verwaltung aller relevanten Produktdaten stellt ein eigenständiges systemneutrales Produktmodell dar [Dy02].

2.2.2 Numerische Berechnungsverfahren

Numerische Berechnungsverfahren finden Einsatz, wenn aufgrund komplexerer Berechnungsmodelle keine mathematisch exakte Lösung gefunden werden kann [Kö02]. In der Produktentwicklung wird generell, bei der Verknüpfung von Konstruktion und numerischen Berechnungsverfahren, zwischen integrierten Verfahren und Stand-Alone-Lösungen unterschieden, vgl. Abbildung 2-10. Mit integrierten Verfahren sind Softwarelösungen gemeint, welche direkt an das CAD-System angegliedert sind. Dies dient hauptsächlich der Durchführung von konstruktionsbegleitenden Simulationen durch den Konstrukteur.

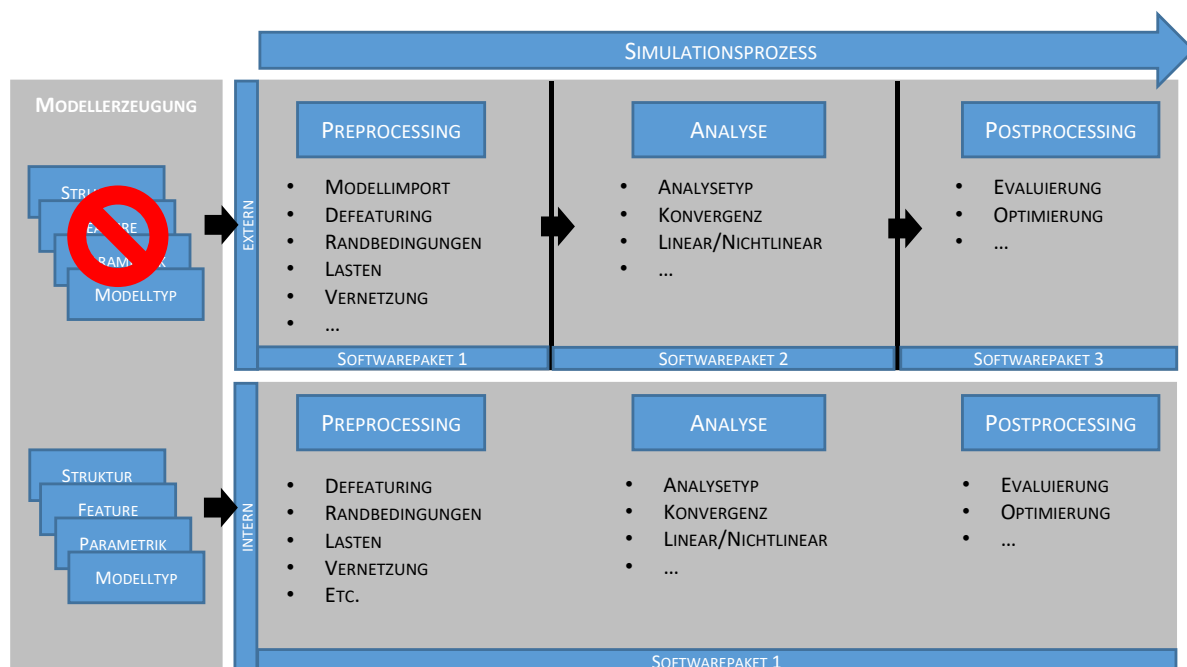


Abbildung 2-10: Externe und interne Simulation (nach [Kl15a])

Bei den in CAD-Systemen integrierten Simulationstools handelt es sich zu meist um Finite-Elemente- (FE-), Strömungs- (CFD-) oder Mehrkörpersimulationen (MKS). Allerdings bieten integrierte Tools häufig nur eine eingeschränkte Funktionalität im Vergleich zu den Stand-Alone-Lösungen. Stand-Alone-Lösungen werden dementsprechend zumeist bei fortgeschrittenen speziellen Anwendungsfällen verwendet. Vorteilhaft bei integrierten Lösungen ist, dass eine direkte Anbindung an das CAD-Modell gegeben ist, sodass die Geometrie und verschiedene Metadaten nicht erst über neutrale Schnittstellenformate übertragen werden müssen.

Der Ablauf einer FE-Analyse gliedert sich in drei Prozessschritte, das Preprocessing, die Analyse und das Postprocessing. Das Preprocessing beinhaltet die Modellbildung und Überprüfung. Die Modellbildung beinhaltet die Definition der drei Partialmodelle des Simulationsmodells. Das Simulationsmodell besteht aus drei Partialmodellen: dem Geometrie-, Material- und Belastungsmodell. Die wesentlichen Möglichkeiten zur Aufbereitung der Bauteilgeometrie beim Preprocessing sind:

- Die Modellkonvertierung: Nach Möglichkeit sollten Modelle in der niedrigsten Dimension analysiert werden.
- Die Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften: So ist nur die Analyse eines Teils eines symmetrischen Modells notwendig.
- Bei konstruktionsbegleitenden Simulationen zusätzlich das Unterdrücken von Konstruktionselementen (KE): Alle KEs, welche nicht unmittelbar im Kraftfluss liegen, können entfernt werden.

Alle drei Vorgehensweisen minimieren die benötigte Rechenzeit und vereinfachen den Modellaufbau. Allerdings verlangt schon die Aufbereitung der Modellgeometrie ein gewisses Know-how des Anwenders, da die Systeme in diesen Schritten keine Unterstützung bieten.

Eine wissensbasierte simulationsgerechte Absicherung lässt sich bei integrierten Simulationsumgebungen in der Regel unkomplizierter umsetzen als bei der Verwendung externer Systeme. Begründet ist dies in der direkten Anbindung an die CAD-Umgebung. Eine Wissensanreicherung kann durch den Wegfall von neutralen Schnittstellenformaten und die Verwendung einer gleichen Datenbasis optimaler gestaltet werden.

Bei Stand-Alone-Lösungen ist die Schnittstellenproblematik eines der Hauptmankos bei der Verwendung externer Simulationsumgebungen. Aber auch hier wurden unterschiedliche Ansätze für fortgeschrittene Simulationsmethoden entwickelt, welche im Folgenden vorgestellt werden.

Die ersten Beiträge, welche sich inhaltlich mit der tiefgehenden Verknüpfung von CAD/CAE beschäftigen, thematisieren zumeist eine automatische Vereinfachung des CAD-Modells [ArBa+93], [Le05], [SmBr09]. In mehreren Beiträgen wurde die Verknüpfung durch die Verwendung von Mastermodellen optimiert, welche ein geometrisches Modell für das CAD und ein idealisiertes Modell für das CAE beinhalten. Damit wird eine automatische Dimensionsreduktion gewährleistet. Ein aktueller Beitrag dazu ist der von Boussuge [BoSh+14]. Er stellte eine simulationsgerechte Übertragung der Geometrie sicher, indem er die Geometrie des CAD-Modells in relevante Unterdomänen separiert, welche dann über ein neutrales Datenformat in die Simulationsumgebung geladen werden.

Aktuelle wissenschaftliche Beiträge im Bereich der konstruktionsbegleitenden Simulation beschäftigen sich mit dem Aufbau wissensbasierter FE-Assistenzsysteme [Kl15b],

[KeWa16]. Kestel präsentiert in seinem Beitrag [KeWa16] ein System, welches den Konstrukteur bei der Durchführung fortgeschrittener Simulation unterstützt. Der Fokus liegt dabei auf der Simulation verschraubter und geschweißter Blech- und Profilkonstruktionen. Anwendung finden dabei die Softwaresysteme ANSYS Workbench und Creo Parametric. Er entwickelt CAE-Features im CAD-System, welche geometrische wie auch berechnungsrelevante Informationen enthalten. Damit sichert er einen automatisierten Aufbau des Simulationsmodells ab.

Ein Trend bei integrierten Berechnungsverfahren ist der RFLP-Ansatz (RFLP: Requirements, Functional, Logical und Physical), der eng mit dem Softwaresystem Catia (Dassault Systèmes) verbunden ist. Dieser Ansatz unterstützt den integrativen Ansatz des Systems Engineering in einem CAE-System. Dabei werden das Anforderungsmodell, das Funktionsmodell, das logische Modell und das physikalische Modell, welches hier dem CAD-Modell entspricht, in einem integrierten Datenmodell verknüpft. Anwendung findet dies hauptsächlich bei der Entwicklung von mechatronischen Komponenten [Ke14].

2.2.3 Grenzen der Berechnungsintegration

Zwei wichtige Begriffe zur Beschreibung der Grenze bei der Verknüpfung von Konstruktion und Berechnung sind die Schnittstellenproblematik und die Konstruktionsbarriere. Dies zeigen auch die zuvor dargestellten Veröffentlichungen. Mit externen Berechnungsverfahren lassen sich komplexere Prozesse abbilden, diese sind aber durch eine Datenübergabe oft über selbst zu programmierende Schnittstellen aufwändig zu verknüpfen. Dementsprechend liegt der Fokus von externen Verfahren auf der simulationsgerechten Abbildung von Prozessen, bei integrierten Verfahren dagegen eher auf dem simulationsgerechten Modellaufbau. Zur Gewährleistung einer einheitlichen Datenbasis hinsichtlich der Absicherung simulationsgerechter Produktmodelle müssen die Stärken beider Verfahren kombiniert werden.

Mit der Konstruktionsbarriere sind die verschiedenen Sichten des Konstrukteurs und des Berechners auf ein Modell gemeint. Der Konstrukteur legt seinen Fokus auf Gerechtheiten, wie die fertigungsgerechte Konstruktion, und definiert sein Modell dementsprechend. Dieses wird an den Berechner übergeben. Das (Simulations-)Modell leitet sich daraus ab. In dem meisten Fällen ist das gegebene Modell nicht ausreichend vorbereitet, um ein vollständiges Preprocessing einer Simulation durchzuführen. Daraus resultiert ein iterativer Prozess mit Rückfragen des Berechners an den Konstrukteur. Eine Zusammenfassung von verschiedenen Methoden zur Optimierung dieses Prozesses sind u. a. in [Du08a], [Kl15b] zu finden. Klemme untersucht unterschiedliche Einflüsse der verwendeten Simulationswerkzeuge und der gegebenen IT-Infrastruktur [Kl15b]. Darauf aufbauend zeigt er diverse Problemfelder zur Definition simulationsorientierter Produktmodelle auf.

Ein Nachteil vieler Simulationsprozesse ist die Sicherung der Simulationsdaten nach Abschluss der Simulation. Zumeist gehen alle Zwischenergebnisse, die Entscheidungsgrundlagen und weitere Versionen und Varianten, welche nicht mehr Bestandteil der Entscheidungshistorie sind, verloren [Du08a], [SeWa11]. Gerade aber dieses Wissen ist wichtig für eventuelle Nachweispflichten bei Unfällen usw. [SeWa11]. Bei einer Integration dieser Prozesse in ein SDM (Simulation Data Management)- oder PLM (Product Lifecycle Management)-System (vgl. Kapitel 2.4) müssen die genannten Daten und Informationen gesammelt und geordnet werden, um diesen wichtigen Meilenstein der Entwicklungshistorie eines Bauteils zu sichern.

2.3 Optimierungsverfahren in der Produktentwicklung

Der Einsatz von rechnergestützten Optimierungsverfahren gehört im Rahmen der heutigen Produktentwicklung zum Stand der Technik und ersetzt das zeit- und kostenintensive Trail-and-Error-Verfahren. Automatisiert werden dem Anwender Vorschläge für eine optimalere Produktgestaltung dargelegt. Im Folgenden wird der Stand der Technik für unterschiedliche Arten der Optimierung präsentiert. Der Hauptfokus liegt dabei auf den parameterbasierten Optimierungsstudien, da diese für den weiteren Verlauf dieser Arbeit die größte Rolle spielen.

2.3.1 Parameterbasierte Optimierungsstudien

Die parameterbasierte Optimierung beschreibt die computergestützte Änderung einzelner Bauteilparameter. Es kann auch von einer CAD-basierten Formoptimierung gesprochen werden, da die Optimierung an bestimmte Parameter eines parametrisierten CAD-Modells gekoppelt ist [Ha07]. Im Bereich der numerischen Simulation findet dieses Verfahren in integrierten Simulationsumgebungen oder externen Simulationsumgebungen Anwendung, welche eine Schnittstelle zum CAD-System besitzen. Ein CAD-Bauteil ist somit bereits vorhanden. Dem Anwender ist damit ein Werkzeug gegeben, sein Modell hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien, wie z. B. der Ausnutzung von Materialeigenschaften, Senkung des Materialverbrauchs und Kosten zu bewerten und zu optimieren [Ha07]. Es ist erforderlich, dass neben dem Simulationsmodell ein Optimierungsmodell definiert wird. Dieses beinhaltet alle Designvariablen, Variationsvorschriften, Nebenbedingungen und Ziele. Die Designvariablen beschreiben geometrische Größen, welche in definierten Grenzen (Variationsvorschriften) hinsichtlich ihres Optimierungsziels variiert werden. Nebenbedingungen sind Kriterien, welche neben dem Ziel der Analyse ebenfalls erfüllt sein müssen. Weil die zu variiierenden Parameter zu Beginn ausgewählt werden müssen, muss notwendigerweise auch das Optimierungsziel von vornherein bekannt sein.

Die Parameteroptimierung findet bei vielen wissenschaftlichen Lösungsansätzen Anwendung. Die Anforderungen, um ein CAD-Modell zwecks geometrisch-parametrischer Gestaltoptimierung in einem Simulationskreislauf einzubinden, wurden in [Kl15b] untersucht. In diesem Ansatz werden höherwertige Mastermodelle vorgestellt, welche durch sich selbst prüfende und regelnde Features eigenständig agieren. Im Beitrag wird ein solcher iterativer Kreislauf dargestellt. Dieser basiert auf der assoziativen Verknüpfung nativer CAD-Daten, einem CFD-Simulationsprozess und einer anschließenden Bewertung und Variation durch Optimierungssoftware [Kl15b].

Das Konzept von Böhme [BöLi+12] zur Auslegung von stationären Wirbelschichtfeuerungsanlagen zeigt eine Verknüpfung eines gesamten Auslegungsprozesses. Sie verknüpften verschiedene Softwaresysteme (Inventor (Autodesk), Excel (Microsoft Corp.), Creo (PTC) und ANSYS (Ansys)) und verwendeten bei ihrer Methode eine gemeinsame Parameterbasis, welche auf den Austausch von Geometriemodellen verzichtet und nur Parameter weitergibt.

Einen parameterbasierten Austausch von Daten mit zugehörigen Systemaufrufen präsentiert Te Heesen in seiner Dissertation [Te15]. Inhalt seiner Arbeit ist u. a. die Verknüpfung der drei Domänen CAD, Strömungssimulation und Optimierungssoftware zur Formoptimierung von Strömungskanälen von Kunststoffextrusionswerkzeugen am Beispiel von Wendelverteiltern.

2.3.2 Formbasierte Optimierungsstudien

Formbasierte Optimierungsstudien beschreiben eine computergestützte Änderung der äußeren Bauteilform, hier mit dem Fokus auf netzbasierten Verfahren. Das heißt, dass die Geometriebeschreibung allein über das FE-Netz erfolgt. Dieses kann aber aus einem CAD-Modell abgeleitet sein. Allgemein wird bei der netzbasierten Formoptimierung zwischen zwei Optimierungsverfahren unterschieden. Bei beiden ändert sich die Netztopologie nicht. Die erste Methode ist die Beschreibung der Formvariation über Formbasisvektoren. Die Grundlage dieser Methode ist, dass die Koordinaten aller Netzknoten zu einem Vektor R zusammengefasst werden. Dieser beschreibt die Ausgangsform des Bauteils. Die Formvariation wird erzeugt, indem zum Vektor R ein Verschiebungsvektor T hinzuaddiert wird. Dieser Vektor, welcher Formbasisvektor genannt wird, enthält alle Verschiebungen der einzelnen Knoten. Zur Variation wird der Formbasisvektor mit einer Variablen, welche in den Grenzen zwischen 0 und 1 definiert ist, multipliziert. Bei einer Optimierung komplexer Bauteile werden Formbasisvektoren, bezogen auf verschiedene Partitionen des Bauteils, unterschiedlich gewichtet und variiert. Dies kann auch dazu führen, dass jeder Formbasisvektor unterschiedlich gewichtet wird [Ha07].

Die zweite Methode ist das Computer Aided Optimization-Verfahren (CAO). Die Formoptimierung ist hier einer biologischen Wachstumsregel nachempfunden [Ha07]. Die beiden Optimalitätskriterien lauten:

- Zusätzliches Material an höher belasteten Stellen
- Weniger Material an niedriger belasteten Stellen

Das ursprüngliche Verfahren wurde am Karlsruher Institut für Technologie entwickelt [MaBe05]. Mit dieser Methode wird die Wachstumssimulation indirekt durchgeführt. Indirekt, weil die Wachstumsschicht vom Anwender modelliert werden muss. Bei der direkten Methode entfällt die Definition einer Wachstumsschicht. Stattdessen muss vom Anwender eine Wachstumsschicht definiert werden, welche aus den Knotenpunkten an der Bauteiloberfläche bestehen. An diesen wird dann die Differenz der Knotenpunktspannung und der Referenzspannung gebildet. Die Wachstumsverschiebung ergibt sich aus dem Produkt der Differenz mit einem Skalierungsfaktor und einem Richtungsvektor [Ha07]. Tiefergehende theoretische Hintergründe zu beiden Verfahren sind ausführlich in [Ha07] zu finden.

2.3.3 Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung ist ein computergestütztes Berechnungsverfahren, welches die optimalste Grundgestalt eines Bauteils aus einem definierten Belastungs- und Materialmodell in einem definierten Bauraum berechnet. Anders als bei den Optimierungsverfahren zuvor ist hier die Ausbildung von Löchern in der Struktur zulässig, wenn dieser Teilbereich strukturmechanisch nicht relevant ist. Dadurch können auch poröse Strukturen entstehen. Allgemein lässt sich die Topologieoptimierung in zwei Gruppen aufteilen. Bei der mathematischen Topologieoptimierung „*wird ein mathematisches Optimierungsproblem gelöst, indem eine Zielfunktion, unter Einbehaltung von Restriktionen minimiert wird*“ [Ha07]. Dagegen wird bei der empirischen Topologieoptimierung „*kein mathematisches Optimierungsproblem gelöst, sondern eine empirische Iterationsvorschrift*“ [Ha07].

Der Beitrag von Kipping [KiKa+] zeigt auf, wie eine Topologie- und Gestaltoptimierung gekoppelt durchgeführt werden kann. In einem ersten Schritt wird die optimale Gestalt mittels Topologieoptimierung gesucht. Die Bauteilform wird dann u. a. durch Redesign, Remeshing und Data Reduction verbessert. In einen nächsten Schritt wird dann noch eine Gestaltoptimierung durchgeführt.

Die Topologieoptimierung spielt im Bereich der konstruktionsbegleitenden Simulationen weniger eine Rolle. Diese gehören zu den Stand-Alone-Systemen, welche Berechnungsexperten vorenthalten sind. Ausführliche Hintergründe zum Thema Topologieoptimierung sind in einschlägiger Literatur wie [Ha07], [Fi16] zu finden.

2.3.4 Multidisziplinäre Design Optimierung

Optimierungen, welche von unterschiedlichen Partialmodellen abhängig sind, werden problem- oder domänenspezifisch nacheinander ausgeführt. Oft liegen aber Konstruktionsbedingungen vor, welche von den einzelnen Optimierungen unterschiedlich beeinflusst werden. Um dies zu vermeiden, können Optimierungen simultan durchgeführt werden. Dies ist dann definiert als multidisziplinäre Design Optimierung (MDO). *„Ein ganzheitliches Erfassen der Funktionalität in einer solchen simultanen Optimierung ermöglicht eine sehr effektive, belastungsgerechte Ausnutzung aller Bauteile.“* [Du05]. Duddeck stellt in seinem Beiträgen [Du08b] den Einsatz der MDO im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie vor. Er kommt zu dem Fazit, dass durch den Einsatz neuer Optimierungsalgorithmen die MDO so beschleunigt werden kann, dass diese erstmals in einen realen Produktionsprozess integriert werden kann. Er bezog sich auf Crashsimulationen im Automobilbereich.

Wie eine MDO im Bereich der Bauteilauslegung angewendet wird, zeigt Kipping [KiKa+] in seinem Betrag. Nach einer vergleichenden Betrachtung einer konventionellen Bauteilauslegung und einer Strukturoptimierung beschreibt er einen Optimierungsprozess, in welchem eine schädigungs-basierte Shape-Optimierung eines Radträgers durchgeführt wird. Das Ziel der Optimierung war eine Minimierung der Schädigung. Nebenbedingungen waren eine Volumenreduktion und das Einhalten bestimmter Fertigungsgerechtheiten.

Ein Ansatz für eine automatisierte numerische Auslegung ist die von Klemme entwickelte hybride Redesign-Strategie. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Auslegung nach der eigentlichen analytischen Auslegung und ggf. numerischen Simulation noch nicht abgeschlossen ist und sich der idealste Modellzustand erst unter Last einstellt [KlKö12]. Dementsprechend wurde hier ein Ansatz entwickelt, der es erlaubt, u. a. durch Techniken aus dem Reserve Engineering diesen Zustand zu finden. Dabei wird unter Einbeziehung eines genetischen Algorithmus die Geometrie optimiert. Anwendung finden kann dieser Ansatz z. B. bei der Auslegung von Strömungsmaschinen.

Die Durchführung von MDO sind oft sehr zeit- und kostenaufwändig. Jung arbeitet in seiner Dissertation einen Ansatz heraus, bei dem durch die Anwendung eines Prinzips zur Relaxation, aufbauend aus der Schwingungslehre, der Aufwand reduziert werden kann [Ju13]. Er fokussiert sich dabei auf partitionierte MDOs. In seiner Arbeit sind drei Umsetzungen dargestellt.

Multidisziplinäre Optimierungen sind nicht nur in ihren Einsatz auf strukturmechanische und strömungsmechanische Problemstellungen beschränkt. Zhang präsentiert in ihren Beitrag [ZhSi+14], wie diese Methodik bei der Auslegung eines bürstenlosen Elektromotor angewendet werden kann. Die Baugruppe lag als parametrisches 3D-Modell vor. Aus diesem

wurde ein Simulationsmodell für eine FE-Analyse zur Bestimmung bestimmter elektrischer und elektromagnetischer Kennwerte abgeleitet.

2.4 Simulationsdatenmanagement

Die tiefere Integration aller im Rahmen der Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung entstehenden Daten erfordert auch eine kurze Beschreibung zum Stand der Technik des SDM im Sinne des PLM. Durch die steigende Informations- bzw. Datenmenge, welche in modernen Produktentwicklungsprozessen anfällt, etablieren sich im industriellen Umfeld PLM-Systeme stärker denn je. Zumeist schöpfen Unternehmen das Potenzial, welches diese Systeme besitzen, nicht aus und beschränken die Nutzung hauptsächlich auf die Verwaltung von Dokumenten und die Steuerung von Freigabeprozessen.

Eine enge Anbindung von CAD und CAE über PLM ist aufgrund der iterativen Prozesse während der virtuellen Produktentwicklung durchaus sinnvoll. Der Abschluss einer Simulation löst oft Aktivitäten in der Konstruktion aus, wenn z. B. Änderungen notwendig sind [BoGr+10]. Eine Empfehlung für die Integration von Simulationsdaten in eine PLM-Umgebung unter der Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an Simulationen und Berechnungen wurde in der Arbeitsgruppe „SimPDM“ [Kr07],[Pr08] des ProSTEP iViP Vereins entwickelt [BoGr+10].

Veröffentlicht wurde diese gemeinsam von ProSTEP iViP und dem VDA. In der Empfehlung wird ein Datenmodell definiert, um Simulationsdaten zu verwalten. Zusätzlich wird aufgezeigt, wie entsprechende Metadaten über den Berechnungsprozess hinweg ausgetauscht werden können, was auch die Kommunikation mit Datenverwaltungssystemen anderer Bereiche beinhaltet. [BoGr+10]. Das Ziel des Projekts SimPDM war eine offene Spezifikation zur Einbindung von CAE-Anwendungen in PDM-Systeme. Dazu muss eine Integrationschnittstelle zwischen Berechnungs- und PDM-Programmen geschaffen werden. Dies wird im SimPDM durch drei Module erreicht: das SimPDM-Referenzdatenmodell, die SimPDM Services und Use Cases [Pr08]. Aufbauend auf diesem Projekt wurde das Projekt Collaborative CAD/CAE Integration (C3I) bis 2011 mit dem Ziel durchgeführt, die Ergebnisse des SimPDM-Projekts in die Praxis umzusetzen [Pr12]. Im Rahmen des C3I-Projektes wurden sogenannte CAE Services definiert. Bei der Umsetzung des C3I-Projektes standen die CAD-Integration sowie CAE-Prozesse innerhalb eines Unternehmens und über die Unternehmensgrenze hinweg im Fokus.

Neben PLM-Systemen gibt es auch SDM-Systeme, welche ausschließlich zur Verwaltung von CAE-Daten, -Prozessen und -Methoden Anwendung finden [FaRo10]. Den größten Nutzen stellt ein SDM-System dann dar, umso näher es am Produktentwicklungs- und Konstruktions-

onsprozess agiert. Bei SDM-Lösungen steht die Unterstützung von Entscheidungs- und Freigabeprozesse von Simulationsprozessen im Fokus [FaRo10]. Weiterhin wird die Verfügbarkeit von Daten und Informationen für CAE-Prozesse sichergestellt und die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und Entscheidungen ermöglicht. Boy [BoGr+10] beschreibt in seinem Artikel, dass sich heutige Einsatzszenarien von SDM typischerweise auf das Postprocessing beziehen, aber die Herausforderung in der Preprocessing Phase liegt.

Ein Ansatz, der sich u. a. mit dieser Problematik beschäftigt, ist das Simulation Integration Framework von Sindelar [SiNo12]. Dieser Integrationsansatz für Simulationswerkzeuge führt zur Entwicklung einer gemeinsamen nutzbaren Referenzbasis für CAE-Daten. Diese sind dabei unabhängig von einzelnen Simulationswerkzeugen zu betrachten. Damit dient die Referenzbasis als einheitliche und redundanzfreie Datenquelle für alle beteiligten Simulationsmethoden [SiNo12]. Bei diesem Ansatz werden existierende Standard-Datenaustauschprotokolle als Basis für die Konfiguration eines Simulationsdatenmodells verwendet, welches exakt auf diese Anforderung zugeschnitten ist. Das Ergebnis ist damit ein vollständiger Datenspeicher, der als CAE-Referenzbasis dient. Hervorzuheben ist, dass damit eine Entkopplung von Werkzeugen und Daten/Datenspeicherung gewährleistet wird [SiNo12].

2.5 Systementwicklung

Durch die gezeigten - immer komplexer werdenden und multidisziplinären - Entwicklungen im Bereich der Konstruktion und Berechnung werden neue Methoden gefordert, welche eine ganzheitliche Sichtweise auf alle am Entwicklungsprozess beteiligten Disziplinen besitzen. Der Komplexitätsgrad der zu entwickelten Systeme steigt damit simultan. Hierzu wird im Folgenden ein Stand der Technik zur Systementwicklung präsentiert. Ein System ist, im Hinblick auf die Wirkungsweise, eine Menge zusammenhängender Elemente, welche aufeinander in einer organisierten Weise einwirken. Durch ein zweckhaftes Verhalten soll ein gemeinsames Ziel erreicht werden. Drei typische Merkmale eines Systems sind [Kö17]:

- die innere Struktur
- die Systemgrenze
- die Wechselwirkung

Die Wechselwirkung beschreibt die gegenseitige Wirkung des Systems mit seiner Umgebung über die eigentliche Systemgrenze hinaus. Dementsprechend gehören zur Systemgrenze auch eine oder beliebig viele Systemschnittstellen.

Die innere Struktur, welche die Gesamtfunktion beschreibt, ist verborgen. Die Wechselwirkungen treten durch die dargestellten Stoff-, Energie und Informationsflüsse auf. Mit diesem Modell können Wechselwirkungen unter den Komponenten selbst, wie auch mit der Umgebung abgebildet und untersucht werden [Kö17].

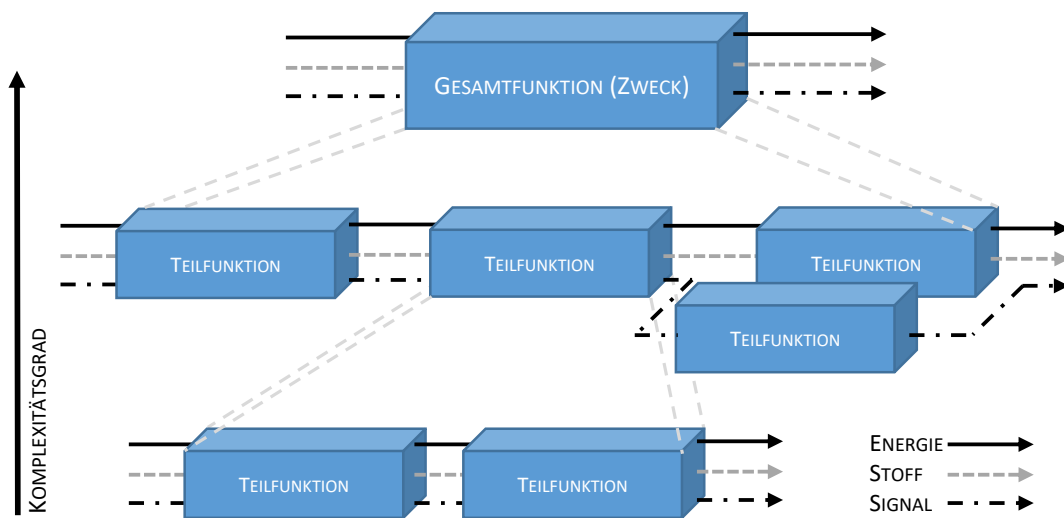


Abbildung 2-11: Modell eines technischen Systems (nach [PaFe+13], [VDI2221])

Durch die Aufgliederung in Teilfunktionen (n -1, n -2, etc.) wird eine Funktionsstruktur gebildet, vgl Abbildung 2-11.

2.5.1 Systems Engineering

Der Oberbegriff für die Gesamtheit der Entwicklungstätigkeiten, welche notwendig sind, um ein System zu entwickeln, ist das Systems Engineering [Al12], [WeSo14]. Dieses ist eine domänenunabhängige Disziplin, ein ganzheitlicher Ansatz im funktionalen Kontext und nutzt unterschiedliche Prinzipien, Methoden und Werkzeuge zur Systementwicklung oder -optimierung [Al12], [Ho15], [Ma15]. Wesentliche Ingenieurertätigkeiten zur Entwicklung komplexer Systeme werden durch das Systems Engineering abgedeckt. Dazu gehören u. a. [Al12]:

- Die Systemanalyse
- Die Systemarchitekturentwicklung
- Die Systementwicklung
- Die Anforderungsentwicklung

Ausführlich erläutert werden die einzelnen Punkte in [Br09], [Al12], [WeSo14]. Interessant ist die Nutzung von Systems Engineering in Kombination mit dem Projektmanagement. Durch das zu erstellende oder das erstellte System verfügt der Projektmanager über eine belastbare Planungsgrundlage [Al12].

Nach der ISO/IEC 15288 [WaRo+17] lassen sich die Techniken des Systems Engineering auf vier unterschiedliche Teilprozesse in Bezug auf den Lebenszyklus von Systemen anwenden. Diese umfassen technische Prozesse, technische Managementprozesse, Vertragsprozesse

und organisatorische Unterstützungsprozesse. Diese vier gliedern sich in insgesamt 24 weitere Teilprozesse auf. Zu den organisatorischen Unterstützungsprozessen gehören auch Wissensmanagementprozesse.

Die drei Hauptmerkmale des Systems Engineerings sind die Systemanforderungen, die Systemarchitektur und das Systemverhalten [Al12]. Die Systemanforderungen beschreiben, was das System leisten soll und muss. Diese können unterteilt werden in funktionale und nichtfunktionale Anforderungen. Die Systemanforderungen und die Architektur sind immer im Verbund zu betrachten [Al12]. Die Systemarchitektur beschreibt den Aufbau des gesamten Systems und definiert die Komponenten. Das Systemverhalten ist die formalisierte Beschreibung von definierten Anforderungen und der Architektur [Al12]. Dazu können z. B. Petri-Netze, Specification and Description (SDL)-Diagramme, etc. verwendet werden. Detailliertere Übersichten sind in [Al12], [Kö17], [Ka13] zu finden.

2.5.2 Modellbasierte Systementwicklung (MBSE)

Die MBSE ist eine Methode des Systems Engineering. Der Fokus liegt hier auf einer modellzentrierten und nicht dokumentenzentrierten Vorgehensweise. Alle beteiligten Entwickler arbeiten nur mit einem einzigen Modell. Damit wird das Modell zum Mittelpunkt aller Informationen [Al12]. Die Dokumente sind quasi nur eine Sicht auf das definierte Modell [Al12]. Eine Sicht ist dementsprechend eine definierte Projektion auf das Modell, welche Dinge, wie Elemente, Eigenschaften, etc. zeigt. Brandstätter definiert in seiner Dissertation [Br09] folgende zentrale Anforderungen an die MBSE:

- Ein zentrales Modell des gesamten Systems
- Ein flexibles/agiles Vorgehensmodell
- Eine domänenübergreifende Systemmodellierungssprache
- Ein ganzheitlicher Modellierungsansatz
- Qualifizierte und motivierte Mitarbeiter

Kaiser [Ka13] teilt Voraussetzung für eine Anwendung von der MBSE zur Erstellung eines Systemmodells auf einen sinnvollen Verbund von Methode, Sprache und Werkzeug ein. Die Methoden, welche quasi als Vorgehensweise/Anleitung für eine Modellierungssprache dienen, dienen der Umsetzung der Idee bis zur fertigen Architektur. Einige davon sind u. a. in [Ka13], [Br09] erläutert. Allgemeine Ziele des MBSE sind [Al12]:

- Komplexitätsbeherrschung
- Verbesserung der Produktivität und Kommunikation
- Verminderung von Risiken
- Verbesserung der Qualität
- Bewahrung und Wiederverwendung von Know-how

Ein aktuelles Vorgehensmodell ist das erweiterte V-Modell von Eigner [EiRo+14]. Eigner erweitert den systematischen Ansatz aus der VDI-Richtlinie 2206 zur Entwicklung mechatronischer Systeme um Methoden aus dem MBSE. Dazu identifiziert er drei neue Ansichten zur Modellierung auf der Seite der Systementwicklung. Ausgehend von der Anforderungsdefinition wird das System, in der Ansicht „Modellbildung und Spezifikation“ durch qualitative Methoden beschrieben. In der darauffolgenden Ansicht werden quantitative, simulierbare multidisziplinäre Modelle erstellt. Die dritte Ebene dient der Erstellung von Geometrie- und CAE-Modellen.

Eine Systemmodellierungssprache der MBSE ist Systems Modeling Language (SysML), welche auf Unified Modeling Language (UML) basiert. Die SysML ist ein offizieller Standard der OMG (Object Management Group). Der Aufbau der Sprache gliedert sich in drei Hauptbestandteile [Al12], [WeSo14]:

- Struktur
- Verhalten
- Anforderung

Als zusätzlicher vierter Bestandteil dient die Parametrik [Al12]. Dieser wird zur Darstellung parametrischer Zusammenhänge verwendet. Mit SysML werden Diagramme definiert, welche sich in Struktur-, Anforderungs-, und Verhaltensdiagramme aufteilen, siehe auch Abbildung 2-12. Damit können Aussagen bezüglich der Semantik wie auch der Notation modelliert werden. Die Sicht auf das Modell wird dann über die Diagramme modelliert. Diese beinhalten sämtliche Informationen über das System.

Durch eine disziplinneutrale Modellierungsweise mit SysML wird die Akzeptanz in der Projektkommunikation gefördert [Kö17]. Eine Einbeziehung von Experten anderer Fachrichtungen in die Systementwicklung ist damit sichergestellt. Ausführliche Informationen zu SysML sind u. a. in [Al12] zu finden. Andere Modellierungssprachen werden u. a. in [Ka13], [Kö17] beschrieben.

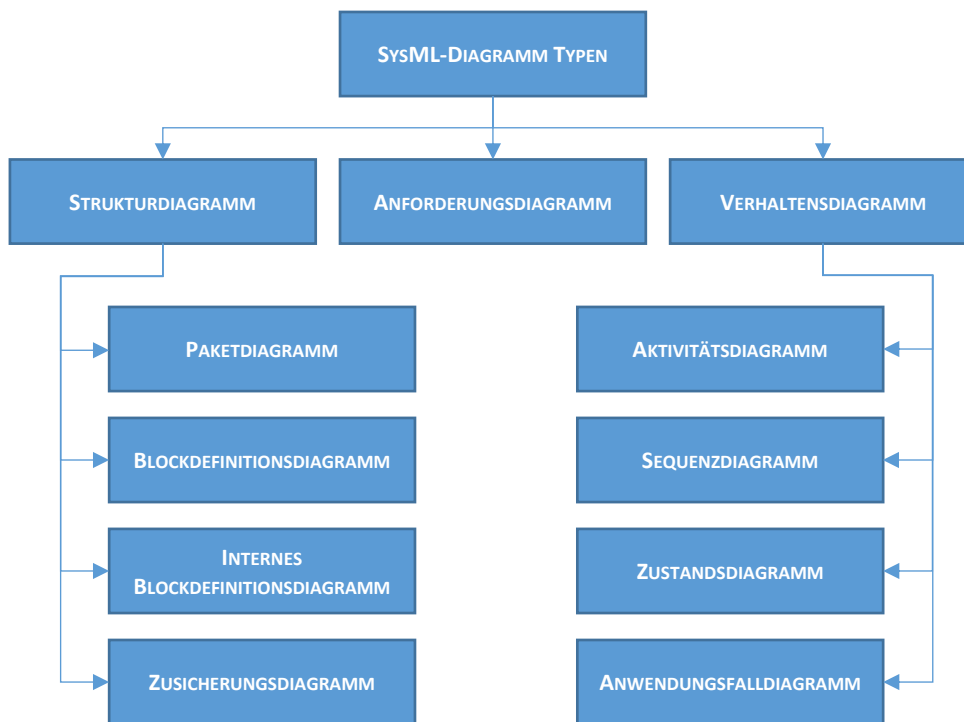


Abbildung 2-12: Verschiedene Diagrammtypen in SysML (nach [Al12], [WeSo14])

2.5.3 Model based Engineering (MBE)

Ein weiterer Ansatz der Systementwicklung ist das MBE. Die Basis bildet die Verwendung von Modellen, welche in unterschiedlichen Domänen entwickelt werden. Dies bietet den Vorteil, dass verschiedene Potenziale des Produktes optimal beleuchtet werden [Be11]. MBE zielt auf die Optimierung einer IT-Infrastruktur durch eine konsistente Integration von Softwaresystemen aus unterschiedlichen Engineering Disziplinen ab [Be11]. Wissensingenieure aus diesen Disziplinen arbeiten dementsprechend mit den ihnen bekannten Tools und versuchen gleichzeitig diese mit dem generierten Modell zu verknüpfen und zu integrieren [Be11]. Diese verschiedenen Sichtweisen werden anhand der Abbildung 2-13 verdeutlicht. Kaufmann et al [KaAd+16] beschreibt dabei, dass ein integriertes Systemmodell, idealerweise eingebettet in ein PLM-System, als Backbone verwendet werden muss.

Pfennig und Roth [Pf17] entwickelten aufbauend auf dem MBE Ansatz das Fully-integrated Model-Based Engineering -Konzept (FIMBEE). Dieses greift zusätzlich das Internet der Dinge (eng. Internet of Things, abk. IdD) und die Transformation von Systemmodellen, welche z. B. mittels SysML erstellt sind, auf. Dabei wird beides in ein IdD-Informationen-Modell eingebettet.

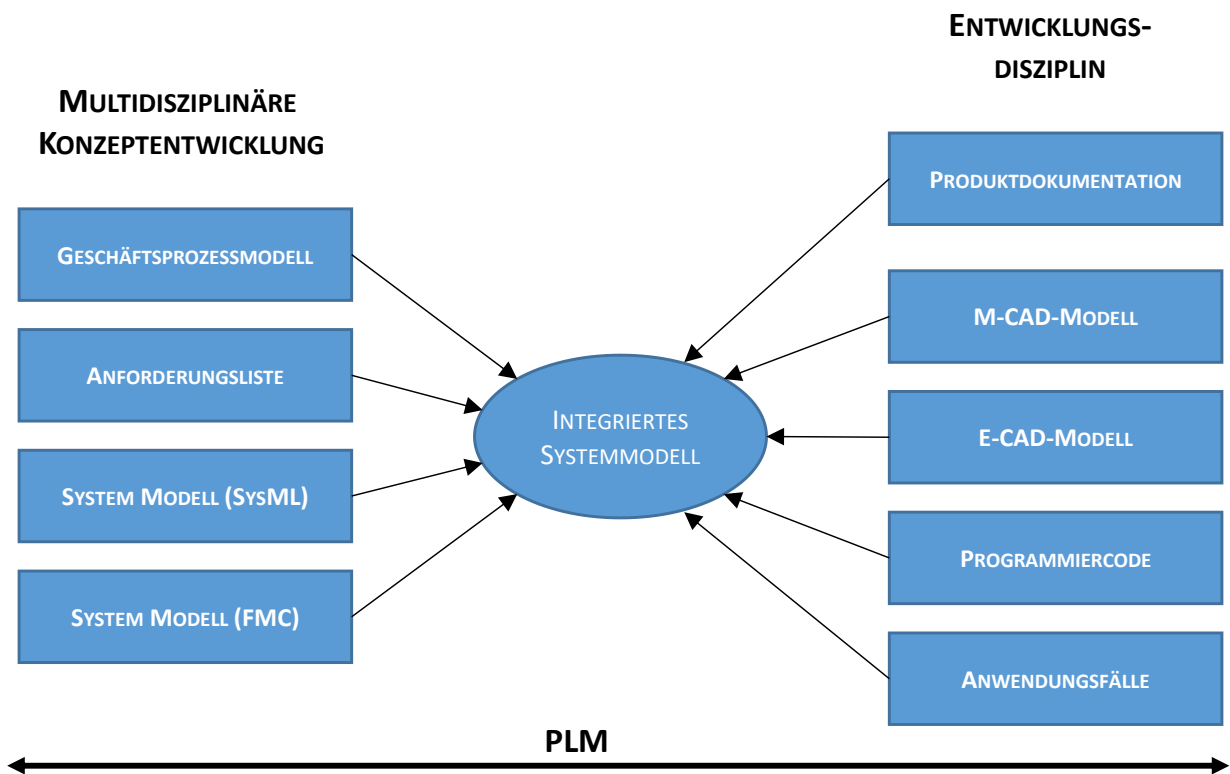


Abbildung 2-13: MBE-Sichten auf das Systemmodell (nach [KaAd+16])

2.6 Wissensintegration im CAX-Bereich

Die Qualität von Konstruktionsprozessen wird beeinflusst durch unterschiedliche Einflussgrößen. Dies sind zum einen Richtlinien und unternehmensinterne Standards, welche den Aufbau und Inhalt virtueller Produktmodelle vorgeben und zum anderen die Abhängigkeit vom Wissen des Konstrukteurs [PaFe+13], [Kl15b]. Der Begriff Wissen ist dabei vielfach in der Literatur ähnlich definiert. Exemplarisch wird an dieser Stelle die Definition von Probst [PrRa+12] zitiert: „Wissen ist die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.“ North [No11] fügt zusätzlich zu den drei Grundbegriffen Daten, Informationen und Wissen noch den Begriff Zeichen ein. Die Verknüpfung dieser vier Begriffe ist in Abbildung 2-14 veranschaulicht. Dies ist angelehnt an die vier Stufen der Wissenstreppe nach North [No11].

Das Wissen wird in unterschiedliche Wissensarten aufgeteilt [Kö17]. Richtlinien, Normen und unternehmensinternen Standards sind definiert als implizites Wissen, welches als geschriebenes Wissen verstanden wird. Das (Erfahrungs-)Wissen einer Person, in diesem Fall

des Konstrukteurs, ist als explizites Wissen definiert. Zur Optimierung des Konstruktionsprozesses ist es oft unumgänglich beide Formen des Wissens tiefgehend in das verwendete System zu implementieren.

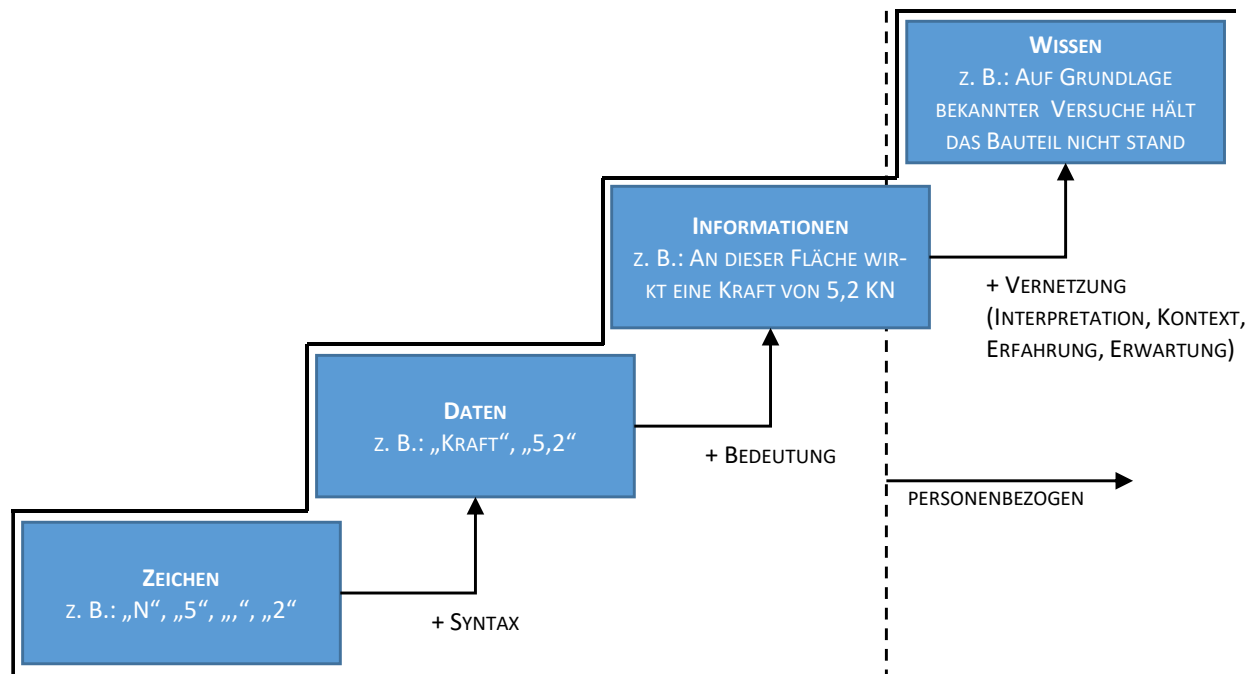


Abbildung 2-14: Verknüpfung der Grundbegriffe des Wissensmanagements (i. A. a., [No11], [Ke14])

Einen Überblick über das Wissensmanagement im Ingenieurwesen bietet die VDI-Richtlinie 5610 Blatt 1 [VDI5610-1]. Sie enthält neben den Grundlagen des Wissensmanagements und einer Beschreibung der wesentlichen Elemente eine Einführung und Anwendung eines Wissensmanagementprozesses in einem festgelegten Geschäftsbereich.

2.6.1 Knowledge-Based Engineering

Das KBE birgt Vorgehensweisen und Werkzeuge, um durch eine Integration von Wissen Konstruktionsprozesse zu optimieren. Köhler [Kö02] beschreibt KBE als eine „Überführung einer unstrukturierten, zufallsbedingten Wissensnutzung in eine strukturierte und zielführende Nutzung“.

Nach der VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 [VDI5610-2] ist im industriellen Umfeld noch keine einheitliche wie allgemeingültige Beschreibung zur Bearbeitung von KBE-Projekten vorhanden oder veröffentlicht. Die selbige Richtlinie stellt eine allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung von KBE-Anwendungen zur Verfügung. Sie beinhaltet u. a. einen Überblick über relevante Grundlagen der wissensbasierten Konstruktion, eine generelle Methode zur Durch-

führung von KBE-Projekten und einige exemplarische Lösungen. Die vorgeschlagene Vorgehensweise zur Bearbeitung eines KBE-Projektes ist in Abbildung 2-15 anhand eines Phasenmodells dargestellt.

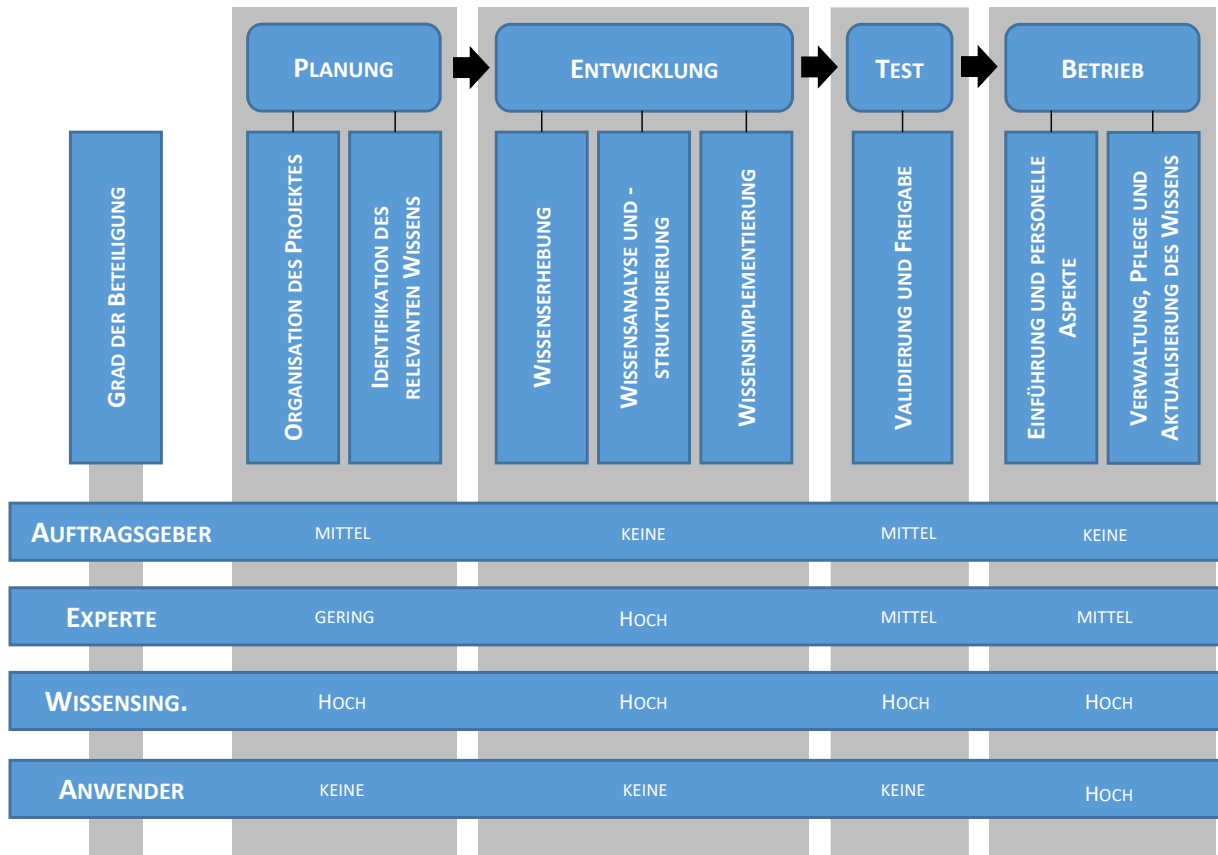


Abbildung 2-15: Phasenmodell eines KBE-Projekts (nach [VDI5610-2])

Die am Prozess beteiligten Personen werden „rollenbasiert“ und nicht „personenbasiert“ zugeordnet. Das heißt, dass eine Person mehrere Rollen innehaben kann [VDI5610-2]. Die generellen Ziele von KBE sind [VDI5610-2], [Kö17]:

- Standardisierung
- Automatisierung
- Qualitätssteigerung und -sicherung
- Schaffung von Transparenz
- Erhöhung der Kundenzufriedenheit
- Erhöhung der Mitarbeiterzufriedenheit

Mit dem Fokus auf den Konstruktions- und Berechnungsprozess ergeben sich daraus [VDI5610-2], [Kö17]:

- die Entlastung des Konstrukteurs von Routineaufgaben,

- die Absicherung konstruktiver Vorgaben durch Einschränkungen bzw. Hinweise zu Problemstellungen,
- sowie die Digitalisierung des Produkt- und/oder Prozesswissens für zukünftige Anwendungen.

Ein wichtiger Begriff des KBE ist die Wissensakquisition. Diese dient der Überführung von (Experten-)Wissen aus unterschiedlichen, meist implizit vorliegenden, Wissensquellen in eine explizite Wissensrepräsentationsform. Nach [VDI5610-2] kann die die Wissensakquisition in drei Arten aufgeteilt werden:

- Indirekte Wissensakquisition: Besteht aus dem Dialog zwischen einem Experten und einem Wissensingenieur
- Direkte Wissensakquisition: Der Experte formuliert sein Wissen selbst über ein Akquisitionstool.
- Automatische Wissensakquisition: Besteht aus der automatischen Überführung von vorhandenen textuellen Wissen und der automatischen Wissensextraktion aus exemplarischen Beispielen

Das formulierte Wissen bildet die Grundlage eines KBE-Systems. Nach Lupa [Lu09] ist ein KBE-System ein Sonderfall eines wissensbasierten Systems (eng. Knowledge-based System, abk. KBS). Er begründet dies anhand der Assoziation mit CAD-Systemen. Dabei ist zu beachten, dass Expertensysteme und wissensbasierte Systeme in der Literatur häufig als Synonym verwendet werden, obwohl Expertensysteme als Untergruppe von wissensbasierten Systemen verstanden werden [Sp17], [Ha16], [Lu09]. Auch Lutz [Lu11] unterscheidet zwischen Expertensystemen und KBE-Systemen und begründet dies ebenfalls durch die starke Assoziation mit CAD-Systemen. La Rocca ordnet die Erstellung von KBE-Systemen zwischen „Künstlicher Intelligenz“ und herkömmlichen CAD-Systemen ein [La12].

2.6.2 Erstellung wissensbasierter Systeme

Die Architektur eines KBSs wird in der Literatur unterschiedlich beschrieben. Manche Merkmale sind eindeutig, welche dann nur unterschiedlich verknüpft sind. Eine beispielhafte Architektur ist in Abbildung 2-16 dargestellt und wird im Folgenden kurz zusammengefasst. Für eine ausführliche Beschreibung wird u. a. auf [Lu09], [VDI5610-1], [VDI2249] verwiesen.

Die Wissensbasis dient zur Abbildung des erforderlichen Expertenwissens einer bestimmten Domäne. Sie ist als einzige systemspezifische Speicherkomponente definiert. Die Repräsentationsform wird in Abhängigkeit der Komplexität der Darstellung und Verknüpfung der Wissensinhalte gewählt [Lu09]. Typische Formen im Bereich der Konstruktion sind die constraintbasierte, regelbasierte und objektorientierte Repräsentation [Lu09], [Lu11]. Das

Wissen, wie die Wissensinhalte verarbeitet werden, ist in der Inferenzkomponente enthalten. Die Erklärungskomponente stellt aktuelle Zustände, Entscheidungen und Regeln in übersichtlicher Form dar. Mit Hilfe der Wissenserwerbkomponente wird Wissen der Wissensbasis zugänglich. Der Anwender des späteren entwickelten Systems bekommt Zugang über die Benutzerschnittstelle.

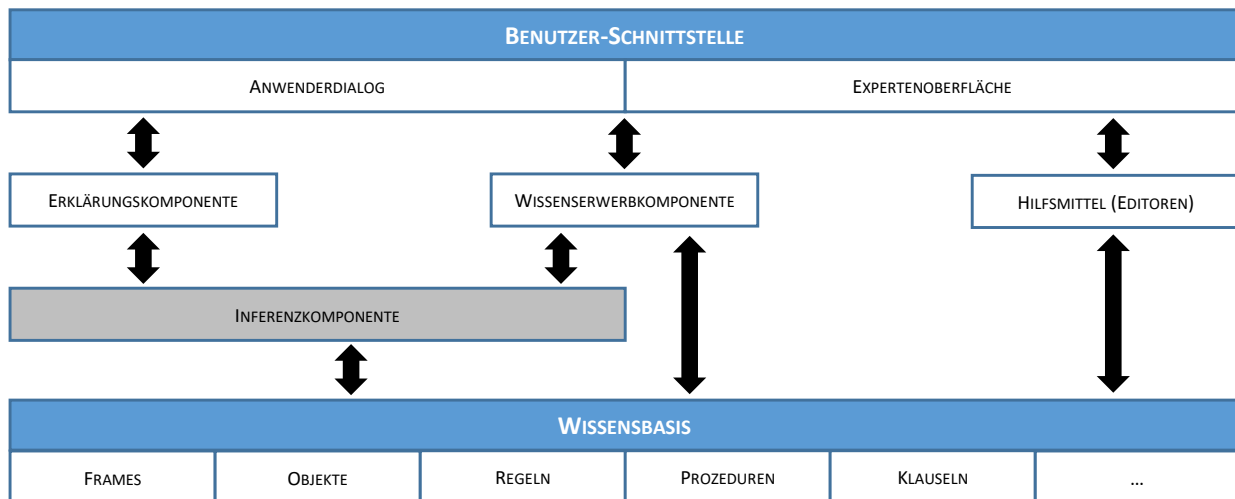


Abbildung 2-16: Beispielhafte Architektur eines wissensbasierten Systems (i. A. a, [Lu09])

Für die Erstellung eines KBS wurden im Laufe der Zeit unterschiedliche Ansätze und Methoden entwickelt. Ein erster Schwerpunkt einiger Methoden ist dabei die Transformation von impliziten in explizites Wissen. Wobei auch selbst die Akquisition von Wissen aus unterschiedlichen geschriebenen Quellen eine erste Hürde bei der Erstellung eines KBS darstellen kann [Lu09], [Lu11].

Ein erster Ansatz war die Ripple-Down Rules Methode (RDR), welche vom Compton und Jansen entwickelt wurde [CoPe+06]. Die Methode basiert auf der Erfassung von Wissen aus Fehleransätzen. Hierbei werden Regeln für ein laufendes System definiert. Wenn das System zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht korrekt arbeitet, signalisiert ein Fachexperte eine Fehlermeldung und ergänzt in der Wissensbasis eine neue Regel. Diese baut dann auf dem Fall auf, welcher den Fehler erzeugt hat.

Eine weitere Methode ist das Case Based Reasoning (CBR) [BoKa14], [De17]. Diese besitzt ihren Ursprung im Bereich der künstlichen Intelligenz. Bei diesem Ansatz wird Erfahrungswissen in Form von unterschiedlichen Fällen in einer Fallbasis hinzugefügt. Jeder Fall setzt sich dabei aus einer Problembeschreibung und einer Lösung zusammen. Zur Lösung eines neuen Problems wird in der Fallbasis nach einem ähnlichen Problem gesucht und, wenn vorhanden, mittels einer schon gegebenen Lösung gelöst.

Schreiber et al entwickelte die KADS/CommonKADS Methode [Sc93]. Der Hauptbestandteil teilt sich in drei Gruppen auf (Context, Concept und Artefact), welche sich wiederum aus unterschiedlichen Modellen zusammensetzen. Die Wissensimplementierung erfolgt über das Knowledge Modell, welches sich ebenfalls in drei weitere Kategorien unterteilen lässt [Lu09].

Eine der bekanntesten Methoden im Bereich der Entwicklung von wissensbasierten Systemen ist die MOKA Methode (Methodology and tools oriented to knowledge-based engineering Applications)[St01]. Die Methode beschreibt den MOKA-Lebenszyklus, welcher in zahlreichen Veröffentlichungen, wie u. a. [Sk07], [EsL11], zur Formalisierung von Wissen angewendet wurde. Die sechs Phasen sind [St01]: Identify, Justify, Capture, Formalize, Package, Activate.

Ein aktuellerer Ansatz ist die KNOMAD Methode (Knowledge nurture for optimal multidisciplinary analysis and design)[CuVe+10]. Anwendung findet diese bei der analytischen Nutzung, Entwicklung und Abbildung von Erfahrungswissen innerhalb der Produktentwicklung und Produktion. Auch diese Methode ist aufgeteilt in sechs Phasen zur Wissenserfassung [CuVe+10]: Knowledge capture, Normalisation, Organisation, Modeling, Analysis and Delivery. Dieser Ansatz wurde auf der Annahme von Curran et al. [CuVe+10] entwickelt, dass bestehende Methoden wie MOKA sich nicht ausführlich genug mit der Verwendung von KBE-Applikationen im Konstruktionsprozess beschäftigen und zu allgemein formuliert sind.

Für eine ausführlichere Beschreibung der dargestellten Methoden, wie auch die Auflistung weiterer Methoden wird auf weiterführende Literatur wie [St06], [Lu09], [Ha16], [Lu11], [VDI5610-2] verwiesen.

2.6.3 Entwicklung von KBE-Systemen im CAD/CAE

Die Entwicklung von KBE- Systemen ist abhängig von der Integrationstiefe des verwendeten CAD-Systems [Kö02]. Die Integrationstiefe lässt sich nach LUPA [Lu09] in drei Stufen unterteilen:

- Stand-Alone-System: Unidirektionale Verknüpfung des KBE-Systems mit dem CAD-System.
- Angepasste System: Bidirektionale Verknüpfung des KBE-Systems und des CAD-Systems.
- Integriertes System: Vollständige Integration der KBE-Systems in das CAD-System.

Die VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 [VDI5610-2] fasst dagegen angepasste und integrierte Systeme zusammen, was in dieser Arbeit übernommen wird. Historisch gesehen traf LUPA seine Annahme, als die Möglichkeiten zur Wissensintegration durch APIs noch deutlich geringer waren als mit integrierten Systemen. Auch die VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 beschreibt, dass

die Verbindung von KBE-Systemen mit CAD-Systemen sowohl intern als auch per Kopplung erfolgen kann [VDI5610-2].

Für den Anwender wird ein KBE-System als unterstützendes Programm wahrgenommen. Aus Sicht des Entwicklers gliedert sich dieses in eine sog. Development Shell und das zu erstellende unterstützende Programm, welches aus einer Wissensbasis und Inferenzmaschine besteht [Ha16], [GoDa].

Wie zuvor erwähnt, sind KBE-Systeme ein Sonderfall der wissensbasierten Systeme. Charakteristisch für beide ist eine Trennung zwischen der eigentlichen Wissensrepräsentation und der Inferenzkomponente. LUPA ordnet in seiner Dissertation auch Applikationen, welche über eine API eines CAD-Systems erstellt wurden, KBE-Systemen zu, obwohl hier keine Trennung zwischen Wissensrepräsentation und Inferenzkomponente erfolgt [Lu09]. Diese Zuordnung wird in dieser Arbeit übernommen.

Die Entwicklung von KBE-Systemen zur Unterstützung des Konstrukteurs war und ist Thema vieler aktueller Forschungsarbeiten. Hauptsächlich teilen sich die auf das wissensbasierte Konstruieren und wissensbasierte Unterstützungssysteme für den Konstrukteur auf.

Gerade die Techniken zur Verknüpfung des Wissens der Wissensbasis mit dem CAD-System mittels der Feature-Technologie sind sehr erwähnenswert [Ho02], [Lu09]. Beisheim entwickelte ein Konzept zur Feature-Integration in ein wissensbasiertes System mit dem Fokus auf die Unterstützung des Konstrukteurs und Formbauers bei der Konstruktion von tiefgezogenen Blechbauteilen [BeMü99]. Dazu wurde ein System für eine Optimierung einer Geometrietoleranz einer Bauteilgeometrie nach verschiedenen Kriterien (werkzeuggeometrisch, fertigungstechnisch und werkstofflich) erstellt. Das dazu notwendige Wissen wurde in einer Datenbank abgelegt.

Beim Einsatz der Feature-Technologie mit dem Fokus auf Variantenkonstruktionen sind u. a. die Beiträge von Danjou und Manoharan hervorzuheben [DaLu+08], [MaHu+16]. Danjou präsentiert den Einsatz von UDFs am Beispiel einer automatisierten Auslegung von einer Verdichterkonfiguration. Die notwendigen Parameter sind dabei in einer Datenbank hinterlegt. Für die einzelnen UDFs wurde eine UDF Bibliothek erzeugt. Je nach Anforderung werden durch einen Konfigurator die UDFs in der CAD-Baugruppe platziert [DaLu+08]. Manoharan zeigt in seinen Beitrag einen aktuellen Stand zur Wissensintegration in die CAD-CAM Prozesskette am Beispiel der NC- und additiven Fertigung. Er nutzt u. a. einen Webservice zur Kopplung des CAD-Systems mit den jeweiligen Datenbanken [MaHu+16], vgl. Abbildung 2-17.

Einen Vorteil für die Verwendung eines Webservices sieht er bei Anpassungen der Datenbankstruktur. Dieser gewährleistet, dass nur der Webservice selbst neu justiert werden muss und nicht das Expertensystem.

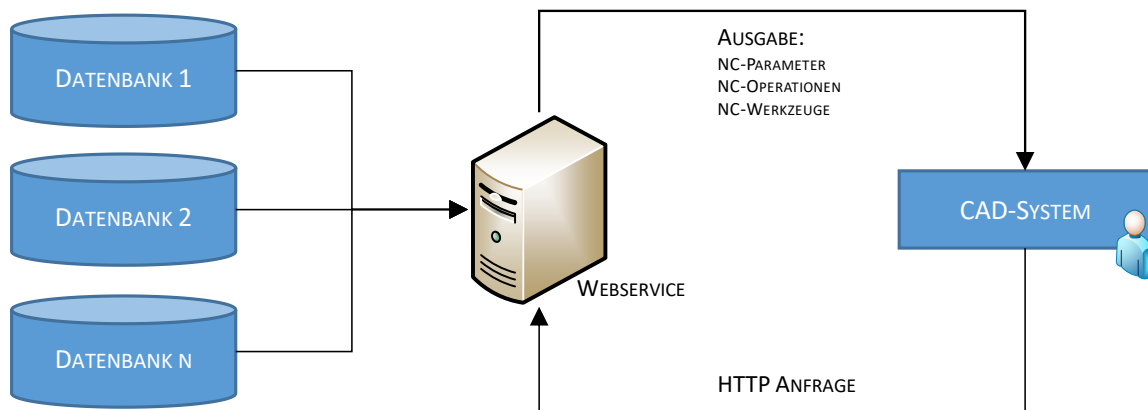


Abbildung 2-17: Verknüpfung über Webservice (nach [MaHu+16])

Einen aktuellen Beitrag im Bereich der additiven Fertigung zeigt Martha [Ma15] in seiner Dissertation. Er präsentiert die Entwicklung einer integrierten CAD-CAM-Prozesskette für additive Fertigungsverfahren. Um dies zu gewährleisten, arbeitete er Methoden zur Erweiterung unterschiedlicher CAD-Systeme aus.

Im Bereich der Simulation und Berechnung sind u. a. einige der Beiträge, welche im Unterkapitel 2.2.2 schon dargestellt wurden, zu erwähnen. An dieser Stelle wird nochmals auf den Beitrag von Kestel [KeWa16] verwiesen. Er präsentiert eine ganzheitliche Unterstützung des Konstrukteurs bei konstruktionsbegleitenden Simulationen, u. a. durch neu erstellte Features. Dazu wird das Simulationsmodell im Softwaresystem ANSYS automatisch aus den CAD-Modell aus Creo Parametric abgeleitet.

2.7 Zwischenfazit

Der zeitliche Rahmen, welcher dem Produktentwicklungsprozess eingeräumt wird, reduziert sich zunehmend. Zusätzlich steigt die Anzahl von Daten und Informationen rapide. Die Entwicklung neuer Methoden und die Optimierung bestehender Vorgehensweisen zur Unterstützung des Konstrukteurs sind daher nur folgerichtig. Der zuvor dargestellte Stand der Technik zeigt mehrere wesentliche, für diese Arbeit relevante Kernaussagen auf.

Die frühzeitige Informationsbereitstellung für den Konstrukteur und Berechner ist durch informationstechnische Lösungen noch immer nur bis zu einem bestimmten Grad abgedeckt. Auf der einen Seite haben Studien gezeigt, dass der Berechner zu viel Zeit mit der Beschaffung von Informationen zur Durchführung des Preprocessings benötigt. Das heißt, dass die Prozesskette an dieser Stelle vor der eigentlichen Simulation iterativ abläuft. Die Iterationsdauer ist dabei abhängig vom Anwender und den verwendeten Softwaresystemen. Eine methodische Unterstützung im Sinne des Frontloadings ist hier wünschenswert.

Die Unterstützung des Konstrukteurs bei der Durchführung von Simulationen und Optimierungen durch moderne KBE-Methoden ist und bleibt ein wichtiges Forschungsthema. Es wurde aufgezeigt, dass die Absicherung der Multidisziplinarität und der Handhabbarkeit von fortgeschrittenen Simulationen durch wissensbasierte Unterstützungssysteme ein oft verwendeter Ansatz ist. Die verwendeten Methoden zur Erstellung sind dabei individuell.

Eine erste allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung eines KBE-Systems ist in der VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 enthalten [VDI5610-2]. Allerdings ist die Hilfestellung bei der Entwicklung komplexer Systeme gerade im Bereich der Wissensformalisierung gering. Auf die Wissenstransformation, welche bei der Umwandlung von impliziten in explizites Wissen notwendig ist, wird nur theoretisch eingegangen und es wird auf weiterführende Literatur verwiesen. Die Wissensakquise und die Schaffung der Wissensbasis bilden die Basis jeder KBE-Methode. Das Wissen, welches personengebunden beim Konstrukteur und Berechner liegt, muss extrahiert werden. Eine eindeutige Wissenstransformation zu einem frühen Zeitpunkt beschleunigt die Entwicklung eines wissensbasierten Systems ungemein und verhindert unnötige Iterationen.

Ebenso wird der Anwender in der entwickelten Vorgehensweise erst am Ende mit in die Entwicklung des KBE-Systems miteinbezogen. Die Akzeptanz des Anwenders ist eines der primären Ziele bei der Entwicklung. Dafür muss dieser, wie auch der Berechner, von vornherein mit einbezogen werden.

Die aufgezeigten Techniken des Systems Engineering bieten breite Methoden zur Wissensformalisierung. Ebenso lassen sich durch diese die unterschiedlichen Sichtweisen vom Konstrukteur und Berechner auf das zu entwickelnde System definieren. Systems Engineering-Methoden werden bei der Entwicklung von Wissensmanagement-Prozessen eingesetzt. Eine Anwendung bei der Entwicklung von KBE-Systemen ist dagegen, Stand jetzt, nicht bekannt.

Für die Entwicklung von neuen Unterstützungsmethoden an der Schnittstelle CAD/CAE kann zusammengefasst werden, dass eine Methode fehlt, die die Möglichkeit einer eindeutigen praktischen und systematischen Beschreibung eines komplexen KBE-Systems beinhaltet. Ein systemtechnischer Ansatz in Sinne der MBSE könnte an dieser Stelle sein volles Potential ausschöpfen. Durch die Modellierung eines neutralen Systems können unterschiedliche Sichten und damit eine Lesbarkeit für programmierunerfahrene Anwender sichergestellt werden, damit diese effizient an der Systementwicklung mitwirken können.

3 Wissensbasierte Absicherung konstruktionsbegleitender Simulationen

Wissen ist die wichtigste Ressource eines Unternehmens [PrRa+12]. In der Produktentwicklung ist Wissen noch zu oft in der Form von personengebunden Expertenwissen vorhanden. Hinsichtlich der Anforderungen von immer kürzeren Entwicklungszeiten, geringeren Entwicklungskosten und höherer Qualität sind Methoden gefordert, welche durch die Nutzung moderner IT-Werkzeuge eine Transformation der Wissensform ermöglichen.

Hierbei handelt es sich um die Umwandlung von explizitem in implizites Wissen, die Bestandteil verschiedener Methoden auf dem Stand der Technik ist. Bei der Transformation des Wissens wird der Experte meist als idealisierte Komponente des Prozesses beschrieben, als Teil der Wissensressource des Unternehmens. Spätestens bei der Anwendung der Methode muss hinterfragt werden, ob der Mitarbeiter sich in dieser Rolle ebenfalls sieht.

Eine Transformation von Wissen z. B. im Rahmen des Frontloadings muss bedeuten, dass der Experte sich hauptsächlich mit fortgeschrittenen Problemstellungen beschäftigt, in denen seine Kompetenz gefordert ist. Das Wissen, welches zur Lösung frühzeitiger Problemstellung benötigt wird, stellt er im Rahmen der Methode zur Verfügung. Über die Zeit entwickelt sich damit ein Kreislauf, welcher eine konstante Wissenstransformation im Rahmen des Frontloadings gewährleistet, da der Erwerb neuen Wissens für den Experten abgesichert ist.

In diesem Kapitel wird eine Vorgehensweise zur modellbasierten KBE-Methodenentwicklung mit dem Fokus auf die Prozesskette Konstruktion-Simulation vorgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Unterstützung des Systementwicklers. Mit dem später implementierten System soll der Konstrukteur bei der Anwendung fortgeschrittener Simulationstechniken unterstützt werden. Zu Beginn werden anhand ausgewählter Problemstellung und dem Stand der Technik allgemeine Anforderungen ermittelt, welche in die darauffolgende Vorstellung der Methode einfließen.

3.1 Ausgewählte Problemstellungen

Eine genaue Betrachtung unterschiedlicher Sichten auf die Teilaspekte Konstruktion und Simulation zeigt den unzureichenden Grad der Verknüpfung der beiden Disziplinen und die Notwendigkeit neuer Methoden zu ihrer Optimierung auf. Dabei betrifft dies nicht nur Schnittstellen zwischen den Systemen, sondern auch Features, Komponenten und die Verknüpfung von Berechnungs- und Auslegungsmethoden mit der Modellgeometrie in CAD-

Systemen, wie auch unterschiedliche Berechnungsdomänen selbst. Ebenso soll auch der Komplexitätsgrad bei der Erstellung von neuen Unterstützungssystemen verdeutlicht werden. Im Folgenden sind u. a. fünf Anwendungsfälle exemplarisch aufgeführt, welche in den folgenden Kapitel wieder, neben weiteren, thematisiert werden.

3.1.1 Apparatebau

Die klassische Auslegung von Druckbehältern ist durch Regelwerke wie die DIN EN 13445 und das AD 2000-Regelwerk abgesichert. Diverse Berechnungen können analytisch durchgeführt werden. Allerdings erfordern einige Anwendungsfälle den Einsatz numerischer Methoden. Die Definition eines umfassenden Produktmodells, welches alle Partialmodelle beinhaltet, muss an dieser Stelle angestrebt werden, vgl. Abbildung 3-1.

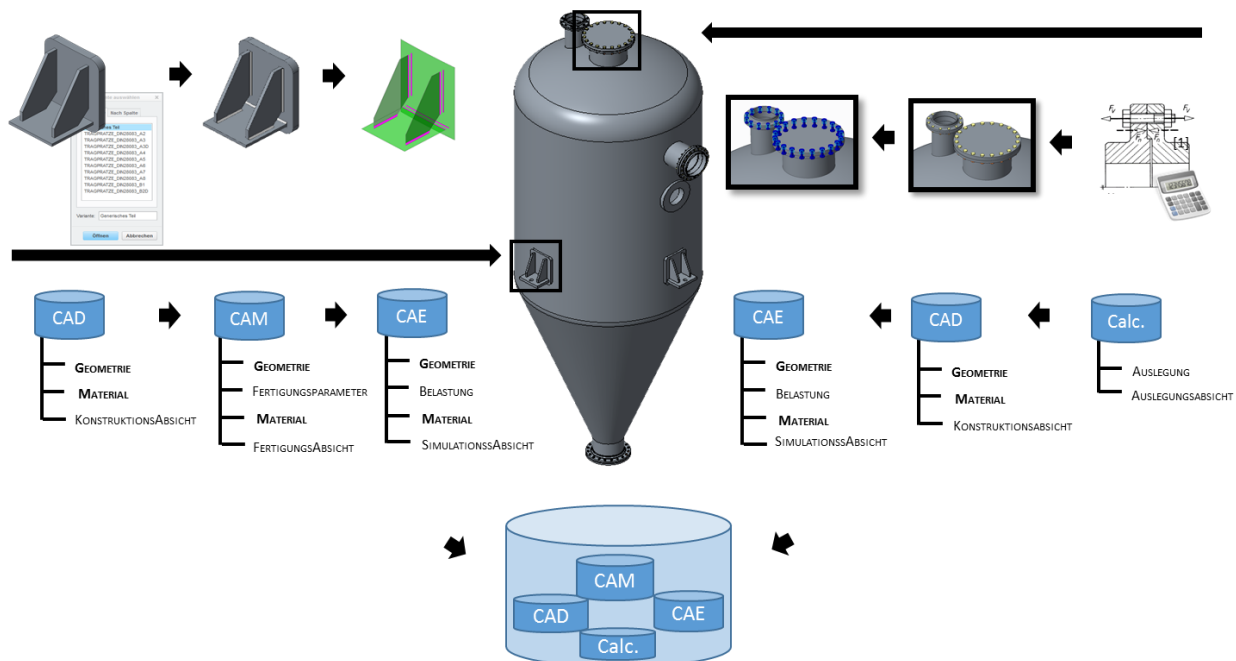


Abbildung 3-1: Sichten auf Druckbehälterauslegung

In der Abbildung 3-1 ist auf beiden Seiten jeweils exemplarisch eine unzureichende Verknüpfung der einzelnen Partialmodelle dargestellt. Auf der linken Seite ist eine Unterbaugruppe einer Tragpratte dargestellt. Standardmäßig ist in den meisten CAD-Systemen in den dargestellten Partialmodellen nur die Geometrie und das Material verknüpft. Die jeweiligen Absichten und Parameter sind jedoch meist nicht verknüpft, was ein teilautomatisiertes Processing quasi unmöglich macht. In diesem Beispiel betrifft dies u. a. Geometrieidealisationen wie auch Rand- und Lastbedingungen. Erste Ansätze wurden zwar bereits im Stand der Technik vorgestellt, eine durchgängige ist aber zumeist nicht gegeben.

Eine unbefriedigende Einbeziehung analytischer Berechnungen zeigen sich auch im Bereich der Flanschverbindungen, dargestellt auf der rechten Seite der Abbildung 3-1. Eine ausgewählte Schraubenverbindung wird meist analytisch berechnet. Die Auswahl der Schraubverbindung ist aber auch abhängig von der gewählten Geometrie der Flanschverbindung. Ebenso müsste bei der Annahme einer asymmetrischen Belastung die Dichtheit durch eine numerische Simulation überprüft werden. Eine ausreichende Verknüpfung der Partialmodelle ist auch an dieser Stelle nicht gegeben.

3.1.2 Spritzgussgerechter Bauteilentwurf

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Auslegung und Konstruktion spezifischer Produkte. Verdeutlicht werden soll dies am spritzgussgerechten Bauteilentwurf. Das Spritzgießen ist das Standardverfahren zur Herstellung von Kunststoffformteilen. Die Auslegung von neuen Formteilen und dementsprechend des zur Fertigung benötigten Werkzeug ist stark vom Wissen des Anwenders und vom Wissen aus der Literatur abhängig. Die Absicherung der Konstruktion erfolgt durch geeignete Softwarewerkzeuge, wie Tools zur strukturmechanischen oder rheologischen Simulation, welche teilweise schon in leistungsfähigen CAD-Systemen integriert sind. Eine hoher Verknüpfungsgrad zwischen den Systemen und dem CAD-System ist allerdings nicht vorhanden. Hier besteht Optimierungsbedarf, da gerade bei der Konstruktion des Formteils 70 % gesamten Produktentstehungskosten veranschlagt werden [St08]. Die Gestaltungsregeln, welche bei der Bauteilerstellung im CAD-System beachtet werden müssen, sind in diversen Fachbüchern wie [Eh07], [Br11] zu finden. Exemplarisch werden folgende genannt:

- Wanddicken so dünn und gleichmäßig wie möglich,
- Vermeidung von Masseanhäufungen,
- Ausschöpfung des Potenzials der freien Formgebung,
- Vermeidung ebener Flächen.

Eine spritzgussgerechte Unterstützung bei der Bauteilerstellung ist in CAD-Systemen nicht vorhanden. Die meisten Gestaltungsregeln besitzen zudem eine starke Abhängigkeit zum gewählten Material und Fertigungsverfahren. Dementsprechend müsste bei einer Integration von Gestaltungsregeln eine Anbindung an das gewählte Material und Verfahren gegeben sein.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der spritzgussgerechten Auslegung ist die Absicherung eines gleichmäßigen Füllverhaltens. Dieses wird meist mittels Füllsimulationen ermittelt. Hieraus lässt sich eine optimale Position des Angusses definieren. Es können aber Rückschlüsse hinsichtlich konstruktiver Änderungen am Formteil gezogen werden. Eine effiziente Verknüpfung der Partialmodelle, um den Anwender an dieser Stelle zu unterstützen, ist zurzeit noch nicht gegeben.

3.1.3 Schmalseiteneinheit einer Stranggussanlage

Wurde zuvor der Verknüpfungsgrad einzelner Partialmodelle behandelt, wird nun der Fokus auf unterschiedliche Simulationsdomänen gelegt. Hierzu wird im Folgenden ein Beispiel aus dem Anlagenbau vorgestellt. Stranggießanlagen werden zur kontinuierlichen Herstellung von Walzbarren und Pressbolzen eingesetzt. Eine wichtige Komponente ist die Schmalseiteneinheit. Mit dieser wird die Breite des zu gießenden Produktes festgelegt, vgl. Abbildung 3-2. Dementsprechend steht diese unter einer hohen thermischen und strukturmechanischen Belastung.

In diesem Rahmen wurde die Leistungsfähigkeit von Creo Simulate (PTC), welches die interne Simulationsumgebung von Creo Parametric (PTC) ist, hinsichtlich multiphysikalischer Problemstellungen überprüft. Im Anschluss an die Erstellung und Verifizierung des Simulationskonzeptes wurden verschiedene Varianten untersucht.

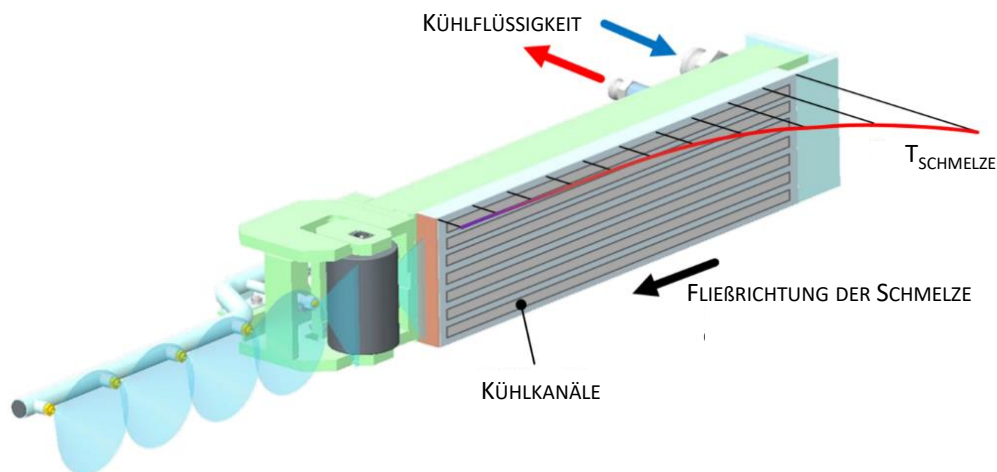


Abbildung 3-2: Schmalseiteneinheit (nach [Kl15b])

Die Durchführung einer thermisch/mechanischen Simulation für einzelne Komponenten wie auch für Baugruppen ist mit Creo Simulate möglich. Bei Baugruppen ist jedoch die Definition von Kontakten zwischen Komponenten beim Export der Temperaturen aus der thermischen Simulation gesperrt. Dementsprechend wird insbesondere die Verformung der Baugruppe kritisch betrachtet. Vorteilhaft erwies sich für die Validierung der Ergebnisse, dass die untersuchten Baugruppen bei der Firma SMS Siemag im Einsatz sind und Erfahrungswerte über Verformungen und Verschleiß vorliegen, so dass die Plausibilität sichergestellt werden konnte.

Ein gewählter Lösungsansatz war die Erzeugung einer Vielzahl von separaten Volumenbereichen in der Baugruppe. In diese wurden dann die Temperaturen manuell übertragen. Die Erzeugung dieser Bereiche ist sehr zeitintensiv und erfordert zusätzlich Erfahrung des Anwenders mit dem parametrischen Aufbau großer Baugruppen.

3.1.4 Lebensdauerprognose von Elastomerbauteilen

Neben der Verknüpfung der jeweiligen Partialmodelle des CAE- und CAE-Modells kann auch eine Kopplung von analytischen und numerischen Berechnungen erforderlich sein, ohne dass das eigentliche Geometriemodell im Vordergrund steht. Im Folgenden soll dies an einem Beispiel zur Lebensdauerprognose von Elastomerbauteilen verdeutlicht werden.

Die zunehmende Anwendung elastomerer Bauteile in unterschiedlichsten Systemen hat zur Folge, dass die Lebensdauerprognose für Elastomere zentraler Gegenstand vieler aktueller Forschungsarbeiten ist. In den Untersuchungen von Spitz [Sp12] wurde ein mathematischer Ansatz für dynamisch belastete Elastomerbauteile entwickelt, der durch ein nichtlineares Schadensakkumulationsmodell (nlSAM) die Vorhersage von Schädigungsverläufen und Ausfallzeitpunkten unter Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten bei der Bauteilbelastung ermöglicht.

Damit Elastomerbauteile hinsichtlich ihrer Zeitfestigkeit bzw. Lebensdauer beanspruchungsgerecht und ohne hohen experimentellen Aufwand optimiert werden können, benötigen Konstrukteure und Berechnungsingenieure Werkzeuge zur virtuellen Produktoptimierung. Bisherige Arbeiten, wie auch die von Spitz [Sp12], zeigen, dass die Lebensdauerprognosemodelle auf Basis experimenteller Untersuchungen häufig für das untersuchte Bauteil und im Rahmen der Prüfbelastungen ihre Gültigkeit haben. Damit diese auch darüber hinaus ihre Gültigkeit besitzen, müssen numerischen Methoden eingesetzt und die vorhandenen mathematischen Ansätze erweitert werden.

Die Lebensdauer wird abgeschätzt über einen Schädigungsgrad. Dieser ist definiert als der Schaden eines Bauteils bis zum Ausfall. Dieser ist meist global für das gesamte Bauteil definiert. Wegen der geforderten Übertragbarkeit auf andere Geometrien muss aber für ein Bauteil nicht nur ein globaler, sondern es müssen viele lokale Schädigungsgrade in Abhängigkeit der Anzahl der Netzelemente gebildet werden. Zur Ermittlung dieser Schädigungsgrade ist die Berechnung der lokalen Bauteilbeanspruchungen erforderlich. Diese Beanspruchungen sind durch FE-Simulationen zu berechnen. Auch das Materialmodell muss für alle Netzelemente eines FE-Netzes unterschiedlich definiert werden.

Zur Lösung dieses Anwendungsproblems muss zum einen die numerische Simulation mit dem mathematischen Modell gekoppelt und zum anderen ein Algorithmus entwickelt werden, welcher die Iterationen der Simulationsschleifen steuert. Das Ziel ist ein Anwenderprogramm, mit welchem ein Konstrukteur konstruktionsbegleitend eine Lebensdauerprognose für eine Elastomerkopplung berechnen kann.

3.1.5 Prüfstand zur Geradheitsmessung

Im Folgenden wird weiterer Anwendungsfall behandelt, welcher Defizite in der Unterstützung des Anwenders bei konstruktionsbegleitenden Simulationen aufzeigt, mit dem Schwerpunkt auf dem Postprocessing. Mit dem Funktionsumfang der meisten konstruktionsbegleitenden Simulationsumgebungen ist nur eine standmäßige Auswertung der Simulation möglich. Dies hat zum einen seine Vorteile, gerade um den nur grundlegend geschulten Anwender nicht zu überfordern. Werden etwas fortgeschrittenere Methoden bei der Auswertung benötigt, ist die Umsetzung meist schwierig.

Das folgende Anwendungsbeispiel thematisiert ein Messverfahren, mit dem eine durchgängige Vermessung der Geradheit von Stangenmodellen ermöglicht werden soll. Dabei ist vorgesehen, die Stangen in eine V-Rinne zu legen und eine Abstandsmessung zwischen Stange und Auflage durchzuführen. Die Entwicklung dieses Messverfahren soll durch einen virtuellen Prototyp abgesichert werden. Zu beachten ist dabei u. a. der Einfluss der Durchbiegung durch die Einbindung von Berechnungs- und Simulationswerkzeuge. Daraus folgt, dass die gesamte Auswertung im oder nach dem Postprocessing der Simulation erfolgen muss. Systemseitig ist aber für diese Art der Auswertung keine Unterstützung vorhanden. Im Rahmen dieses Projektes muss also vor der eigentlichen Ergebnisauswertung erst eine Vorgehensweise dazu ermittelt werden.

3.2 Anforderungen an eine Methode zur simulationsgerechten Absicherung

Die ausgewählten Problemstellungen zeigen eine unzureichende methodische Unterstützung des Konstrukteurs auf. Alle Beispiele zeigen, dass neue interdisziplinäre Features wie auch Komponentenmodelle im CAD-System benötigt werden. In diesen sind die einzelnen Partialmodelle vordefiniert und verknüpft. Ebenso ist eine einheitliche Datenbasis nötig, auf welche von allen Disziplinen gleichermaßen zugegriffen werden kann. Weitergehende Lösungsansätze erfordern an dieser Stelle ein domänenübergreifendes Unterstützungssystem für den Konstrukteur.

Zur Umsetzung dieser Ansätze wird eine allgemeine Vorgehensweise benötigt, welche den Systementwickler bei der gesamten Entwicklung einer wissensbasierten Unterstützung bei konstruktionsbegleitenden Simulationen für den Konstrukteur unterstützt. In diesem Sinne werden im Folgenden alle Anforderungen an eine allgemeine Vorgehensweise aus dem Stand der Technik, den ausgewählten Problemstellungen und der VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 zusammengefasst, vgl. Abbildung 3-3.

Der Methode werden vier allgemeine, in der Abbildung 3-3 auf der linken Seite dargestellte Anforderungen zugeordnet. Neben der zuvor angesprochenen Allgemeingültigkeit soll in Bezug zur VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 die Methode rollenbasiert aufgebaut werden. Am Entwicklungsprozess sind immer mindestens drei Rollen beteiligt: ein Wissensingenieur, ein Konstrukteur und ein Berechnungsexperte. Diese Rollen können teilweise fließend sein [VDI5610-2]. Eine frühe Einbeziehung aller am Entwicklungsprozess beteiligten Personen soll durch einen transparenten Prozess gewährleistet werden. Eine Forderung nach einer rechtlichen Absicherung ist auf das Unterkapitel 2.2.1 zurückzuführen: Analytische Berechnungsverfahren sind rechtlich abgesichert, numerische Verfahren dagegen nicht. Durch einen nachvollziehbaren Aufbau des Unterstützungssystems soll dem entgegengewirkt werden.

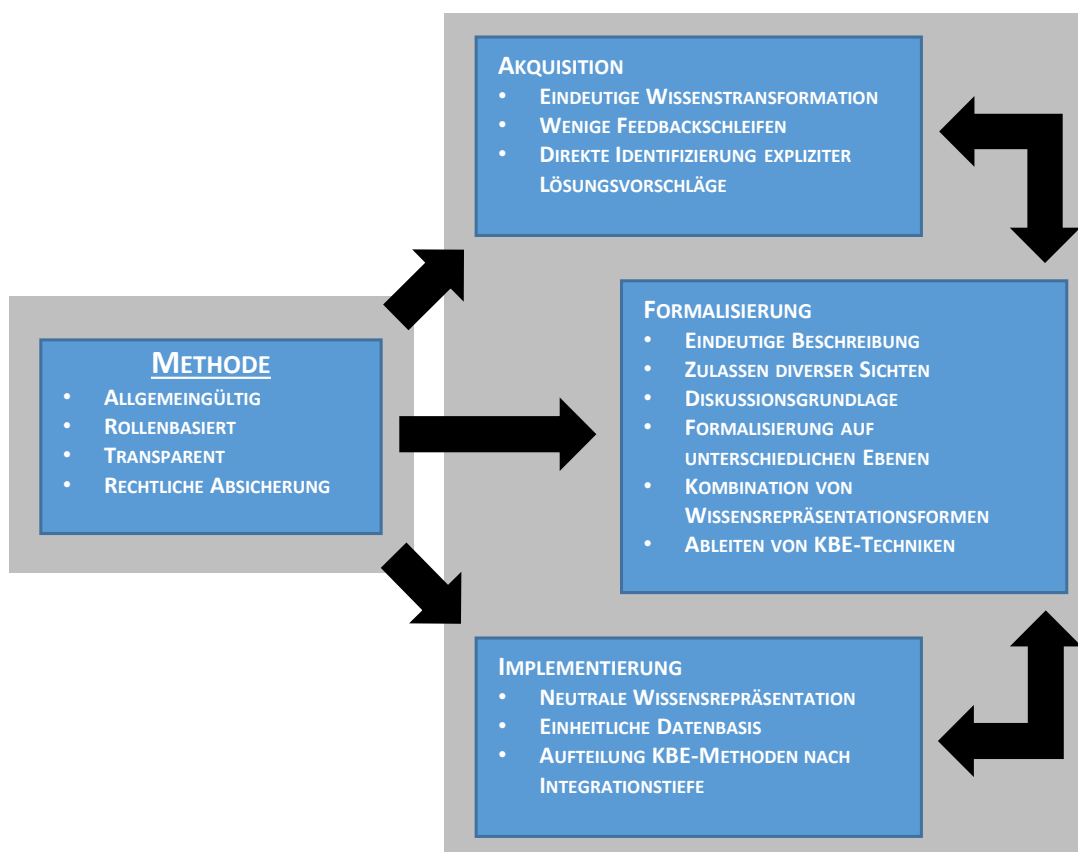


Abbildung 3-3: Allgemeine und spezifische Anforderungen an die Methode

Weiterhin wird die Methode in drei Bausteine aufgeteilt: die Akquisition, die Formalisierung und die Implementierung. Eine eindeutige Wissenstransformation zu einem frühen Zeitpunkt beschleunigt die Entwicklung eines wissensbasierten Systems ungemein und verhindert unnötige Iterationen. Eine weitere wichtige Anforderung an die Methode ist die direkte Identifizierung expliziter Lösungsvorschläge aus der gegebenen Form der Dokumentation. Dies kann durch den Wissensingenieur oder auch andere beteiligte Personen geschehen.

Viele der im Stand der Technik vorgestellten Methoden behandeln das Thema der Formalisierung nicht ausreichend. Nach der VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 kann dies u. a. durch den Fokus auf kleine KBE-Systeme begründet werden [VDI5610-2]. Die Richtlinie selbst fokussiert auf die Punkte der Akquisition und der Implementierung [VDI5610-2]. Eine allgemeine Empfehlung zur Formalisierung des Systems ist nicht vorhanden. Dies könnte auch dadurch verursacht sein, dass eine Forderung danach noch nicht erkannt wurde. Gerade bei komplexen Systemen wird durch eine eindeutige Formalisierung des Systems der Programmieraufwand bei der späteren Implementierung deutlich reduziert. Eine wichtige Anforderung zur Formalisierung ist demnach eine eindeutige Beschreibung des Systems. Eine Lesbarkeit für programmierunerfahrene Anwender wird ebenfalls gefordert. Dies impliziert auch die Definition unterschiedlicher Sichten auf das System, da dies so als Diskussionsgrundlage verwendet werden kann, was die weitere Einbeziehung aller Beteiligten unterstützt. Dies wird bestärkt durch eine Forderung nach einer Formalisierung des Systems auf unterschiedlichen Ebenen (Funktion, Anforderungen, Struktur). Alle aufgeführten Anforderungen sind hinreichend für eine vollständige Formalisierung des Systems. Weitere Anforderungen sind das direkte Ableiten passender Wissensrepräsentationsformen und KBE-Techniken. Dadurch sind alle am Entwicklungsprozess beteiligten Personen gezwungen, die Formalisierung des Systems dahingehend aufzubereiten. Gefordert ist an dieser Stelle eine Aufteilung der KBE-Methoden nach Integrationstiefe, an der man sich orientieren kann. Eine bestmögliche Pflege und Wartung des Systems ist möglich, wenn die Datenbasis einheitlich und neutral vorliegt. Dies geht in die Forderung nach einer neutralen Wissensrepräsentation über.

3.3 Systemtechnischer Ansatz

Aus den zuvor ermittelten Anforderungen wird eine Vorgehensweise zur KBE-Methodenentwicklung abgeleitet. Die klassischen Elemente bei der Entwicklung wissensbasierter Systeme im Bereich der virtuellen Konstruktion sind die Erstellung einer Wissensbasis und die Implementierung in die CAD-Umgebung. Die Notwendigkeit und die Forderung nach einer eindeutigen Formalisierung mit allen am Prozess beteiligten Personen wurde aufgezeigt. Dementsprechend wird den beiden Elementen als drittes die Systementwicklung zugeordnet. In der folgenden Abbildung 3-4 sind die Meilensteine dargestellt.

Das erste Element ist und bleibt die Erstellung einer Wissensbasis. Die Wissensakquisition, die auch problemspezifische Besonderheiten berücksichtigen muss, ist dabei eine Voraussetzung für die Qualifizierung des Modellbildungsprozesses. Die Formalisierung des expliziten Wissens erfolgt durch Methoden aus der Systementwicklung, welche u. a. im Stand der Technik vorgestellt wurden. Die Umsetzung erfolgt durch moderne KBE-Methoden.

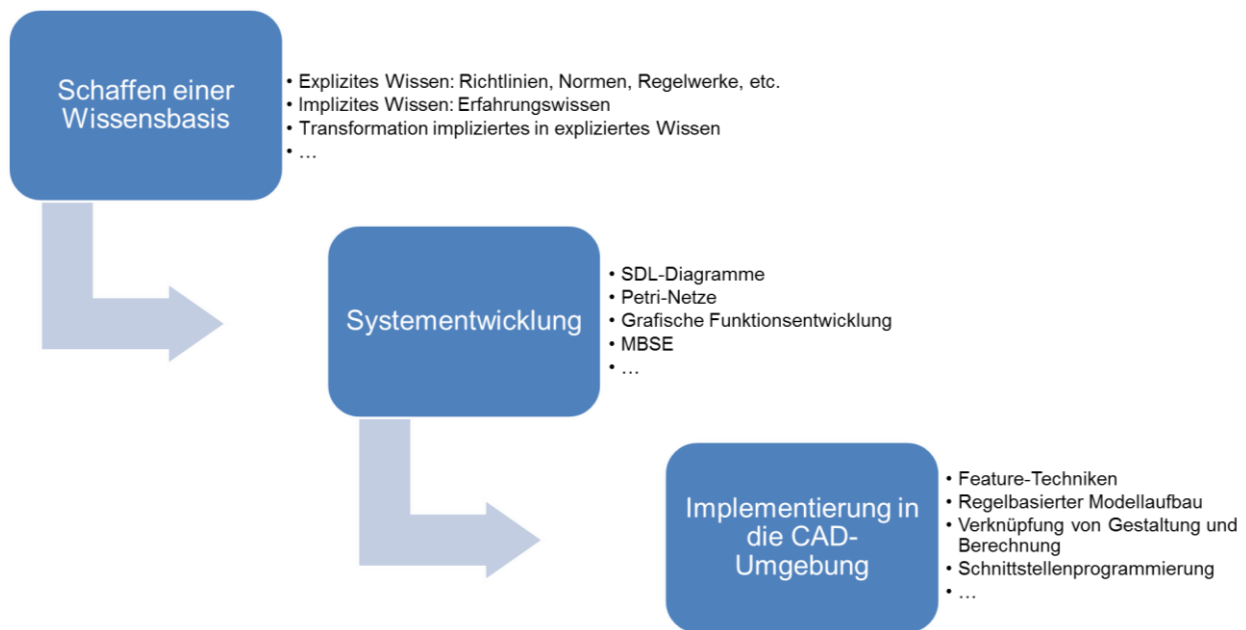


Abbildung 3-4: systemtechnischer Ansatz zur KBE-Methodenentwicklung

3.3.1 Erstellung der Wissensbasis

Die Grundlage für jede Methode ist eine Vorgabe von Wissen, welches in ein System implementiert werden muss. Der Ansatz soll dabei gleichermaßen auf bestehende wie auch neue Problemfelder angewendet werden. Das heißt, dass im ersten Fall Berechnungen abgeschlossen sind und das Wissen über die Vorgehensweise über den gesamten Berechnungsprozess bereits dokumentiert ist. Hier kann aus dem bereits vorhandenen Wissen die Systemerstellung erfolgen. Im zweiten Fall liegt das zu einem neuen Problemfeld erforderliche Wissen noch nicht vor. In beiden Fällen muss das relevanten Wissen aufbereitet werden, unabhängig davon, ob dieses implizit oder explizit vorliegt, da sonst die Anforderung der direkten Ableitung expliziter Lösungsvorschläge nicht erfüllt ist.

Techniken zur Wissenserhebung, für explizites und implizites Wissen, sind in unterschiedlichen Literaturquellen, wie [GoDa], [St01], [K115b] zu finden. In der VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 werden z. B. folgende Techniken beschrieben und zusammengefasst [VDI5610-2]:

- Interviewtechniken
- Textanalysen
- Beobachtungstechniken
- Reviewtechniken

Die Interviewtechniken, wie auch die Beobachtungstechniken zeichnen sich durch einen direkten Dialog des Wissensingenieurs und des Experten aus, also die Wissensumwandlung.

Die Techniken der Textanalysen dienen der Extraktion von relevantem Wissen aus Lehrbüchern, Normen und Richtlinien alleine durch den Wissensingenieur. Weitere Techniken zur Wissenserhebung sind z. B. diverse Analysetechniken, welche ihren Ursprung im Qualitätsmanagement haben und im Stand der Technik vorgestellt wurden, vgl. Unterkapitel 2.1.2.

In dem zu entwickelnden Ansatz wird als Methode eine modifizierte FMEA verwendet. Eine FMEA stellt oft die erste Explikation von impliziten Wissen dar [Di07], [TiDe+11]. Das Wissen über fehlerrelevante Zusammenhänge wird in FMEA-Formularen gesammelt. Vom Anwender ist gefordert, dass er ein solches Formular hinsichtlich einer abgeschlossenen oder neuen Problemstellung ausfüllt. Die daraus empfohlenen Maßnahmen zeigen explizite Lösungsansätze auf. Diese werden dann neben von vornherein explizit vorliegenden Gestaltungs- und Konstruktionsregeln in der Wissensbasis abgelegt.

Tabelle 3-1: FMEA-Formular

Funktion	Potenzieller Fehler	Potenzielle Folge	Ursache	Empfohlene Maßnahme
	Fehlerart	Fehlerfolge	Fehlerursache	
Wo?	Wie?	Was?	Warum?	
Erstellung des Simulationsmodells	Unzureichende Modellbildung des Simulationsmodells	-Fehlerhafte Auslegung der Schraub- und Flanschverbindung -Versagen der Komponenten	Unzureichende Verknüpfung des CAD- und Simulationsmodells	-Erstellung von Simulationstemplates -Verknüpfung von Normen und Richtlinien ins CAD-System -Erstellung von Simulationsklassen (nach [VDI2230-2])
Überprüfung der Dichtheit bei asymmetrischer Belastung	Unzureichende Modellbildung des Simulationsmodells	-Fehlerhafte Auslegung der Schraub- und Flanschverbindung -Leckage -Versagen der Komponenten	Unzureichende Verknüpfung des CAD- und Simulationsmodells	-Erstellung von Simulationstemplates -Erhöhung der Vorspannkräfte -Erstellung einer Optimierungsroutine zur adaptiven Anpassung der Vorspannkräfte
....

In der Tabelle 3-1 ist der modifizierte Aufbau eines FMEA-Formulars dargestellt. Zur Verdeutlichung ist exemplarisch ein Auszug aus dem Anwendungsbeispiel des Apparatebaus

eingearbeitet, vgl. Unterkapitel 3.1.1. Aufgezeigt wird die unzureichende Einbeziehung analytischer Berechnungen bei der Flanschauslegung mit dem Schwerpunkt auf die Schraubverbindung.

Der Anwender füllt die FMEA auf die geforderte Problemstellung aus. Die empfohlene Maßnahme entspricht dann, wie zuvor schon erwähnt einem ersten expliziten Lösungsvorschlag. Bei beiden dargestellten Funktionen ist die Erstellung von Simulationstemplates ein Vorschlag. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden zu beiden Funktionen praktische Umsetzungen aufgezeigt, vgl. Unterkapitel 4.3.3 und 4.5.3.

Ein genereller positiver Nebenaspekt ist, dass durch die Anwendung einer FMEA der gesamte Prozess transparent ist, gerade in Bezug auf die zuvor geforderte rechtliche Absicherung bei numerischen Berechnungen. Explizites Wissen wird innerhalb dieser Methode durch Textanalysen aufbereitet und bereitgestellt.

3.3.2 Systementwicklung

Das zuvor ausgearbeitete Wissen muss in einem nächsten Schritt formalisiert werden. Die wichtigsten Anforderungen daran waren, dass das System lesbar für alle Beteiligten ist und dass dieses für den Programmierer eine eindeutige Beschreibung besitzt. Die bekanntesten Methoden zur Wissensstrukturierung sind MOKA [St01] und CommonKADS [Sc93], vgl. Unterkapitel 2.6.2. Stokes fasste Techniken zur Analyse und Strukturierung von Wissen in folgende Kategorien zusammen [St01]:

- Illustrations
- Constraints
- Activities
- Rules
- Entities

Eine Schwierigkeit ist die Anwendung dieser allgemeinen Techniken auf eine explizite (und praktische) Problemstellung, gerade auch bei der Beachtung komplexer Systeme. Das Systems Engineering bietet dazu ganzheitliche multidisziplinäre Ansätze, vgl. Unterkapitel 2.5.1. Die Anwendung erfordert allerdings ein Umdenken von der dokumentenzentrierten zur modellbasierten Systementwicklung. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass Dokumente nicht mehr als Ursprungsquelle gesehen werden, sondern diese eine Sicht auf das definierte Modell beschreiben und von diesem abgeleitet werden [Al12]. Dies sichert die Anforderungen nach einer Kombination unterschiedlicher Wissensrepräsentationsformen und dem direkten Ableiten von KBE-Methoden ab.

Für die Systementwicklung wird die Modellierungssprache SysML verwendet. Mit SysML wird aus dem aufbereiteten Wissen ein Systemmodell entwickelt. Dazu werden unterschiedliche Strukturen, wie die Anforderungsstruktur, eine Funktionsstruktur oder eine logische Struktur definiert. In SysML erfolgt die Systemdefinition über Diagramme. Ein wichtiger Diagrammtyp der Verhaltensdiagramme ist u. a. das Aktivitätsdiagramm. Dieses dient zur Abbildung des Ablaufs eines definierten Anwendungsfalles. Gleichzeitig ist dieses auch eine objektorientierte Adaption eines Programmablaufplanes (PAP) [Al12]. In Anforderungsdiagrammen werden die Anforderungen an das System, Teilsystem und Relationen festgelegt [Al12]. Die Strukturdiagramme lassen sich weiter unterteilen in das Paketdiagramm, das Blockdefinitionsdiagramm und das interne Blockdefinitionsdiagramm. Mit dem Paketdiagramm lassen sich Aufteilungen eines Projektes, ähnlich wie die Einteilung in Arbeitspakete, darstellen. Für eine ausführliche Beschreibung wird auf existierende Literatur wie [Al12], [WeSo14] verwiesen.

An der Entwicklung des Systems sind mindestens drei Rollen in einem Team beteiligt, siehe auch Abbildung 3-5. Der Systementwickler ist als quasi Projektleiter gekennzeichnet und kann über den dargestellten Input aus Schritt 1, mit der Erstellung des grundlegenden Systemmodells im Schritt 2 beginnen.

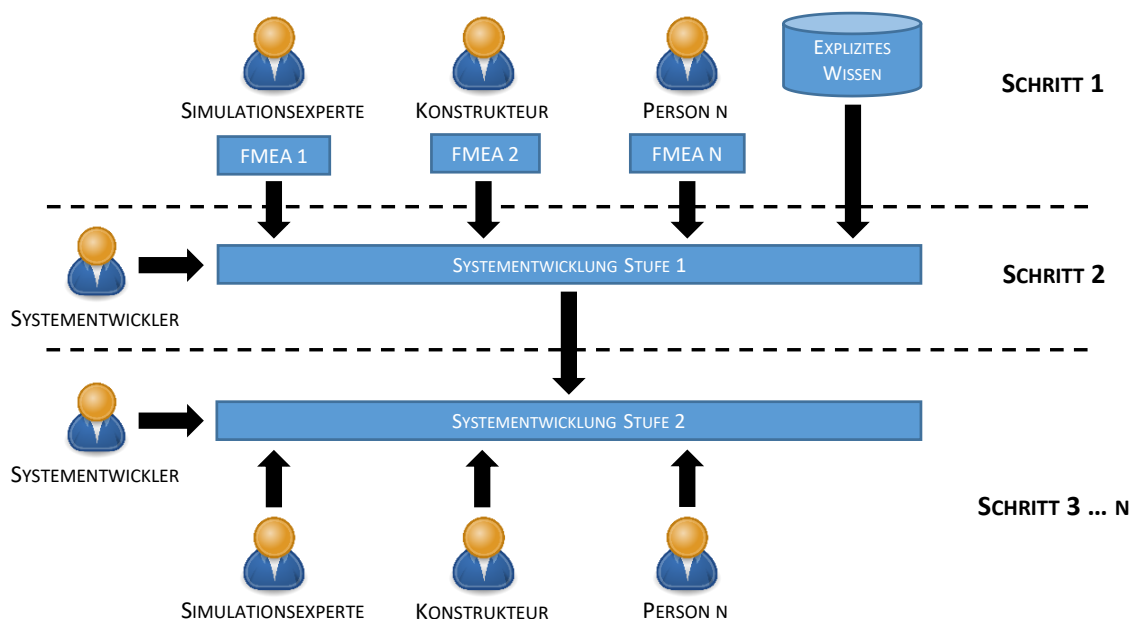


Abbildung 3-5: Gemeinsame Definition des Systemmodells

Der Input sind die erstellten FMEAs und bereits explizit vorliegendes Wissen in Form von Standards, Normen, etc. Die unterschiedlichen Sichten auf Informationen gewährleisten die geforderte Diskussionsbasis, um den Berechner und Konstrukteur in die Entwicklung des Systems mit einzubeziehen, gekennzeichnet als Schritt 3. Nach einer bestimmten Anzahl von Feedbackschleifen ist die Systementwicklung abgeschlossen. Sind mehrere Lösungsansätze

vorhanden, soll eine Abschätzung des Aufwands/Nutzens durch alle Anwender erfolgen und in der ersten Feedbackschleife eine Einigung auf einen Ansatz erreicht werden.

Der Ansatz sieht vor, dass der Systementwickler in der ersten Stufe der Systementwicklung aus der zuvor erstellten FMEA, den Anforderungslisten und weiteren explizit vorliegenden und aufbereiteten Daten zu Rand- und Lastbedingungen die ersten grundlegenden Diagramme modelliert. Damit wird ein erster Überblick über die Gesamtstruktur definiert. Dazu gehören die Anforderungs-, die Funktions- und die logische Struktur des Systems. Aus diesen lassen sich im weiteren funktionale Abläufe und Anwendungsfälle herleiten. Dieses bildet die Grundlage für erste Feedbackschleifen in der zweiten Stufe. Aus den Schleifen ergeben sich dann die weitere Detailierung der Diagrammtypen und neue Diagramme.

Durch die unterschiedlichen Diagrammtypen (Sichten) ist die Definition gängiger Wissensrepräsentationsformen und die Kombination untereinander abgesichert. Diese sind im Bereich der Ingenieurwissenschaften die [Lu09], [VDI5610-2]:

- Constraintbasierte Repräsentation
- Regelbasierte Repräsentation
- Objektorientierte Repräsentation

Die VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 fügt den typischen Formen der constraintbasierten Repräsentation, wie geometrische und ingenieurmäßige Constraints, neuerdings noch durch Data-Mining akquirierte Vorhersagemodelle, Regressionsgleichungen oder künstliche neuronale Netze hinzu [VDI5610-2].

3.3.3 Implementierung in die CAD-Umgebung

Nach der Erstellung der Struktur des Systems folgt die Implementierung in die CAD-CAE Umgebung. Abhängig vom Komplexitätsgrad des Systems muss entschieden werden, ob die Implementierung vom Konstrukteur/Berechner oder von einem Programmierer durchgeführt werden kann, vgl. Abbildung 3-6. Eine objektive Aufteilung wird durch die individuellen Fähigkeiten des jeweiligen Mitarbeiters erschwert, dem wird durch den rollenbasierten Aufbau entgegengewirkt.

Ein hoher Komplexitätsgrad würde eine Implementierung durch den Programmierer und eine methodische Unterstützung in Form von Rückfragen zum entwickelten System durch den Konstrukteur oder Berechner bedeuten. Bei einem niedrigeren Komplexitätsgrad kann die Implementierung auch durch den Konstrukteur oder Berechner erfolgen.

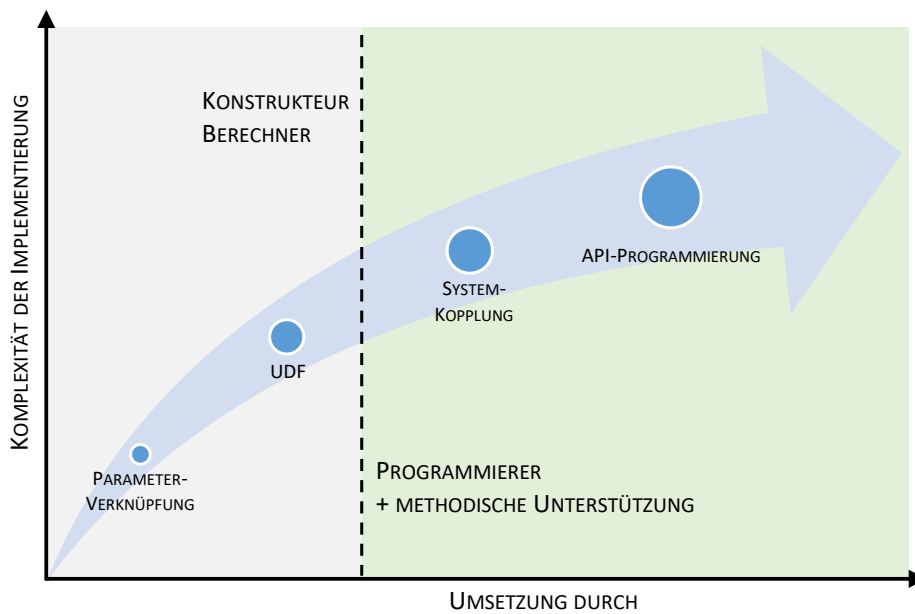


Abbildung 3-6: Komplexität der Implementierung

3.3.3.1 KBE-Techniken

Die Implementierung in ein CAD/CAE-System erfolgt über unterschiedliche KBE-Techniken. Der Einsatz der Techniken ist anwendungsspezifisch und erfordert eine weitergehende Einteilung nach bestimmten Kriterien, wie z. B. die Integrationstiefe. Abhängig von dem im Kapitel zuvor erstellten System werden vom Systementwickler die passenden Techniken zur simulationsgerechten Absicherung gewählt. Eine Auswahl möglicher Techniken sind:

- Feature-Techniken,
- Regelbasierter Modellaufbau,
- Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung,
- Schnittstellenprogrammierung.

Die Wertigkeit der Absicherung ist abhängig vom Umfang der Integrationstiefe der jeweiligen Technik. Die Wertigkeit kann dabei als Indikator für den Informationsgrad definiert werden. Angewendet werden die Techniken auf drei verschiedenen Ebenen. Die Ebene 1 beschreibt Analysefeatures. In diesen ist der Definition nach nur Semantik und keine Geometrie enthalten. Wenn ein Feature Geometrie und Semantik enthält, ist dies definiert als Konstruktionsfeature, welches der Ebene 2 entspricht. Die Ebene 3 enthält Komponenten als schon vollständig aufgebaute CAD/CAE-Modelle. Allgemein ist eine Klassifizierung wie in Abbildung 3-7 zulässig.

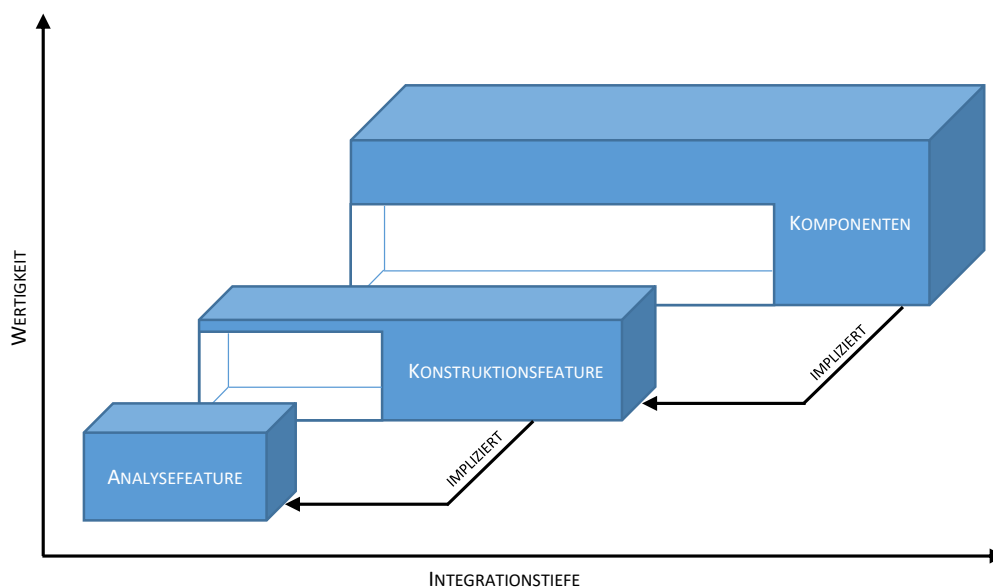


Abbildung 3-7: Wertigkeit der Absicherung

Zu beachten ist dabei, dass eine Technik mit einer höheren Wertigkeit durchaus auf dem Wissen einer Technik mit einer niedrigeren Wertigkeit basieren kann. Dies sichert auch die Verwendung des Wissens, welches zur Definition eines Analysefeatures notwendig ist, für die Definition eines Konstruktionsfeatures ab. Somit kann der Nutzen gegenüber dem Aufwand einer simulationsgerechten Absicherung optimal gewichtet werden.

Welche Technik angewendet wird, leitet sich aus dem zu erstellenden System ab. Geht die simulationsgerechte Absicherung vom Blockdefinitionsdiagramm aus, ist dies zumeist ein erster Hinweis auf den Aufbau simulationsgerechter Komponenten. Umgekehrt, wenn die Absicherung vom Aktivitätsdiagramm ausgeht, weist dies auf Features hin. Die Techniken zur simulationsgerechten Absicherung werden ausführlich im Kapitel 4 beschrieben.

3.3.3.2 Verknüpfung des CAD-Systems mit Wissens- und Datenbasis

Weitere Anforderungen an die Implementierung sind eine neutrale Wissensrepräsentation und eine einheitliche Datenbasis. Eine Erstellung von wissensbasierten Systemen erfolgt in CAD-Systemen in den meisten Fällen über Add-Ins oder spezielle Expertensysteme. Innerhalb der Recherche zum Stand der Technik wurden unterschiedliche Techniken zur Wissensbereitstellung identifiziert. Einige davon sind:

- Der Parametereditor im CAD-System
- Der Beziehungeditor im CAD-System
- Im Quellcode im Falle der Anwendungsprogrammierung
- In externer Software
- In einer Datenbank

Eine neutrale Wissensrepräsentation wird durch eine Trennung der Wissensbasis und der Inferenzkomponente erreicht. Dies kann lokal oder auch webbasiert erfolgen. Webbasiert kann der Zugriff auf die Wissensbasis durch die Verwendung eines Webservice erfolgen. Dieser greift bei einer Anfrage aus dem CAD-System auf einen Datenbankserver zu. Die Wissensrepräsentationsformen werden in Webservice implementiert. Im CAD-System selbst wird nur die Anwenderschnittstelle z. B. in Form einer graphischen Benutzerschnittstelle (engl. Graphical User Interface, abk. GUI) definiert. Dies gewährleistet eine Programmiersprachenunabhängigkeit vom CAD-System. Der Änderungsaufwand bei Anpassung und Wartung der Systeme erfolgt damit hauptsächlich im Webservice und in der Datenbank. Für einen plattform- und implementationsunabhängigen Metadatentransfer bieten sich verschieden strukturierte Dateitypen an, z. B. das Extensible Markup Language (XML)-Format oder das JavaScript Object Notation (JSON)-Format. Tiefergehende Informationen sind u. a. in [Ma15], [MaHu+16], [Kö16], [Kö17] zu finden.

3.4 Einordnung in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess

Im Folgenden soll diskutiert werden, inwiefern die KBE-Methodenentwicklung in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess eingeordnet werden kann. In vielen Fällen wird der Entwicklungsaufwand und der Nutzen von wissensbasierten Systemen nicht korrekt abgeschätzt. Dies soll vor dem allgemeinen Hintergrund des Frontloadings und spezifisch nach Konstruktionsart geschehen. Zu betonen ist an dieser Stelle nochmals die Bedeutung des CAD-Modells für die gesamte (rechnerunterstützte) Produktentwicklung, da fast in jeder Phase ein bestimmtes Partialmodell abgeleitet und verwendet werden kann.

3.4.1 Phasenbezogenes Frontloading

Der Begriff Frontloading bezieht sich auf die erste Phase des Entwicklungsprozesses, da an dieser Stelle der größte Anteil der Produktionskosten festgelegt wird. Ebenso haben Fehler hier den größten Einfluss auf den weiteren Prozess. Doch auch in den weiteren Phasen, wie z. B. der Detailkonstruktion und der Produktion, lassen sich Kosten durch einen frühen und durchgängigen Einsatz von IT-Werkzeugen einsparen und Fehler weiter vermeiden. Dies gilt insbesondere bei einer durchgängigen Verwendung von CAD-Modellen mit einer einheitlichen Datenbasis. Dies kann mit der entwickelten Methode sichergestellt werden. Die zu Beginn von Kesselmanns zitierte geringe Systemunterstützung in der Konzept- und Entwurfsphase kann abgesichert werden, ebenso wie die Forderung von Hagenrainer, dass das entwickelte System selbstständig auf Expertensoftware zugreifen kann [Ke14], [Ha16]. Beides wird auch in den folgenden Kapiteln an praktischen Beispielen verdeutlicht.

Eine tiefgehende Verknüpfung der Partialmodelle eines CAD-Modells in den ersten drei Phasen des Frontloadings bedeutet, dass sich die Fehlerauftretswahrscheinlichkeit reduziert.

Dies wiederum wirkt sich positiv auf die Kostenreduzierung auf. Der höhere Verknüpfungsgrad bedeutet zusätzlich auch eine Beschleunigung der Entwicklungszeit.

Eine Anforderung an die entwickelte Methode war eine Anwendbarkeit für komplexe Systeme. Diese sollen den Konstrukteur durch moderne KBE-Methoden unterstützen. Es muss abgeschätzt werden, inwiefern sich die Entwicklungskosten amortisieren. Zwei wichtige Punkte für die Erstellung von durchgängigen KBE-Systemen mit dem Fokus Frontloading sind:

- Eine Qualitätserhöhung des rechnerunterstützten Konstruktionsprozesses
- Eine Senkung der Fehlerkosten durch wissensbasierte Methoden

Zwei Punkte dagegen:

- Entwicklungskosten u. a. durch Personalaufwand
- Hohe Abweichung vorhandener Prozesse, dadurch hoher Schulungsaufwand

Eine abschließende Beurteilung eines KBE-Projektes kann nur individuell bei Betrachtung der jeweiligen Problemstellung durchgeführt werden.

3.4.2 Einordnung nach Konstruktionsarten

Eine erste Aufgliederung der drei Konstruktionsarten über die drei zuvor vorgestellten Integrationstiefen lässt darauf schließen, dass der größte Nutzen, alleine durch den größten Anteil an Produktentwicklungsprozessen, bei der Anpassungskonstruktion liegt, vgl. Unterkapitel 2.1.3.1. Allerdings fällt bei der Betrachtung der Integrationstiefe auf, dass bei der Anpassungskonstruktion zum einen Komponenten wie bei Variantenkonstruktionen und zum anderen Analyse- und Konstruktionsfeatures wie bei der Neukonstruktion benötigt werden. Dies bedeutet, dass für eine vollständige wissensbasierte Absicherung einer Anpassungskonstruktion eine wissensbasierte Absicherung einer Variantenkonstruktion und einer Neukonstruktion notwendig ist.

Auch wenn die Neukonstruktion den geringsten Anteil besitzt, muss dies nicht den Einsatz wissensbasierter Methoden ausschließen. Dies trifft z. B. auf die Unterstützung von ganzheitlichen Modellierungsstrategien zu. Diese werden durch individuell erstellte Features unterstützt. Ebenso ist abgesichert, dass alle Konstrukteure auf dasselbe Wissen zugreifen. Eine praktische Anwendung ist dazu in Kapitel 5 zu finden. Bei Erfolg eines Produktes ist die Umwandlung zu einer Anpassungskonstruktion zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhersehbar. In diesem Fall kann eine wissensbasierte Absicherung direkt weiterverwendet werden.

Im Falle von Variantenkonstruktionen kommen Komponentenmodelle zum Einsatz. Dies bedeutet, dass vollparametrisierte Modelle definiert sind, die über mindestens zwei verknüpfte Partialmodelle verfügen.

Es wird deutlich, dass eine wissensbasierte Unterstützung für die Auslegung von Produkten bei fast allen Konstruktionsarten als sinnvoll betrachtet werden kann. Im Falle einer Neukonstruktion muss allerdings analysiert werden, inwiefern neuentwickelte Features auch weiterhin eingesetzt werden können.

3.5 Anwendungsbeispiel „Schmalseiteneinheit“

Zur Verdeutlichung des entwickelten Ansatzes wird dieser auf das Anwendungsbeispiel der Schmalseiteneinheit, aus Unterkapitel 3.1.3, angewendet. Ziel ist es, eine prototypische Lösung zu entwickeln, mit der ein Konstrukteur konstruktionsbegleitend verschiedene Varianten einer Schmalseiteneinheit simulieren kann. An der Systementwicklung sind dem Ansatz nach vier Rollen zu beteiligen. Neben dem Konstrukteur und Systementwickler sind dies der Simulationsexperte als Experte des Systems Creo Simulate und ein Programmierer.

3.5.1 Wissenstransformation

Im ersten Schritt der Erstellung der Wissensbasis wird analysiert, welche Daten explizit vorliegen und relevant sind. Dazu gehören u. a. die real gemessenen Daten aus dem Betrieb der Anlage. Die möglichen Lösungswege sind vom impliziten Wissen des Simulationsexperten abhängig. Dementsprechend muss das Wissen transformiert werden. Dazu stellt der Systementwickler diesem das vorgestellte FMEA-Formular zur Verfügung. In diesen beschreibt der Experte seine Lösungswege, vgl. Tabelle 3-2.

Aus der Tabelle 3-2 lassen sich explizite Lösungsansätze ableiten. Aus den geforderten Funktionen ergeben sich empfohlene Maßnahmen, wie das Simulationsmodell und die Kopplung aufgebaut werden muss. Im Falle dieser Baugruppe wird deutlich, dass eine Kopplung des thermischen und strukturmechanischen Simulationsmodule über eine gegebene Standard-Schnittstelle nicht zielführend ist. Die Durchführung einer nichtlinearen Berechnung ist dann nicht zulässig. Die drei sich ergebenden Lösungsmöglichkeiten sind eine manuelle partielle Definition der thermischen Lastbedingungen, die Einbindung der thermischen Last aus externer Berechnungssoftware oder eine Kopplung der Netze über Anwendungsprogrammierung. Der erste Vorschlag wurde im Rahmen der ersten Umsetzung in Unterkapitel 3.1.3 durchgeführt und erwies sich als schlecht reproduzierbar und automatisierbar. Die Kopplung des Systems mit einer weiteren Simulationsumgebung wird ausgeschlossen, da der Programmablauf intern sein soll. Der dritte Ansatz, die Kopplung der Netze über Anwendungsprogrammierung wird im diesem Schritt als zielführend betrachtet.

Tabelle 3-2: FMEA Schmalseiteneinheit

Funktion	Potenzieller Fehler	Potenzielle Folge	Ursache	Empfohlene Maßnahme
Ermittlung der Temperaturlast	Unzureichende Modellbildung der Kühlung	Abweichung des Temperaturprofils von der realen Temperaturverteilung	Globale konvektive Kühlrandbedingungen (iterativ ermittelt)	-Feste Temperaturwerte nach Tabelle -externe CFD-Sim. mit Temperaturverteilung
Abbildung des Materialverhaltens	Temperaturinvariante Steifigkeitsmatrix	Abweichung von der realen Verschiebung der Knoten	Festigkeitswerte des Materials sind temperaturabhängig	-Berücksichtigung eines nichtlinearen Materialverhaltens -Temperaturkorrekter
Überprüfung der Baugruppenverformung und der Dichtigkeit der Verbindung	Unzureichende Definition der Schnittstellen zwischen Komponenten	-Singularitäten im Spannungsverlauf -Keine Prüfung der Dichtigkeit möglich -keine reale Verschiebung	-Haftbedingung: Komponenten sind miteinander verschmolzen -keine Kontaktdefinition (Kontaktkräfte)	-Kontakte definieren (Nichtlinearitäten) -Temperaturdefinition für Volumenbereiche
	Temperaturdefinition für Volumenbereiche	Unstetigkeiten im Spannungsverlauf	Sprunghafte Temperaturänderung in den Volumenbereichen	-Einbinden des Temperaturverlaufes aus externer Berechnungssoftware -Kopplung der Netze über Anwendungsprogrammierung
	Kontakte definieren (Nichtlinearitäten)	Temperatur kann nicht aus thermal importiert werden	Netze bei Kontaktdefinition in Structure nicht identisch	

3.5.2 Systementwicklung

Im ersten Schritt der Systementwicklung definiert der Entwickler das grobe System. Er nutzt dazu das zuvor ermittelte explizite Wissen und die vom Simulationsexperten entwickelte FMEA. Er definiert dazu erste Diagramme, in diesem Fall ein Paket-, Blockdefinitions- und ein Aktivitätsdiagramm. Diese drei Diagrammtypen sollen die Basis des Systems bilden. Auf weitere Diagrammtypen wird im Rahmen dieses einführenden Beispiels verzichtet.

Aus der FMEA lässt sich für das Paketdiagramm ableiten, dass sich das Projekt „Simulation Schmalseiteneinheit“ in eine CAE-Methodikentwicklung und ein zu erstellendes Anwendungsprogramm aufgliedert, vgl. Abbildung 3-8.

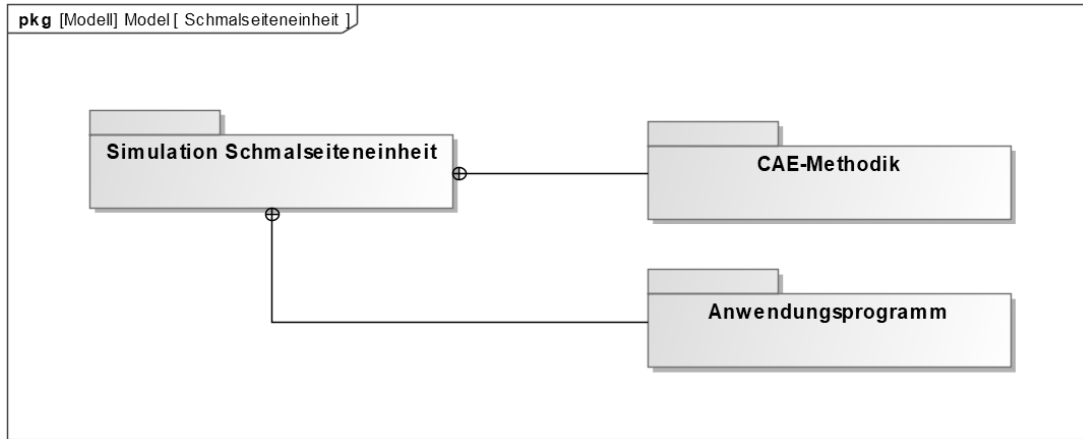


Abbildung 3-8: Paketdiagramm Schmalseiteneinheit

Das Blockdefinitionsdiagramm beschreibt die Struktur der Baugruppe, siehe auch Abbildung 3-9. Die Abhängigkeiten der Bauteile untereinander sind dadurch eindeutig beschrieben. Die Kopplung der Simulation teilt sich auf die Blöcke CAD-Umgebung, CAE-thermisch und CAE-strukturmechanisch auf.

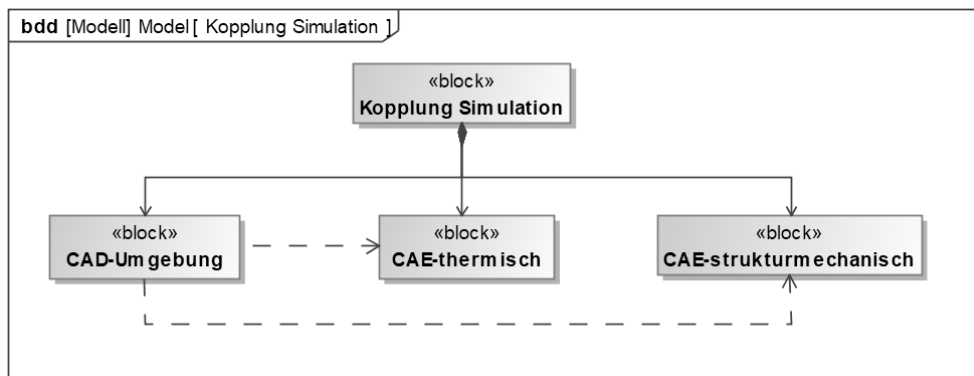


Abbildung 3-9: Blockdefinitionsdiagramm der Schmalseiteneinheit

Aus der zuvor durchgeführten FMEA ergaben sich erste explizite Lösungsansätze. Der Systementwickler modelliert einen Ansatz, soweit er die Abläufe aus dem Formular ableiten kann und die zuvor definierten Anforderungen erfüllt sind. In der Abbildung 3-10 ist ein erster Stand des Ansatzes zur Kopplung über Anwendungsprogrammierung dargestellt.

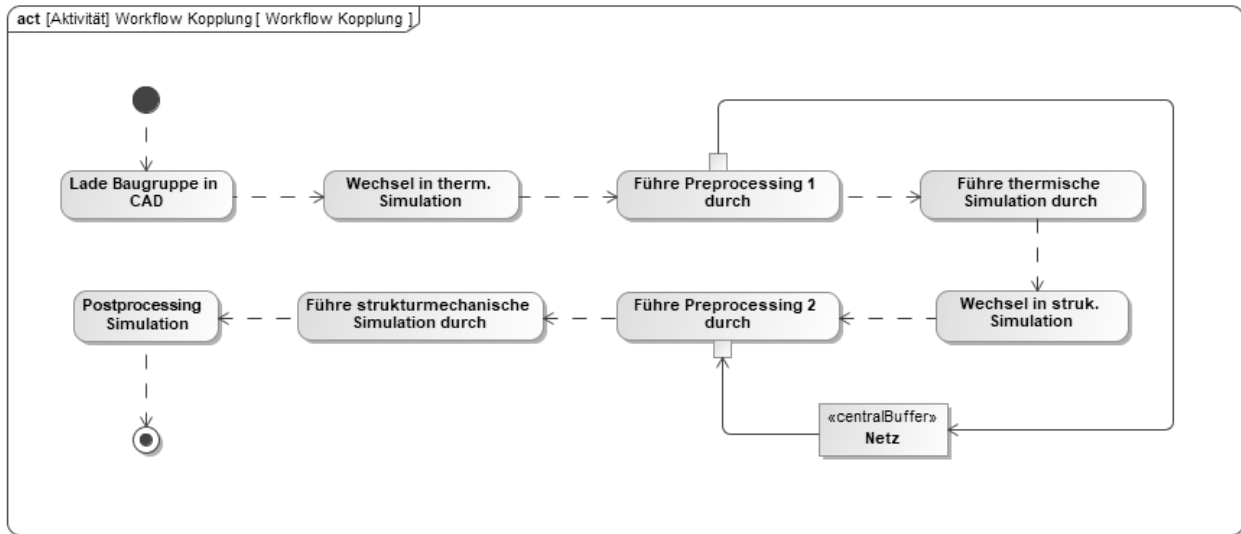


Abbildung 3-10: Aktivitätsdiagramm der Schmalseiteneinheit

Mit diesem ersten Stand des Systems führt der Systementwickler eine Feedbackrunde mit den an der Entwicklung beteiligten Personen durch. Der Schwerpunkt liegt auf der tiefergehenden Definition der dargestellten Verknüpfung der Preprocessings der thermischen und strukturellen Simulation. Durch das Feedback des Berechners wird das zugehörige Aktivitätsdiagramm weiterentwickelt, vgl. Abbildung 3-11.

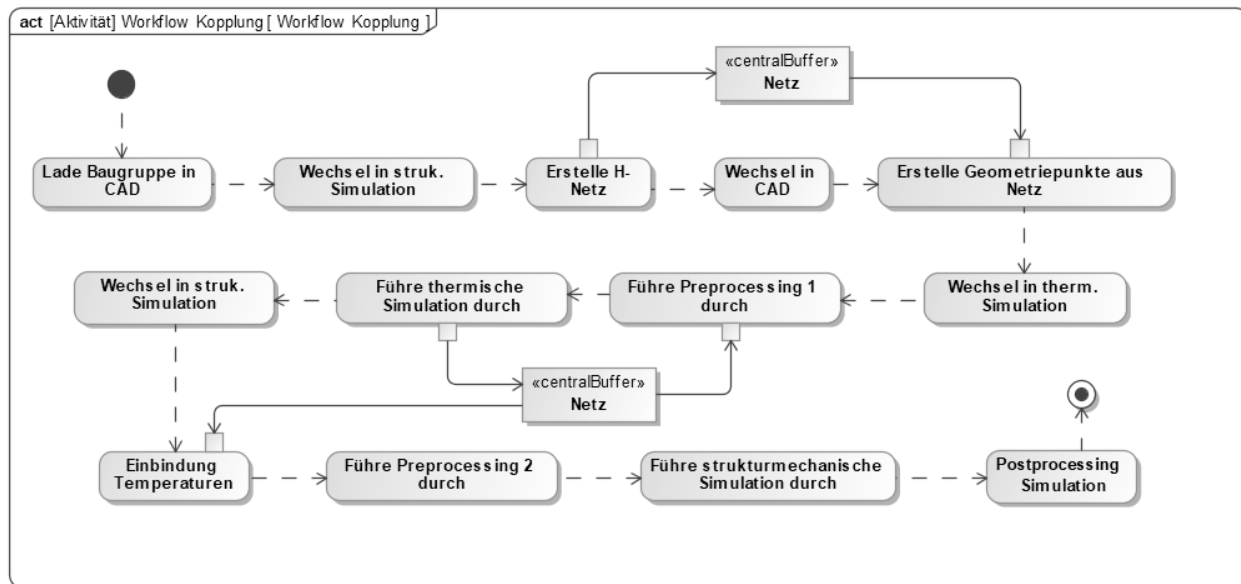


Abbildung 3-11: Erweitertes Aktivitätsdiagramm der Schmalseiteneinheit

Die Struktur der späteren Kopplung im CAD/CAE-System wird deutlicher. Ziel ist es, dass der gesamte Ablauf in dem Aktivitätsdiagramm dargestellt wird, wie er auch später bei der Implementierung aussehen würde, inklusive aller systemspezifischen Dateitypen und Featurebenennungen. Wenn erforderlich können durch das Feedback der Anwender auch immer weitere Diagrammtypen erstellt werden.

In der nächsten Feedbackrunde wird verdeutlicht, welche Funktionalitäten das Anwenderprogramm besitzen muss, um dem Netzimport, der Netzkonvertierung und dem Netzexport gerecht zu werden. Auf eine weitere Detailierung wird im Rahmen dieses einführenden Beispiels verzichtet.

3.5.3 Implementierung

In diesem Schritt wird aus dem erzeugten System eine passende KBE-Technik zur Implementierung ausgewählt. Eine Übertragung der Temperaturlasten ist nur indirekt und außerhalb des CAD-Systems über ein Programm möglich. Diese Aufgabe ist von einem Programmierer durchzuführen. Ein direkter Zugriff vom Programm auf das CAD-System ist nicht notwendig. Es wird nur auf die Ergebnisdateien der Simulation und auf ein Netzfile zugegriffen, welches manipuliert werden muss. Dementsprechend muss keine systemspezifische API verwendet werden. Ein eigenständiges Visual Basic Programm reicht aus.

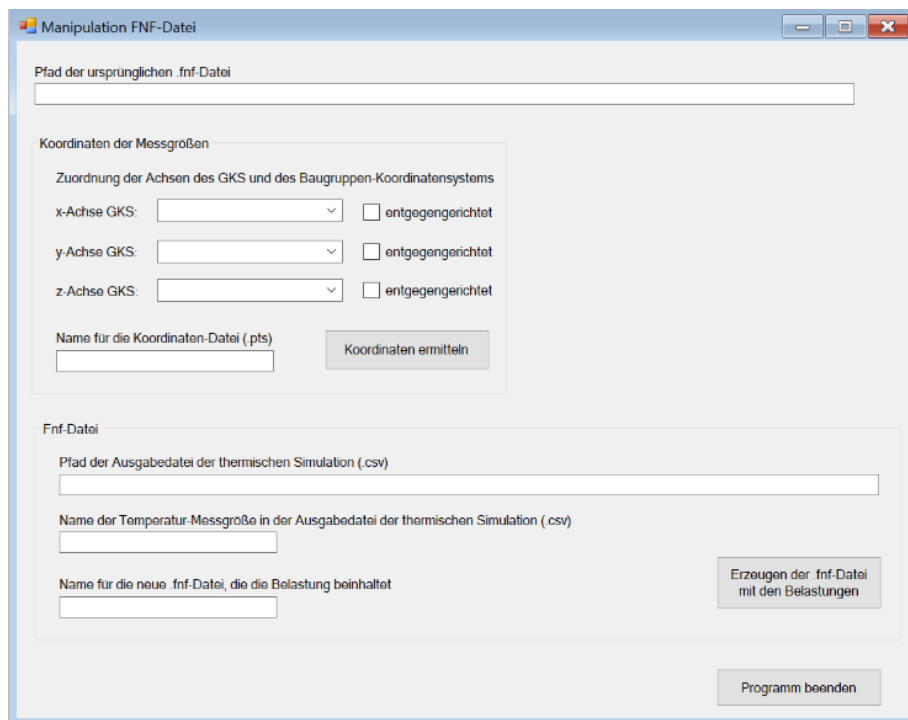


Abbildung 3-12: Anwenderprogramm externe Temperaturübertragung Creo Simulate

In der Abbildung 3-12 ist das Dialogfeld des entwickelten Programmes dargestellt. Im letzten Schritt wird eine Datei erzeugt, welche im strukturmechanischen Simulationsmodus von Creo Simulate eingelesen werden kann und die thermischen Belastung der Baugruppe enthält. Eine thermisch-strukturmechanische Simulation einer Baugruppe mit Kontaktbedingungen kann durchgeführt werden.

3.6 Zwischenfazit

Aufbauend auf dem Stand der Technik, ausgewählten Problemstellungen und daraus abgeleiteten Anforderungen wurde eine dreistufige Vorgehensweise zur modelbasierten KBE-Methodenentwicklung an der Schnittstelle CAD/CAE vorgestellt. Die drei Stufen gliedern sich in die Entwicklung einer Wissensbasis, die Systementwicklung und die Implementierung in die CAD-Umgebung. Zur Transformation impliziten Wissens werden modifizierte FMEAs verwendet. Implizites Wissen wird über Textanalysen aufbereitet. Beides bildet die Grundlage zur Entwicklung eines Systemmodells mittels SysML. Aus diesem lässt sich dann das physische Modell ableiten, welches ins CAD-System implementiert wird. Dies wurde an einer ersten exemplarischen Umsetzung präsentiert. Weiterhin wurde gezeigt, wann und wie eine Entwicklung von KBE-Methoden in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess erfolgen soll und kann.

4 Qualifizierung simulationsgerechter Features und Komponenten

Im Fokus dieser Arbeit wird im weiteren Verlauf die Übertragung des Systemmodells auf die Implementierung sein. Im Folgenden werden dazu unterschiedliche KBE-Techniken dargestellt, prototypisch angewendet und qualifiziert. Bei der Implementierung wird zwischen Analyse- und Konstruktionsfeature und Komponenten unterschieden. Die praktischen Beispiele wurden im Rahmen von Industrie- und Forschungsprojekten, wie auch mit Hilfe von Abschlussarbeiten entwickelt. Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt die Einbindung der Techniken in statische Analysen wie auch parameterbasierte Optimierungsstudien.

4.1 Simulationsgerechte Analysetechniken

Eine Analyse beschreibt eine Technik zur systematischen Untersuchung eines Objektes. Dabei wird dieses partitioniert und auf Grundlage bestimmter Kriterien erfasst. Der Einsatz von simulationsgerechten Analysetechniken beschränkt sich dabei keinesfalls nur auf das Preprocessing von Simulationen und Optimierungen. Allgemein werden Analysen durch die Modifizierung gegebener bzw. Entwicklung neuer Analysefeatures und Prüfvorschriften umgesetzt und können also wie folgt gegliedert werden:

- Kategorie A: Die Entwicklung neuer simulationsgerechter Geometrieanalysetools
- Kategorie B: Die Einbindung oder Entwicklung von Qualitätsprüfertools

Ob die Implementierung einer Vorschrift über ein Feature oder ein Qualitätsprüfungstool erfolgt, ist abhängig davon, inwieweit ihre Standardisierung möglich ist. Überwiegt z. B. der Anteil rein semantischer Informationen, spricht dies in den meisten Fällen für ein Checktool. Neben der geometrischen Prüfung werden auch die Existenz und Korrektheit relevanter semantischer Informationen überprüft.

4.1.1 Kategorie A: Geometrieanalysetools

Bei Optimierungen lassen sich im Preprocessing und Postprocessing die Wertigkeit fortgeschrittener Analysetechniken bei der Kombination mit Fertigungsgerechtheiten und/oder dem Einsatz als Konstruktionsgrenze steigern. Gemeint ist damit, dass bestimmte Restriktionen, welche aus einem zuvor definierten Fertigungsverfahren resultieren, Grenzen für die Optimierung eines Simulationsmodells darstellen. Dies wird umgesetzt durch die Einbindung von Gestaltungsrichtlinien und Konstruktionsregeln in Analysefeatures. Allgemein

werden die dargestellten Regeln in unterschiedlichen Formen, wie Graphen, Kennwerte, Formeln, etc. beschrieben. Analytisch beschreibbare Regeln lassen sich mit dem geringsten Aufwand umsetzen. Dies geschieht über eine API, über welche die meisten leistungsstarken CAD-Systeme verfügen.

4.1.1.1 Einbindung von Graphen und Formeln

Bei Analysetechniken sind Kriterien gefordert, mit denen das analysierte Objekt ausgewertet oder verglichen werden kann. Eine Möglichkeit dazu bietet die Einbindung von Kennwerten, Graphen und Formeln. Graphen können, wenn Sie mathematisch beschreibbar sind, durch die Angabe der mathematischen Funktion im Beziehungsektor platziert werden. Ist dies nicht der Fall, muss auf andere Methoden zurückgegriffen werden. Beispielsweise kann der Graph dazu in n Teilabschnitte aufgeteilt werden. Die Punkte werden in eine externe Software oder Datenbank implementiert. Bei einem Vergleich wird dann zwischen den Punkten interpoliert.

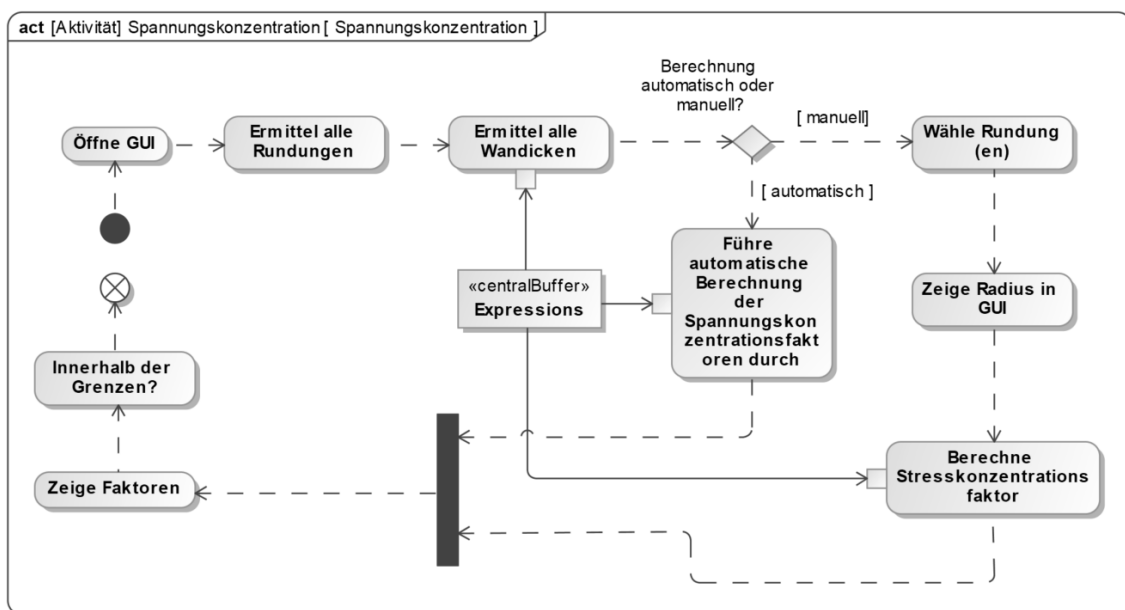


Abbildung 4-1: Aktivitätsdiagramm der Spannungskonzentration

Im Folgenden wird die Vorgehensweise exemplarisch dargestellt. Diese fokussiert die fertigungs- und simulationsgerechte Gestaltung von spritzgegossenen Bauteilen. In der Literatur sind verschiedene Regeln für eine spritzgussgerechte Gestaltung definiert [Eh07], [Br11]. Eine beschreibt, dass Ecken und Kanten mit Radien versehen werden sollen. Die Rundungen sollen dabei eine vordefinierte Spannungskonzentration einhalten. Der Faktor der Spannungskonzentration leitet sich aus dem Verhältnis Radius zur Wanddicke ab. Beschrieben wird dies über eine Spannungsanalysekurve, aus welcher eine analytisch beschreibbare Form abgeleitet wurde. Weitere Anforderungen an das Analysefeature sind eine Umsetzung als GUI, eine automatische wie auch manuelle Auswahl der Rundungen und die Platzierung

der Datenbasis in einer externen Software. Der Workflow ist im Aktivitätsdiagramm in Abbildung 4-1 dargestellt.

Die Implementierung in das CAD-System ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Der Anwender besitzt über das Feature die Möglichkeit, Rundungen hinsichtlich der Spannungskonzentration zu optimieren.

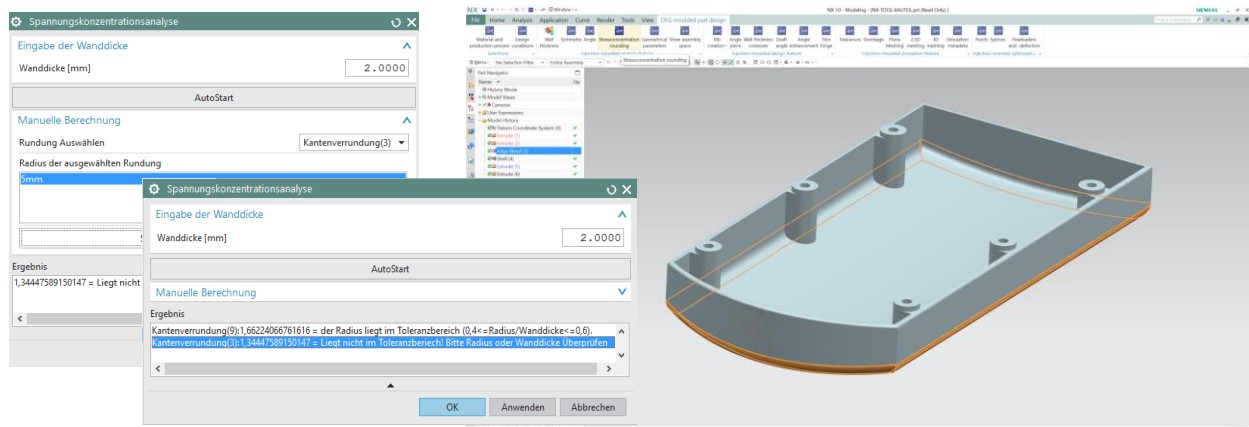


Abbildung 4-2: Implementierung der Spannungskonzentration (nach [Da16])

In diesem Fall wurde die Datenbasis in einer Datenbank platziert, auf welche beim Ausführen des Features zugegriffen wird. Der Zugriff selbst wird über einen Webservice koordiniert.

4.1.1.2 Überprüfung der Geometrie

Ein regelkonformer Aufbau der Geometrie eines CAD-Modells vereinfacht das Preprocessing einer Simulation allgemein. Gerade bei der Modellidealisierung wie dem Unterdrücken bestimmter Elemente, kann ein falscher Modellaufbau zu Fehlern, im schlimmsten Falle zu einem Systemabsturz führen. Eine Grundregel, welche bei der Modellierung einzuhalten ist, ist die Beachtung von Grob- und Feingestaltung. Die meisten Elemente der Feingestaltung werden vor der Berechnung unterdrückt, sofern sie nicht im Kraftfluss liegen. Durch die geringere Anzahl benötigter Netzelemente verringert sich die Berechnungszeit. Dieser Effekt lässt sich ebenfalls nutzen, wenn Symmetrien beachtet werden können. Eine Unterstützung vom System erfolgt, auch in den meisten modernen CAD-System, nicht. Bei einer Überprüfung der Geometrie über selbsterstellte Analysefeatures ist meist die Verwendung von APIs nötig. Im Folgenden soll exemplarisch gezeigt werden, wie ein Symmetriefeature definiert wird. Eine Anforderung an das Feature ist, dass es auch eine Symmetrie erkennt, wenn das Bauteil nicht im Koordinatenursprung modelliert ist oder nicht parallel zu den Grundebenen liegt. Der Anwender soll, wenn er in die Simulationsumgebung wechseln möchte, auf eine mögliche Symmetrie hingewiesen werden, vgl. Abbildung 4-3.

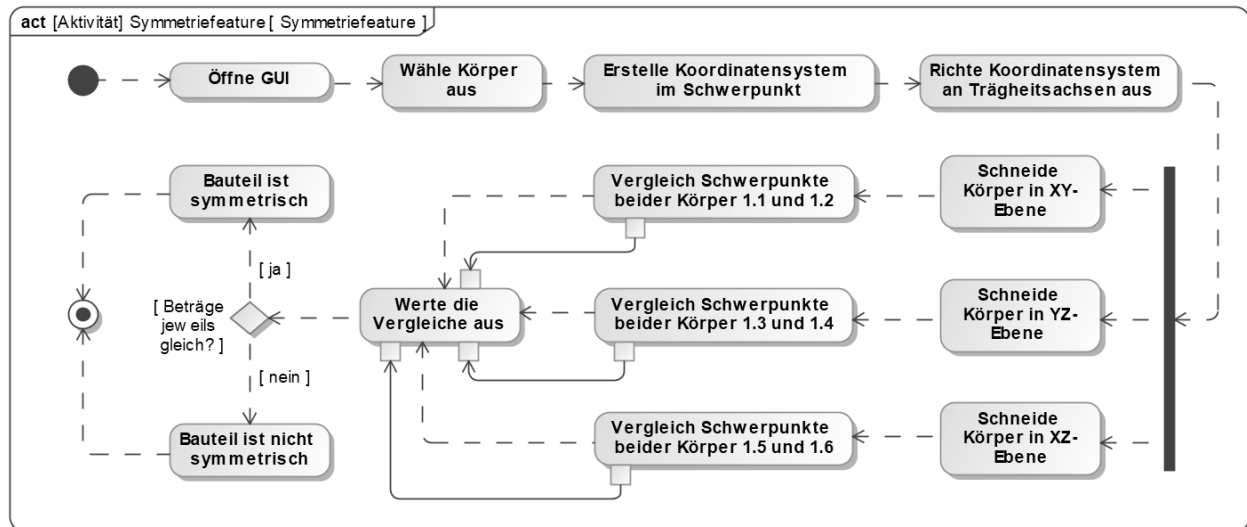


Abbildung 4-3: Aktivitätsdiagramm des Symmetriefeature

In dem Feature wird im Schwerpunkt des Bauteils ein Hilfskoordinatensystem erstellt. Nacheinander wird an diesem der zu prüfende Körper an den drei Koordinatenebenen geteilt, während die Beträge der Schwerpunktskoordinaten der neuen Modellhälften geprüft werden. Bei Übereinstimmung ist das Bauteil symmetrisch. In der Abbildung 4-4 ist die Implementierung in das CAD-System dargestellt.

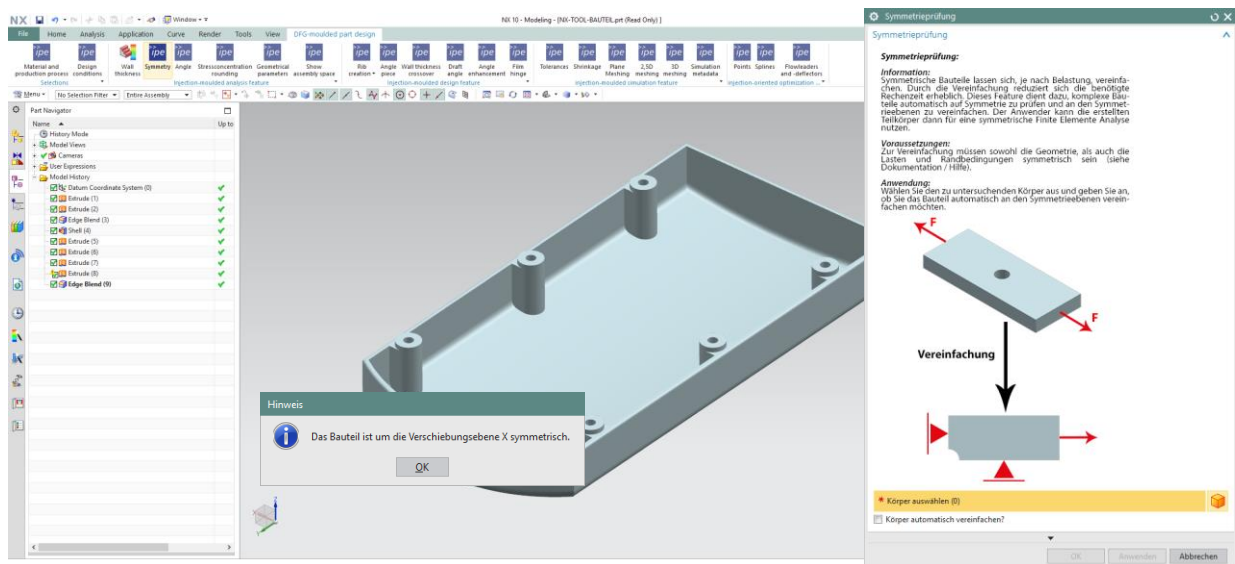


Abbildung 4-4: Implementierung des Symmetriefeatures (nach [Ma16])

Ähnlich kann die Methode auch bei rotationssymmetrischen Bauteilen angewendet werden. Die eigentliche Prüfung wird dann um die Schwerpunktsachsen des Hilfskoordinatensystems durchgeführt. Zum Verständnis für den Anwender wurde eine Erläuterung der Anwendung in die GUI implementiert.

4.1.2 Kategorie B: Qualitätsprüftools

Wird eine Prüfung nach Regeln durchgeführt, welche global überprüft werden können, und/oder handelt es sich hauptsächlich um die Prüfung semantischer Informationen, ist der Einsatz sogenannter Qualitätsprüfungstools sinnvoll. Mit einer globalen Prüfung ist gemeint, dass der Anwender keine Referenzen oder ähnliches des Bauteils manuell auswählen muss und über eine separate GUI durch die Prüfung geführt wird. Ein klassisches Beispiel ist eine Überprüfung des Modellbaums hinsichtlich definierter Konstruktionsfeatures, um eine Grob- und Feingestaltung sicherzustellen [Kö02]. Eine typische Prüfung semantischer Informationen ist z. B. die Überprüfung des definierten Materials und weiterer für eine Simulation relevanter Daten. Bekannte Softwarewerkzeuge lassen sich nach Humpa [Hu16] nach drei verschiedenen Schwerpunkten einteilen:

- Typ 1: Absicherung unternehmensinterner CAD-Standards sowie Vorgaben zur Modellierungsstrategie
- Typ 2: Kostenoptimierung im Sinne von einer Zielkostenanalyse
- Typ 3: Fokus auf die Erkennung von fehlerhaften Geometriebereichen

Die Tools lassen sich in bereits in ein CAD-System integrierte und externe einteilen. Eine benutzerdefinierte Prüfung wird dann in einem der Systeme selbst oder durch Erstellung eines eigenständigen Prüftools, über eine API, erstellt. Zwei typische Prüfungen, die Überprüfung der Grob- und Feingestaltung und die Überprüfung von Parametern, wurden zuvor genannt. Im Bereich des Preprocessings einer Simulation ist u. a. auch eine Prüfung überladener Skizzen sinnvoll, da diese einen Einfluss auf die Modellstabilität besitzen [Kl15b]. Eine praktische Umsetzung hierzu ist in der Case Study im nächsten Kapitel enthalten, vgl. Unterkapitel 5.4.

4.2 Simulationsgerechte (Konstruktions-)Features

Die simulationsgerechten (Konstruktions-) Features lassen sich in drei verschiedene Kategorien einteilen. Ein simulationsgerechtes Feature kombiniert ein Konstruktionsfeature mit einem Simulationsfeature. Damit enthält es Geometrie und/oder Semantik, welche notwendig sind für beide Disziplinen. Für die Umsetzung sind drei Möglichkeiten gegeben:

- Kategorie A: Die Entwicklung neuer simulationsgerechter Konstruktionsfeatures
- Kategorie B: Die Einbindung von Gestaltungsrichtlinien und Konstruktionsregeln in vorhandene Modellierungsoptionen des CAD-Systems
- Kategorie C: Diese umfasst simulationsgerechte Features, welche nur ein Simulationsfeature mit der Semantik eines Konstruktionsfeatures kombiniert

Die Implementierung der Features kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine ist die Verwendung von UDFs. Das Wissen, welches auf diese Weise integriert werden kann, ist allerdings beschränkt. Eine höhere Wissensanreicherung kann durch die Verwendung einer API des jeweiligen CAD-Systems erreicht werden.

Die semantischen Informationen, welche zur Definition eines Analysefeatures aus Stufe 1 verwendet wurden, sind auch für die Definition eines simulationsgerechten Konstruktionsfeatures geeignet. Sind analytisch beschreibbare Konstruktionsregeln in einer Analyse implementiert, kann dies auch direkt bei der Erzeugung neuer Geometrie geschehen. Ein Beispiel dafür ist eine automatische Wanddickenprüfung beim spritzgussgerechten Bauteilentwurf hinsichtlich einer Füllsimulation.

Durch die Verwendung simulationsgerechter Konstruktionsfeatures wird der Konstrukteur im Rahmen des Preprocessings unterstützt. Neben einer Beschleunigung des Simulationsprozesses steigt die Qualität der Simulation.

4.2.1 **Kategorie A Konstruktionsfeature**

Durch die Kombination von einem Konstruktionsfeature mit einem Simulationsfeature werden Schritte, zumeist zur Modellidealisation, welche sonst zu einem späteren Zeitpunkt in der Simulationsumgebung durchgeführt werden, von vornherein in das Feature integriert. Vorgestellt wird dies an einer automatisierten Idealisation von dünnwandigen Bauteilen und einem modifizierten Rundungsfeature.

Bei der Simulation von dünnwandigen Bauteilen wird meist eine Reduktion der Dimension vorgenommen. Dieser Schritt führt in der Regel zu einer Zeitersparnis bei der Berechnung. Aus einem Volumenmodell wird ein Schalenmodell abgeleitet. Diese Idealisation wird, wenn vom Berechner erkannt, im Rahmen des Preprocessings der Simulation durchgeführt. Ein Hilfsmittel, welches einige Simulationsumgebungen bieten (z. B. Creo Simulate), ist bei manueller Angabe einer charakteristischen Dicke die automatische Konvertierung der Geometrie.

Wenn ein Konstrukteur die Absicht besitzt, ein dünnwandiges Bauteil zu modellieren, soll in der Simulation eine automatisierte Reduktion der Dimension vorgeschlagen und dann ggf. durchgeführt werden. Die Eingabe unterschiedlicher Wandstärken entfällt damit. Ebenso gewährleistet dies eine Unterstützung des Konstrukteurs bei der Entscheidung, ob er sein Modell als Volumen-, Schalen- oder hybrides Modell simulieren möchte. Ein praktisches Beispiel, allerdings auf Komponentenebene, ist in Unterkapitel 4.3.2 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine automatische Dimensionsreduktion von Schraubverbindungen.

4.2.2 Kategorie B: Featureerweiterung

Ein Beispiel für die Einbindung von Gestaltungsrichtlinien in bereits bestehende Modellierungsoptionen ist ein modifiziertes Rundungsfeature. Rundungsfeatures sind standardmäßig in allen leistungsstarken CAD-Systemen vorhanden. Generell sind Rundungen aus unterschiedlichen Aspekten im Rahmen des Preprocessings interessant. Liegen Sie im Kraftfluss dürfen sie im Geometriemodell nicht unterdrückt werden. Weiterhin kann, wie in Unterkapitel 4.1.1.1 gezeigt, im Rahmen einer spritzgussgerechten Bauteilauslegung durch Angabe der Wanddicke und des Materials ein idealer Radius ermittelt werden. Dies lässt sich dann zu einem Konstruktionsfeature weiterentwickeln. Interessant im Bereich der strukturellen Simulation ist der Einfluss der Kerbspannung einer Rundung bei unterschiedlichen Geometrien. Untersuchungen dazu sind u. a. in [CiJa14] zu finden.

4.2.3 Kategorie C: Simulationsfeature

Die Kategorien A und B enthielten Features, welche auch der Geometrieerzeugung und -vorbereitung dienen können. In dieser Kategorie werden Simulationsfeatures nur mit semantischen Informationen aus der Konstruktion verknüpft. Diese Techniken werden hauptsächlich eingesetzt, wenn vordefinierte Schnittstellen nicht vorhanden sind. Gemeint sind damit z. B. fortgeschrittene Problemstellungen, welche nicht mehr konstruktionsbegleitend gelöst werden können, und dazu eine Kommunikation zwischen Konstrukteur und Berechner erforderlich ist.

Die direkte Verfügbarkeit von wichtigen Informationen für die Definition einer Simulation ist oft nicht gewährleistet. Laut einer Studie verbringt ein Berechner mehr Zeit mit der Informationsbeschaffung als mit dem Aufsetzen und Durchführen einer Simulation [SeWa11]. Die Schwachstelle hierbei ist zumeist eine unbefriedigende Kommunikation. Eine Möglichkeit diese zu unterstützen, ist der Einsatz von Product and Manufacturing Information (PMI). Bei PMIs handelt es sich u. a. um dreidimensionale Anmerkungen, die direkt mit Bezügen und/oder der Geometrie in Verbindung stehen. PMIs sind ein erster Schritt in Richtung papierlose Fertigung und könnten in einiger Zeit die technische Zeichnung in ihrer ursprünglichen Form ablösen. Gerade in Kombination mit unterschiedlichen Anmerkungsständen lässt sich das Potential von PMIs erkennen, da hierdurch verschiedene Sichten auf das Modell definiert werden können, wie Bemaßungen, Toleranzen, Einbauanleitungen, Schweißanmerkungen, etc. Ein weiterer Vorteil ist, dass PMIs wie auch Anmerkungsstände in neutralen Viewern angezeigt werden können (z. B. in Creo View (PTC)).

Eine Sicht „Simulationsvorbereitung“ vom Konstrukteur für den Berechner lässt sich ebenfalls erstellen. Diese kann für das Preprocessing relevante Informationen enthalten und den Berechner dementsprechend unterstützen. Ein weiterer Schritt ist die Verknüpfung von

PMIs mit Randbedingungen. Dies setzt voraus, dass der Konstrukteur Grundbegriffe der Simulation kennt. Mit diesem Werkzeug kann dieser Randbedingungen in der Sicht „Simulationvorbereitung“ nicht nur kennzeichnen, sondern auch vorläufig definieren. In Abbildung 4-5 ist dazu der passende Workflow aufgezeigt.

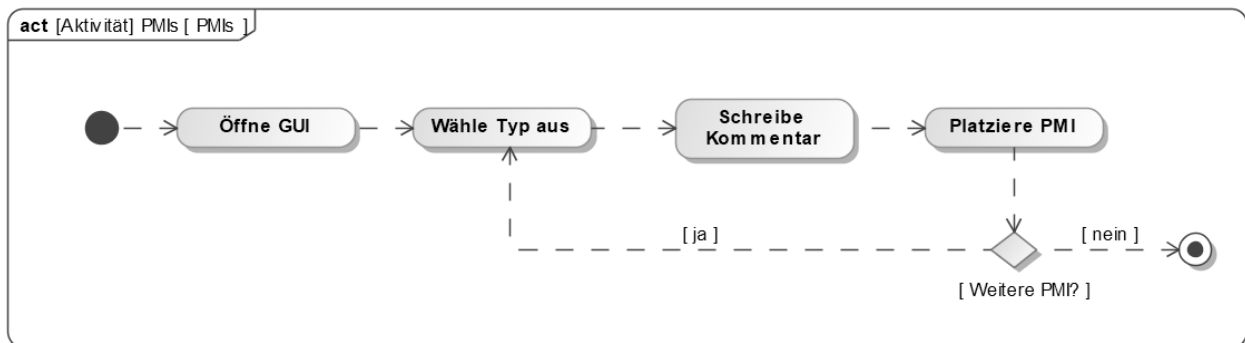


Abbildung 4-5: Aktivitätsdiagramm der Kopplung PMIs mit Randbedingungen

Die Umsetzung dazu ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Der Konstrukteur definiert z. B. die Grundfläche des Bauteils als (eingespannte) Randbedingung. Zusätzlich ist es auch möglich Informationen dazu abzulegen. In einem weiteren Schritt könnte im Berechnungsprogramm die Fläche direkt als Randbedingung behandelt und vorgeschlagen werden.

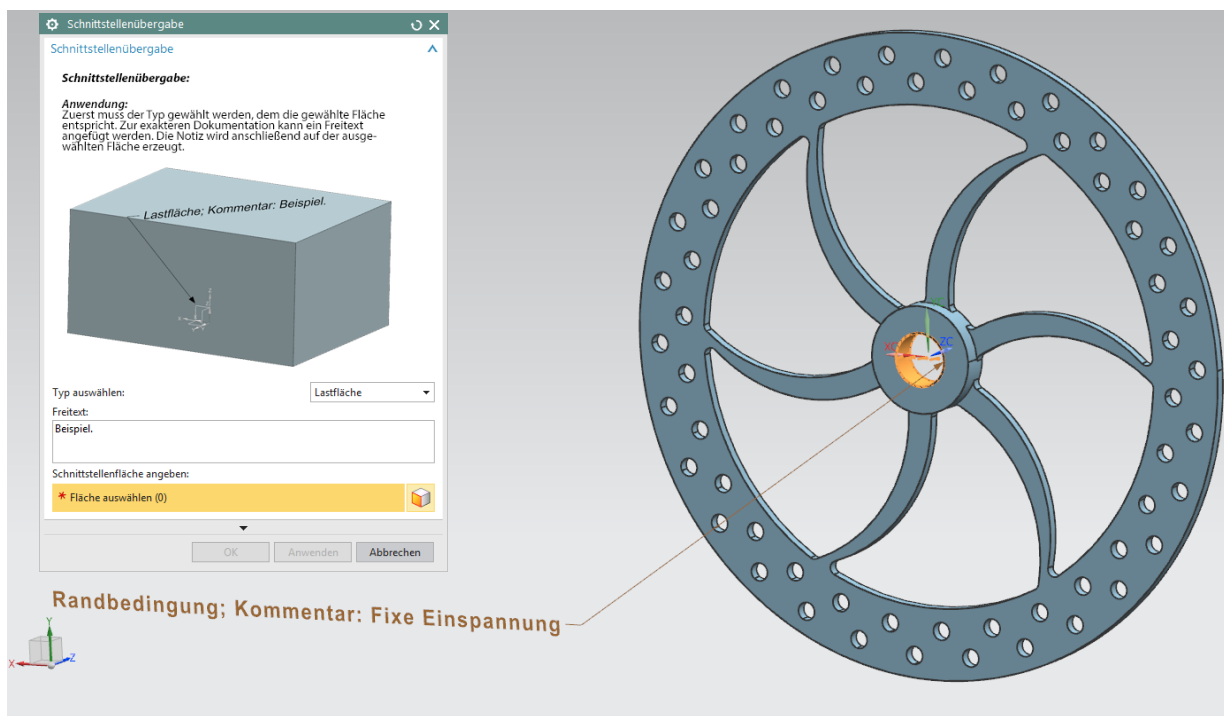


Abbildung 4-6: Implementierung der Kopplung PMI mit Randbedingung (nach [Ma16])

Weiterhin ist es denkbar, dass die gezeigte Prozesskette auch in umgekehrter Reihenfolge arbeitet. In diesem Falle definiert der Berechner über PMIs relevante Stellen im Modell, wofür er vom Konstrukteur weitere simulationsrelevante Informationen erhalten muss.

4.3 Simulationsgerechte Komponenten

Die höchste Wertigkeit einer simulationsgerechten Absicherung besitzt eine simulationsgerechte Komponente. Zur Orientierung dienen die höherwertigen Konstruktionsobjekte von Kesselmanns (vgl. Unterkapitel 2.2.1). In Abbildung 4-7 ist links sein Modell zu finden und rechts die passende Erweiterung. Dieses verfügt mindestens über die gekoppelten Partialmodelle CAD und CAE. Abhängig vom Einsatzzweck ist die Integration weiterer Partialmodelle möglich. Dadurch ist dieses Komponentenmodell u. a. auch für Optimierungsstudien geeignet, bei welcher Parameter aus verschiedenen Partialmodellen als Konstruktionsvariablen eingesetzt werden.

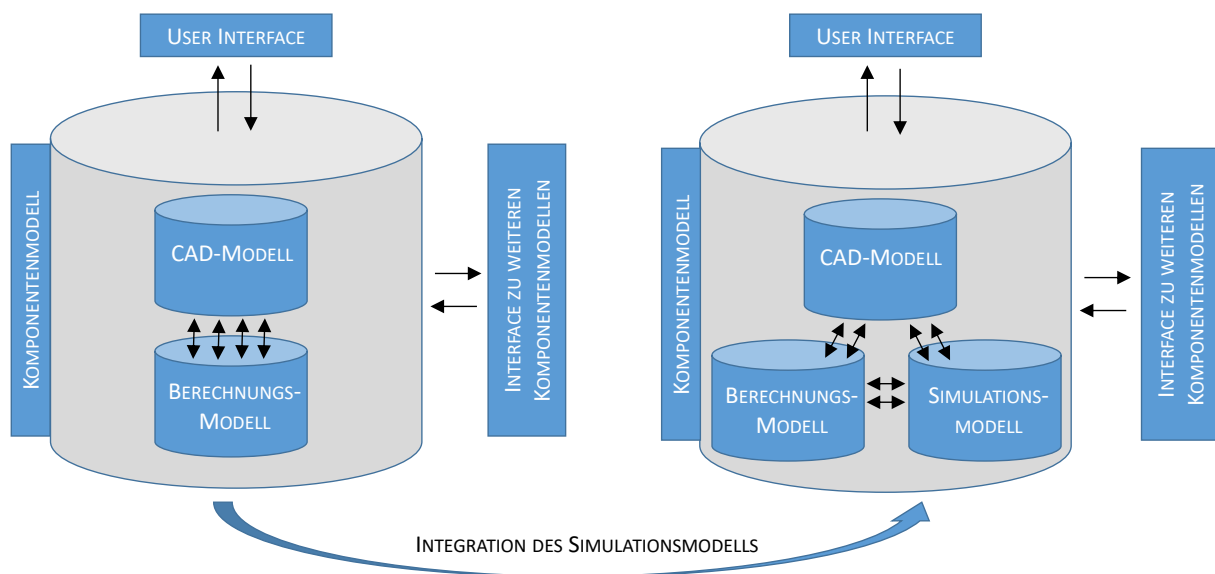


Abbildung 4-7: Simulationsgerechte Komponenten

Implementiert wird das Komponentenmodell durch die Verwendung von KBE-Techniken. Das in der Komponente verfügbare Wissen wird dem Konstrukteur u. a. auf folgende Weisen zur Verfügung gestellt:

- Kategorie A: Simulationstemplates
- Kategorie B: Familientabellen
- Kategorie C: Regelmodule

Die Auswahl der Verknüpfung hängt von der Integrationstiefe, der Komplexität der Anwendung wie auch von der verwendeten CAD-CAE-Umgebung ab. Wie schon zuvor erwähnt, ergibt sich das größte Potential des KBes in der Kombination mit CAD-Mastermodellen. Dementsprechend bieten sich im Bereich der Norm- und Wiederholteile sinnvolle Einsatzmöglichkeiten. Hier können simulationsgerechte Produktvarianten über Familientabellen und/oder Templatedateien verknüpft werden. Alle drei Partialmodelle des Simulationsmodells (Geometrie, Material und Belastungsmodell) sind dadurch vordefiniert. Ebenso ist eine Integration von analytischen Auslegungsberechnungen in die Komponente zulässig. Durch

die bidirektionale Verknüpfung können Parameter aus dieser Berechnung als Eingangsgrößen in der Simulation verwendet werden. Im Rückschluss können aber auch die Ausgangsgrößen auf Plausibilität geprüft werden.

Im Bereich der Neukonstruktion kann dieses Modell ebenfalls angewendet werden. Wird die Gestalt und die Funktion eines Bauteils in einer Optimierung von Konstruktionsgrenzen aus unterschiedlichen Partialmodellen gesteuert, dann ist eine Kopplung sinnvoll. Am effektivsten gestaltet sich der Aufbau der Komponente dann aus simulationsgerechten Features, wie sie zuvor vorgestellt wurden. Am Anfang besteht die Komponente quasi nur aus einem „leeren“ System.

4.3.1 Kategorie A: Templates

Bei der Simulation von Baugruppen ist eine Möglichkeit zur Unterstützung des Konstrukteurs die simulationsgerechte Aufbereitung von Geometriemodellen, wenn es sich um Norm- und Wiederholteile handelt. Die Verknüpfung von Geometriemodellen mit zugehörigen Simulationsmodellen über Templatedateien ist eine bewährte Möglichkeit (vgl. Unterkapitel 2.2.2). Im Folgenden Beispiel wurde eine solche Verknüpfung für ein Wälzlager entwickelt, vgl. Abbildung 4-8.

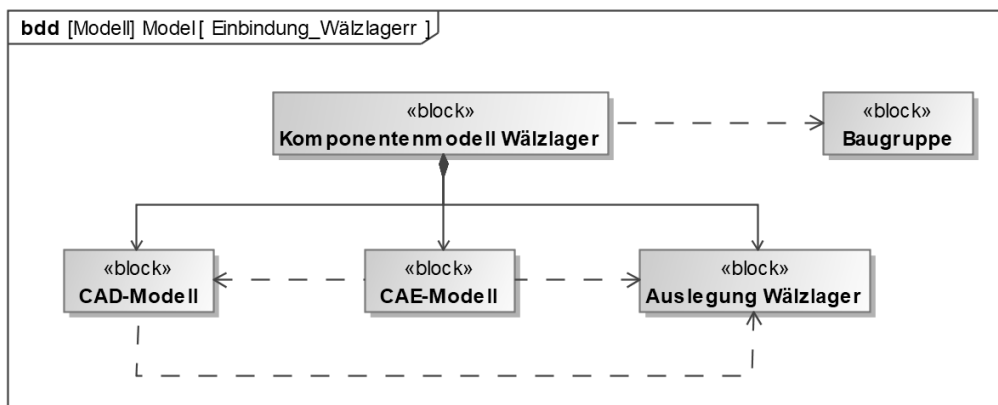


Abbildung 4-8: Blockdefinitionsdiagramm der Einbindung des Wälzlagers

Der Anwender greift auf das Template auf zwei unterschiedliche Weisen zu. Ist das Lager bereits in der Baugruppe enthalten, wird dieses manuell nachträglich verknüpft. Dabei werden bei Auswahl des Geometriemodells geometriestimmende Parameter ausgelesen und das entsprechende Template geladen. Die andere Möglichkeit ist, die Geometrie mit bereits verknüpften Simulationstemplaten zu platzieren. Die Platzierung erfolgt dabei über einen Konfigurator, der die gegebenen Abmaße der Baugruppe (Wellendurchmesser, usw.) wie auch andere Auslegungsparameter berücksichtigt. Der Workflow ist in Abbildung 4-9 zusammengefasst.

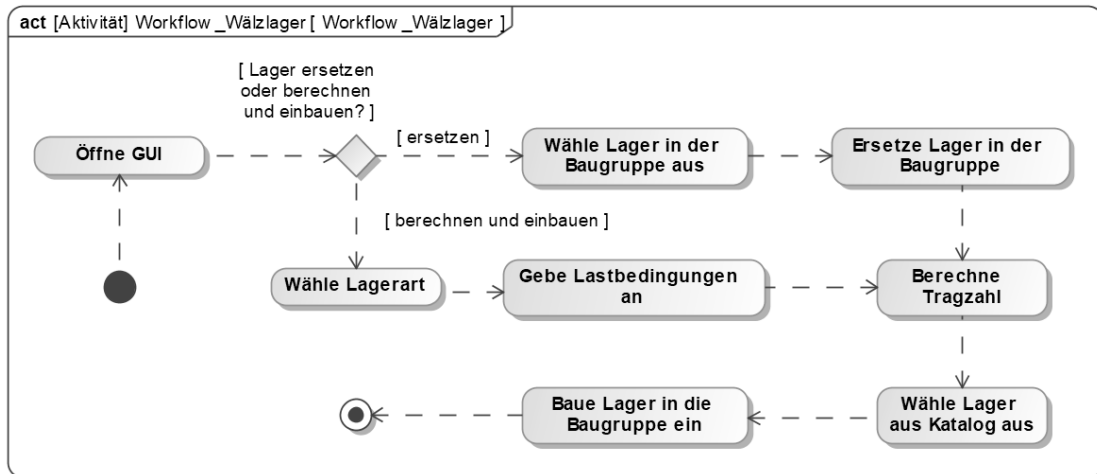


Abbildung 4-9: Aktivitätsdiagramm der Platzierung des Wälzlagers

Die Implementierung der Methodik ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Dem Anwender ist damit eine Möglichkeit gegeben, ganze Geometriemodelle als Randbedingungen in seiner Simulation zu verwenden. Im Falle des Lagers muss nicht die gesamte Fläche des Lagersitzes an der Welle komplett eingespannt werden.

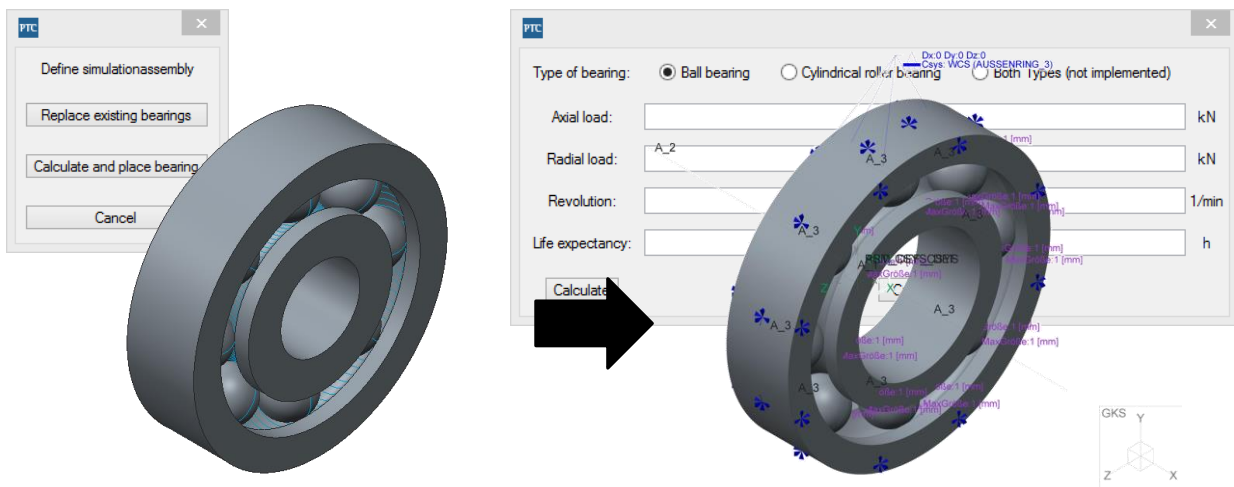


Abbildung 4-10: Implementierung der Wälzlager (nach [Na14])

Eine Übertragbarkeit der Methodik auf andere Norm- und Wiederholteile ist gegeben. Hierdurch können Bauteilbibliotheken simulationsgerecht abgesichert werden. Diese Vorgehensweise findet nicht nur Anwendung bei internen Simulationen. Die Verknüpfung von einem CAD-System und einer externen Simulationsumgebung wird u. a. aufgezeigt in [BoSh+14] (vgl. Unterkapitel 4.4.2).

4.3.2 Kategorie B: Familientabelle

Unterscheiden sich Baugruppen nur durch geringe geometrische Ausprägungen, welche bei einem parametrisierten Modell durch die Änderung der Bemaßungswerte angeglichen werden können, ist der Einsatz von Familientabellen sinnvoll, besonders in Kombination mit simulationsgerechten Features der Kategorie A (vgl. Unterkapitel 4.2.1). Mit einer Familientabelle wird eine bestimmte Anzahl geometrischer Varianten eines Bauteils oder einer Baugruppe definiert. Als Bedingungen sind Bemaßungswerte, das Unterdrücken von Features und das Auswechseln von Bauteilen in der Baugruppenumgebung festgelegt.

Nach Definition der jeweiligen Variante in der CAD-Umgebung erscheint bei Wechsel in die Simulationsumgebung automatisch das vordefinierte Simulationsmodell. Neben einer reinen Idealisierung der Dimension können u. a. auch unterschiedliche Positionen für Lasteingriffe festgelegt werden, vorausgesetzt die Lastbedingung ist vordefiniert. Dazu muss die Last über einen Punkt oder einen Flächenbereich eingeleitet werden, dessen Position über Maßparameter gesteuert wird.

4.3.3 Kategorie C: Regelmodule

Sind geometrische Ausprägungen oder Positionen von Last- und Randbedingungen nicht mehr über Familientabellen abzusichern, können simulationsgerechte Komponenten über ein Regelmodul eingebunden werden. Die Simulationsmodelle sind dann als Templates verknüpft. Über das Regelmodul werden diese an ein bestimmtes Geometriemodell geladen. Gesteuert wird der Prozess über ein GUI.

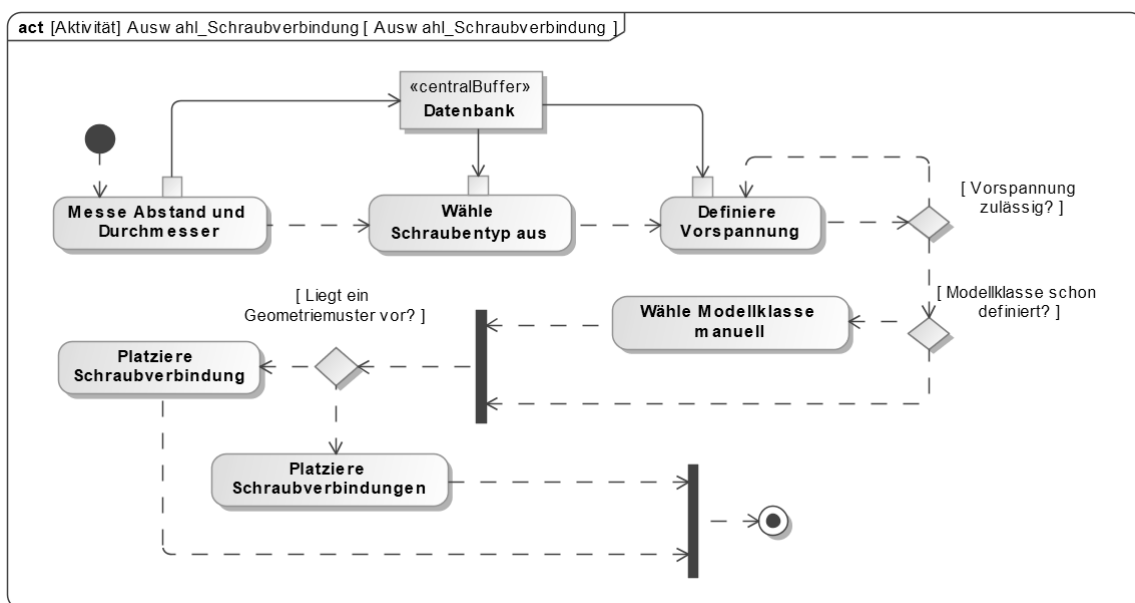


Abbildung 4-11: Aktivitätsdiagramm der Schraubenauswahl

Diese Methode der Einbindung kombiniert damit die Vorteile der Simulationstemplates und der Familientabelle. Im Folgenden wird als Beispiel die Aufbereitung von Schraubverbindungen aufgezeigt. Schraubverbindungen sind nach der VDI-Richtlinie 2230 Blatt 2 in vier Modellklassen zur numerischen Berechnung eingeteilt [VDI2230-2]. Diese Richtlinie gibt vor, wie Schraubverbindungen als Randbedingung innerhalb einer strukturmechanischen Simulation definiert werden sollen.

Der Workflow zur Definition der Schraubverbindung ist in Abbildung 4-12 dargestellt. Die vier Modellklassen unterscheiden sich stark im Detailierungsgrad des Simulationsmodells. So kann jedes Geometriemodell mit vier Simulationstemplate-Dateien verknüpft werden, welche der Benutzer bei Wechsel der Umgebung auswählen kann. So wird z. B. in der Modellklasse 2 die Geometrie einer Schraubverbindung als Balkenmodell und in der Modellklasse 4 als voll detailliertes Modell dargestellt, siehe auch Abbildung 4-12.

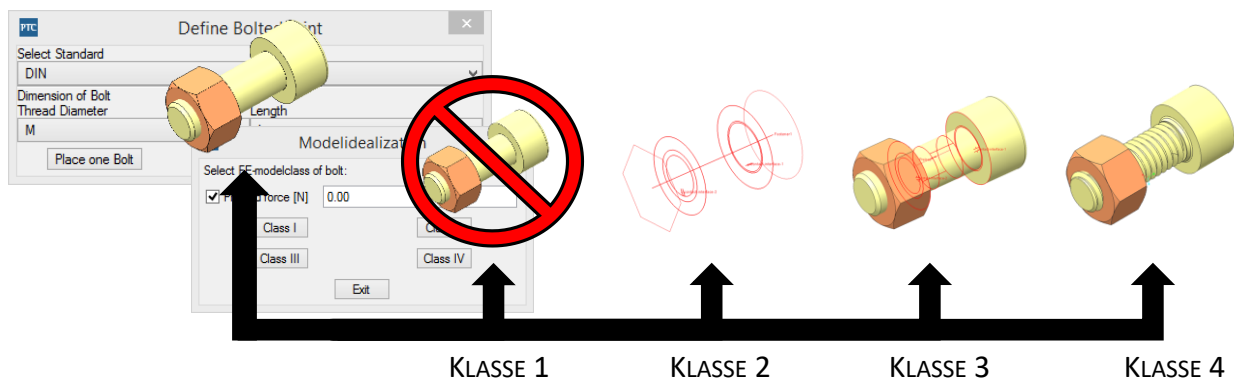


Abbildung 4-12: Implementierung der Schraubenauswahl (u. a. nach [So14])

In jedem der vier Simulationsmodelle ist ein vordefiniertes Belastungsmodell vorhanden. Dieses basiert auf den jeweiligen Rand- und Lastbedingungen, die nach der Richtlinie im Bauteil definiert sein müssen, um die jeweilige Klasse abbilden zu können.

4.4 Anwendung in numerischen statischen Analysen

Durch die zuvor dargestellten simulationsgerechten Features und Komponenten ändert sich die Ausgangssituation konstruktionsbegleitender Simulationen. Der Konstrukteur arbeitet mit vorbereiteten Modellen und Features, welche seinen Handlungsspielraum eingrenzen, aber auch absichern.

Zu erkennen ist, dass einige, hinsichtlich der Konstruktionsbarriere relevante Verknüpfungen innerhalb der Prozesskette geschlossen wurden. Allerdings sind noch weitere Maßnahmen an der Prozesskette zu optimieren. Besonders im Fokus ist dabei das Berechnungsmodell. Rückschlüsse auf die Geometrie und das Material sind dagegen durch die präsentierten

Absicherungen gewährleistet. Im Folgenden wird das eigentliche Preprocessing, Processing und das Postprocessing in der Simulationsumgebung weiter qualifiziert.

4.4.1 Qualifizierung des Preprocessings

Das Preprocessing dient auch der Konfiguration der Simulation. Eine Vorbereitung dafür direkt in der CAD-Umgebung gestaltet sich schwierig. Vernetzungseigenschaften lassen sich in Simulationstemplates oder -features, neben Rand- und Lastbedingungen hinterlegen, ebenso wie Modellidealisationen, beispielsweise Dimensionsreduzierungen. Viele weitere vom Anwender zu definierende Eigenschaften, wie der zu verwendende Solver (bei Siemens NX) oder der anzuwendende Konvergenzgrad und das Konvergenzkriterium (bei Vernetzungen nach der p-Methode, PTC Creo Simulate) sind dagegen problemlösungsorientiert zu definieren. Diese fallspezifischen Eigenschaften definiert der Konstrukteur also erst in der Simulationsumgebung.

Eine Ausnahme bildet der Fall einer vorbereiteten Simulation einer Variantenkonstruktion. Das Simulationsmodell ist dementsprechend vordefiniert und vom Anwender werden nur wenige Annahmen, wie die Lastsituation, definiert. Dies wird im Folgenden exemplarisch anhand der Auslegung einer Flanschverbindung aufgezeigt.

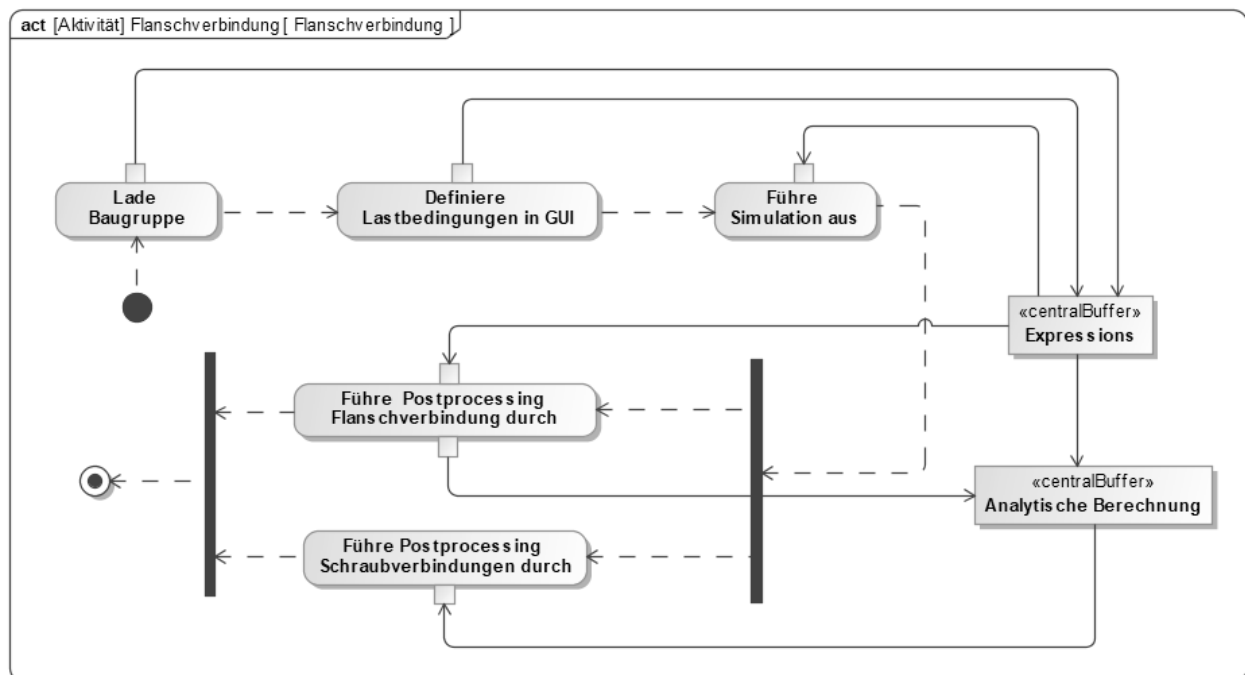


Abbildung 4-13: Aktivitätsdiagramm der Flanschverbindung.

Die Auslegung von Flanschverbindungen ist durch diverse Normen und Richtlinien, wie die [DIN13445], abgesichert. In der Regel erfolgt diese durch analytische Berechnungsverfahren. Damit lassen sich die meisten Anwendungsfälle abdecken. Numerische Verfahren wer-

Schadigungsgrad zugewiesen. Eine Übertragbarkeit auf andere Geometrien wird damit gewährleistet. Der Berechnung der Schadigungsgrade liegt das nichtlineare Schadensakkumulations Modell (nlSAM) von Spitz [Sp12] zugrunde.

Der Schwerpunkt wird auf die Verknüpfung wie auch die automatisierte Modifizierung der Simulationstemplates und die Entwicklung eines Interfaces gelegt, welches den Konstrukteur unterstützend durch den Simulationsablauf führt. Die Verknüpfungen sind im Blockdefinitionsdiagramm in Abbildung 4-15 dargestellt. Im ersten Reiter „Voreinstellungen“ werden Angaben zu Belastungsgrößen, Kennwerten wie Kriterien definiert. Die Kalibrierung der Materialparameter, wie auch die Kalibrierung der Schadensakkumulationsparameter erfolgt im zweiten Reiter „Kalibrierung“. Im dritten Reiter „Belastungs- und Beanspruchungsgrößen“ erfolgt u. a. die Definition der schadigungsrelevanten Beanspruchung. Weitere Reiter betreffen z. B. das Feedback der Berechnung während der Simulation zur Überwachung des Prozesses und das Postprocessing.

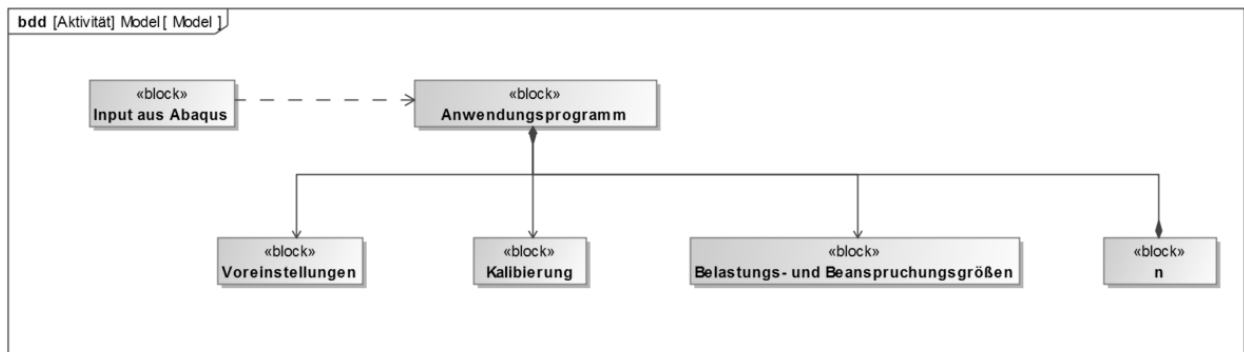


Abbildung 4-15: Blockdefinitionsdiagramm „Elastomerkupplung“

Der Ablauf des Simulationsprozesses gliedert sich grob wie folgt; der Anwender führt das Preprocessing der Simulation in der Simulationsumgebung durch. Es müssen u. a. Lasten, Randbedingungen und ggf. die Geometrie definiert werden.

Das Preprocessing wird dann im Anwenderprogramm weitergeführt. Als Basis dazu dient die im Rahmen des Processings in der Simulationsumgebung erstellte Input-Datei und das zugehörige Python-Skript. Dann erfolgt eine Definition weiterer Eingangsparameter für die Simulation in der Benutzeroberfläche. Daraufhin werden in die zuvor geladenen Dateien automatisiert modifiziert. Der Workflow dazu ist in Abbildung 4-16 dargestellt. Das Curve fitting der Materialmodelle, wie auch die nlSAM findet in einer externen Berechnungssoftware statt, welche mit dem Simulationsprogramm gekoppelt ist.

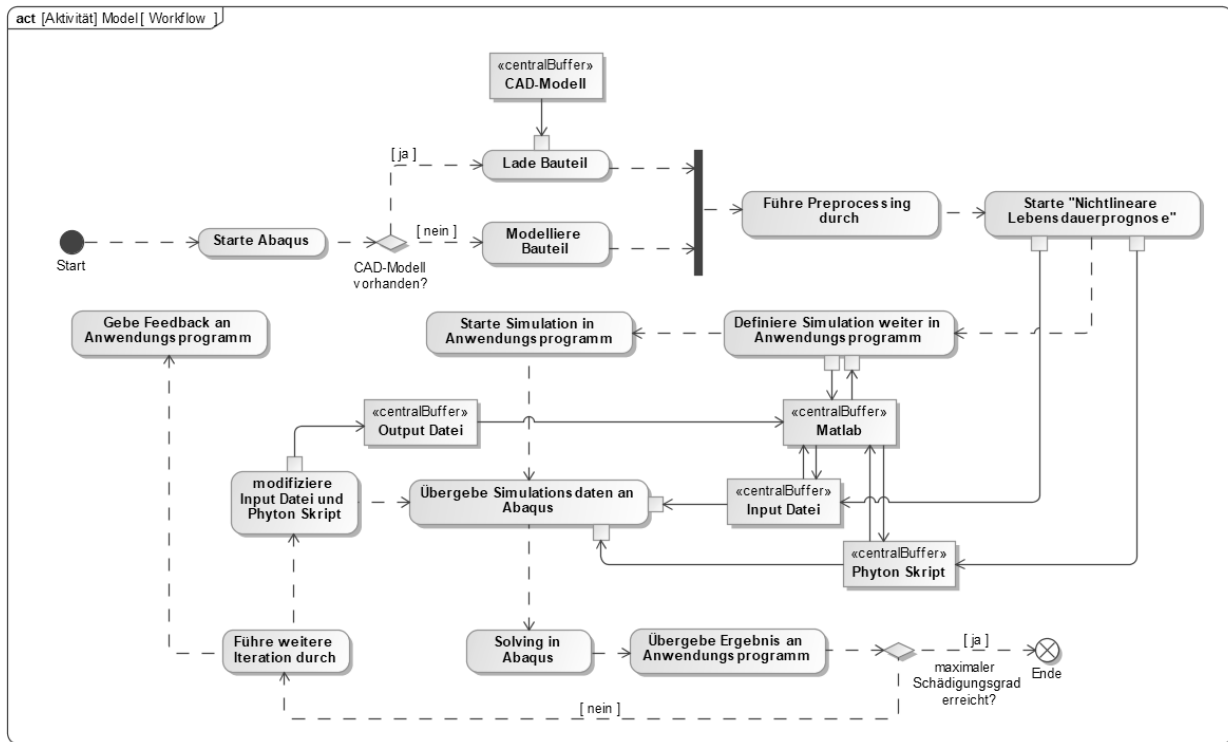


Abbildung 4-16: Aktivitätsdiagramm „Elastomer Kupplung“

Neben den beiden Dateien, welche im Rahmen des Preprocessings erstellt werden, wird auch im Rahmen des Postprocessing eine Output-Datei erstellt. Diese enthält relevante Ergebnisgrößen. Der Zugriff auf alle drei Dateien ist in der folgenden Abbildung 4-17 dargestellt.

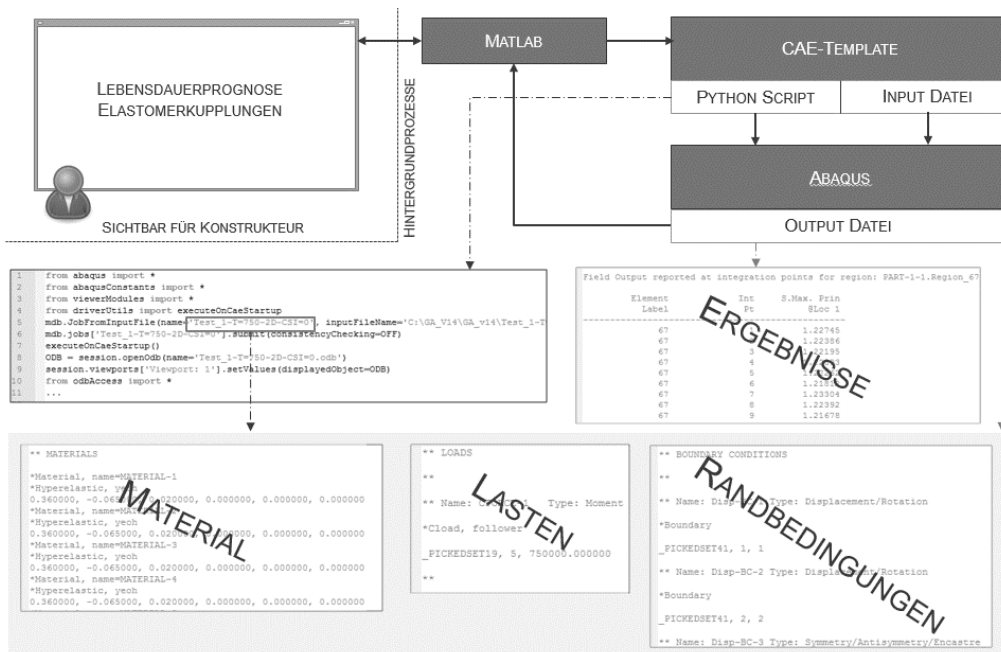


Abbildung 4-17: geplante Verknüpfung Matlab-Abaqus

Zur Implementierung wurden verschiedene Programmierklassen definiert. So wurden aus dem Inputfile eine Objektstruktur und verschiedene Methoden, u. a. zum Auslesen von Informationen, entwickelt. Die Programmierung erfolgte in Matlab. Die Simulation wird in Abaqus durchgeführt. Das entwickelte Anwenderprogramm gliedert sich in vier Reiter, vgl. Abbildung 4-18:

- Manage Input: Verknüpfung zum Inputfile, welches in Abaqus erstellt wurde
- Kalibrierung Yeoh: Kalibrierung der Yeoh-Parameter, welche zu Definition der lokalen Materialmodelle notwendig sind
- Kalibrierung NLSAM: Kalibrierung NLSAM an Versuchsdaten
- Lebensdauer Simulation: Definition der eigentlichen Lebensdauersimulation

Durch dieses entwickelte Programm ist einem Konstrukteur oder Berechner die Möglichkeit gegeben, eine fortgeschrittene Simulation zur Lebensdauerprognose von Elastomerbauteilen selbstständig durchzuführen.

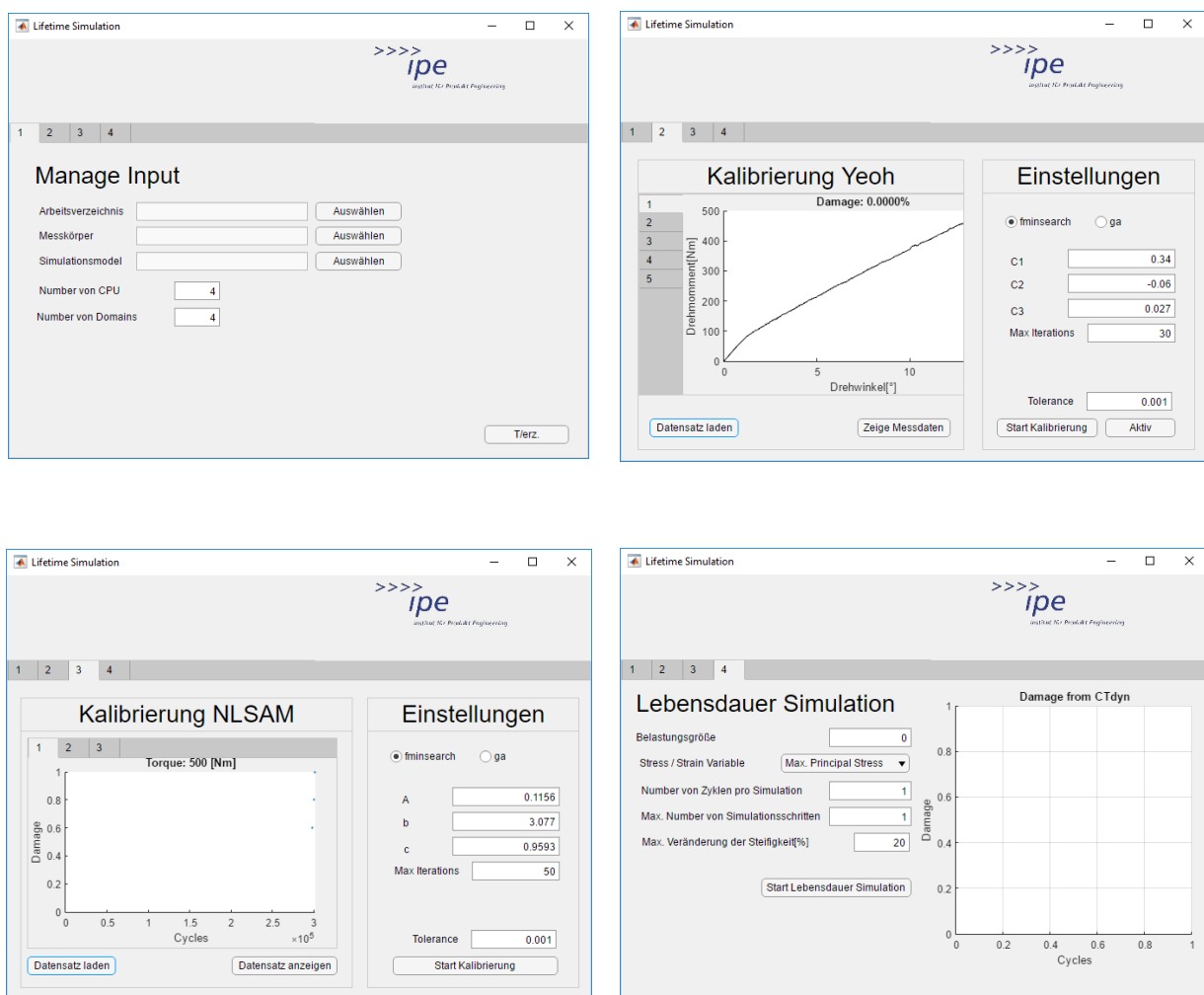


Abbildung 4-18: Anwenderprogramm zur Lebensdauerabschätzung bei Elastomerkupplungen

4.4.3 Qualifizierung des Postprocessings

Die Auswertung einer Simulation erfolgt in vielen Fällen durch die Interpretation von Farbverläufen, welche in Abhängigkeit von einer Ergebnisgröße erstellt wurden. Beurteilt werden diese vom Konstrukteur selbst. Eine wissensbasierte Unterstützung kann im Postprocessing durch u. a. folgende Methoden erfolgen:

- Die Erstellung von Ergebnisschablonen
- Die automatische Erstellung von Berichten
- Eine automatische Ergebnisrückführung
- Auslagerung des Postprocessings

Ergebnisschablonen sind vordefinierte Sichten auf eine Berechnung. Sie werden eingesetzt, wenn bestimmte Arten von Simulationen mit ähnlichen Sichten zur Ergebnisinterpretation wiederholt vorkommen. Der Anwender greift auf diese Sicht bei einem erfolgreichen Abschluss der Berechnung zu. Damit ist u. a. sichergestellt, dass der Konstrukteur die korrekten Ergebnisgrößen zur Auswertung heranzieht. Neben einer Animation sind die für eine Kontaktsimulation relevanten Sichten direkt verfügbar. Ähnlich wie Ergebnisschablonen können ebenso Berichte vordefiniert werden.

Ergebnisschablonen können auch extern im Sinne einer Auslagerung des Postprocessings definiert werden. Die Auswertung bestimmter Analysen erfordern Methoden, welche nicht vom eigentlichen Postprocessor des CAE-Systems unterstützt werden. In diesem Fall ist es erforderlich die Auswertung extern in einem anderen Softwaresystem durchzuführen. Dies kann u. a. eine mathematische Software oder eine Software zur Tabellenkalkulation sein. Im Folgenden wird eine beispielhafte Umsetzung mittels Tabellenkalkulation, welche sich auf das Anwendungsbeispiel aus Unterkapitel 3.1.5 bezieht, aufgezeigt. Teilziele dieses Projektes waren der Aufbau eines Messsystems im CAD-System zur Ermittlung einer geometrischen Abweichung realitätsnaher Stangenmodelle. Zur Abschätzung des Einflusses der Durchbiegung war eine Einbindung eines numerischen Simulationstools notwendig.

Das System besteht grob aus einer V-Rinne, in welche die Stangen gelegt werden. In bestimmten Abständen soll dann die Abstände zwischen den Probenkörpern und der Auflage des Messsystems ermittelt werden.

Durch die Abstandsmessungen sollen dann Rückschlüsse auf die Geradheit der Stangen geschlossen werden. Dazu wurden verschiedene Konzepte zu Messmethoden entwickelt. Als sinnvollste Methode hat sich die Ermittlung einer räumlichen Regressionsgrade bewiesen, siehe Abbildung 4-19. Die eigentliche Implementierung der Messmethode erfolgt dann in Excel. Die gemessenen Abstände a und b dienen dabei immer als Basis. Der Workflow der Methode ist dargestellt in Abbildung 4-20.

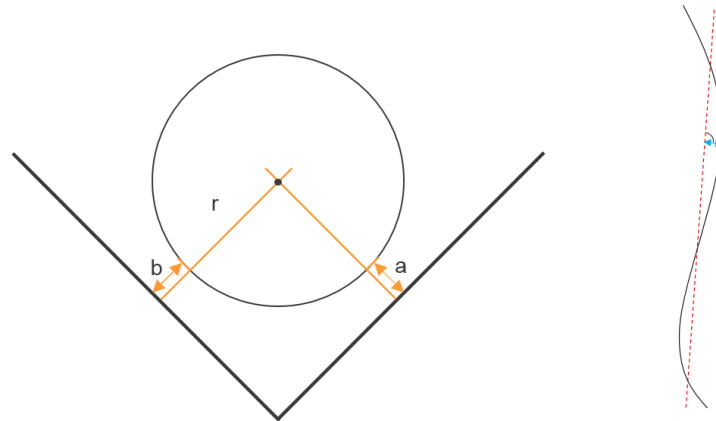


Abbildung 4-19: Abstandsmessung in der V-Rinne

Bei dieser Messmethode werden durch die Abstandsmessungen a , b und den Radius r ebenfalls wieder die Mittelpunktkoordinaten der Kreiskonturen ermittelt und auf die xz -Ebene und auf die yz -Ebene projiziert. Darauf aufbauend werden in beiden Messebenen Regressionsgeraden der ermittelten Kurven ermittelt. Aus den beiden Start- und Endpunkten dieser beiden ebenen Regressionsgeraden wird daraufhin eine räumliche Regressionsgerade definiert. Dann erfolgt die Ermittlung der normalen Punktabstände zur räumlichen Regressionsgerade. Der größte Punktabstand wird dann mit dem Toleranzwert verglichen.

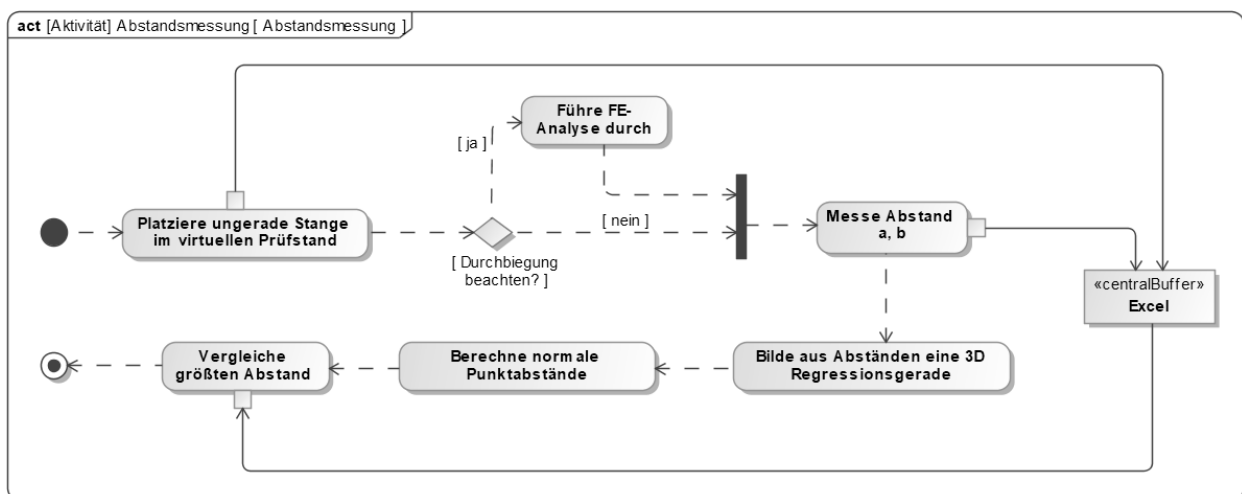


Abbildung 4-20: Aktivitätsdiagramm der Geradheitsmessung

Ein weiterer wichtiger Punkt zur Qualifizierung des Postprocessings ist die Ergebnisrückführung in die CAD-Umgebung. Diese unterteilt sich in die Geometrierückführung und die Rückführung von Metadaten. Bei einer Geometrierückführung wird versucht, die beanspruchte Geometrie aus dem Postprocessing der Simulation in das CAD-System rückzuführen. Meist erfolgt die Rückführung standardmäßig nicht automatisch und ist für komplizierte Bauteile kaum zu realisieren. Eine Methode ist die Rückführung durch Messpunkte, welche die Verschiebung an definierten Stellen eines Körpers messen. Die Geometriepunkte werden

dazu schon vor der Simulation im CAD-System erstellt. Dabei wird das Modell durch Splinekurven beschrieben, welche durch die Geometriepunkte verlaufen. In der Simulation werden lediglich die Messpunkte an den Punkten definiert. Die Rückführung erfolgt durch ein Programm welche die Koordinaten der Punkte anpasst.

4.5 Anwendung in parameterbasierten Optimierungsstudien

Viele der aufgezeigten Methoden zur Simulationsgerechtheit finden ebenfalls Anwendung in Optimierungsstudien. Generell müssen hier einige Fälle unterschieden werden. Den einfachsten Fall beschreibt eine simulationsgerechte Komponente, wenn das Ergebnis nur von einer Domäne abhängig ist. Das ist z. B. der Fall, wenn das Optimierungsziel nur durch rein geometrische Konstruktionsbedingungen abgegrenzt und beeinflusst wird. Wird dagegen das Optimierungsziel von mehr als einer Domäne beeinflusst, wird anhand der Kopplungsart unterteilt.

4.5.1 Interne Kopplung

Eine interne Kopplung liegt vor, wenn zwei oder mehr Domänen in einem System gekoppelt werden. Dies ist zumeist bei fortgeschrittenen CAD-Systemen der Fall. Oft behandelt dies den Fall, dass das parametrische CAD-Modell in einer internen Simulationsumgebung weiterverwendet wird. Dies kann aber auch umgekehrt passen. Besonders dann, wenn bei einer Optimierung geometrische Parameter oder Messgrößen im Vordergrund sind, welche in der Simulation selbst nicht ausgewertet werden können. Im CAD-System Creo Parametric (PTC) ist dies standardmäßig über das sog. Behavioral Modeling Extension möglich, vgl. Abbildung 4-21.

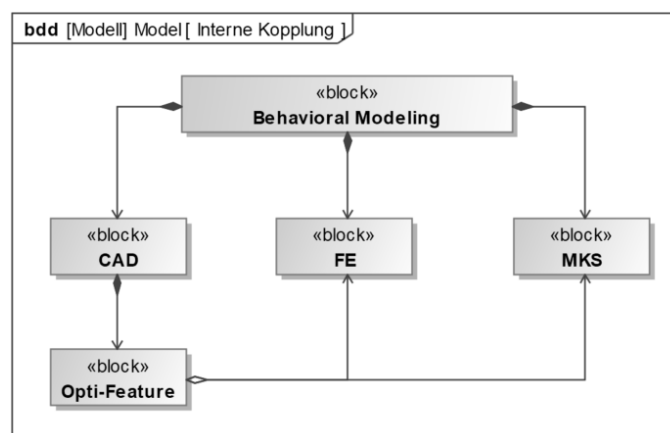


Abbildung 4-21: Blockdefinitionsdiagramm einer internen Kopplung

Wurde das Bauteil vorher simuliert, können Ergebnisgrößen der Simulation mit in die rein geometrische Optimierung einbezogen werden. In Abbildung 4-22 wird die Vorgehensweise

an einem praktischen Beispiel verdeutlicht. Im Modelbaum auf der linken Seite ist die gespeicherte Analyse als KE zu erkennen, welche in der Optimierung, zu sehen auf der rechten Seite, mit einbezogen wird. In dem Beispiel wird das nicht symmetrische Bauteil hinsichtlich einer Unwucht optimiert. Dazu wird in einer MKS-Analyse die Radialkraft und das Radialmoment um die Drehachse ermittelt. Diese Messgrößen werden dann in der CAD-Umgebung in der Optimierung verwendet.

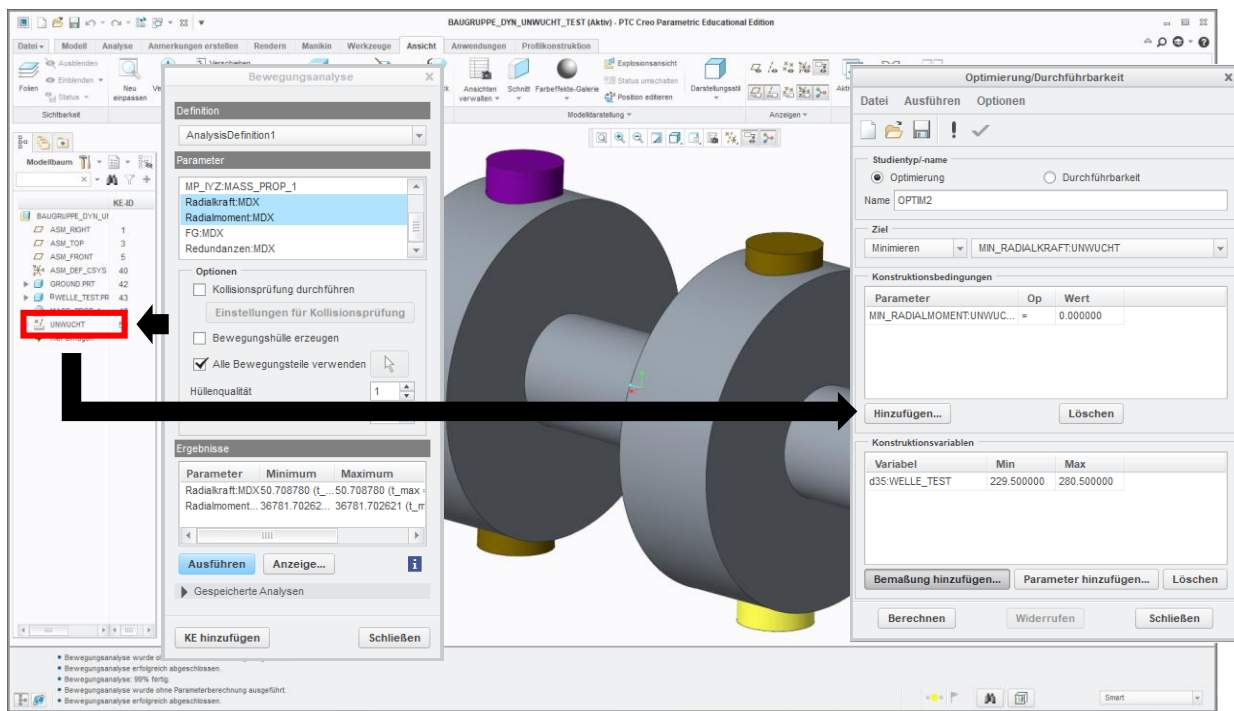


Abbildung 4-22: Behavioral Modeling von PTC Creo

Wie zuvor erwähnt ist es ebenfalls möglich statt einer MKS-Analyse auch eine FE-Analyse einzubinden.

4.5.2 Kopplung mit analytischen Berechnungen

Ein weiterer Fall wird durch die Kopplung der Simulationsumgebung mit einer externen Software für analytische Berechnungen beschrieben, vgl. Abbildung 4-23. Bei der externen Software kann es sich um Tabellenkalkulationstools, eine mathematische Software oder spezielle Berechnungsprogramme für den Maschinenbau handeln.

Im Folgenden wird ein praktisches Beispiel anhand einer Kopplung der internen Simulationsumgebung von Siemens NX (Siemens PLM Software) und Excel (Microsoft Corporation) aufgegriffen. Hierbei wird u. a. auf die Beispiele der Schrauben in Unterkapitel 4.3.3, in welchen diese als simulationsgerechte Komponente dargestellt werden, und die Simulation einer Variantenkonstruktion im Unterkapitel 4.4.1 zurückgegriffen. Der numerische Ansatz behandelt den Fall einer asymmetrischen Belastung einer Flanschverbindung. Das Ziel ist die Absicherung der Verbindung durch eine Anpassung der einzelnen Vorspannkräfte.

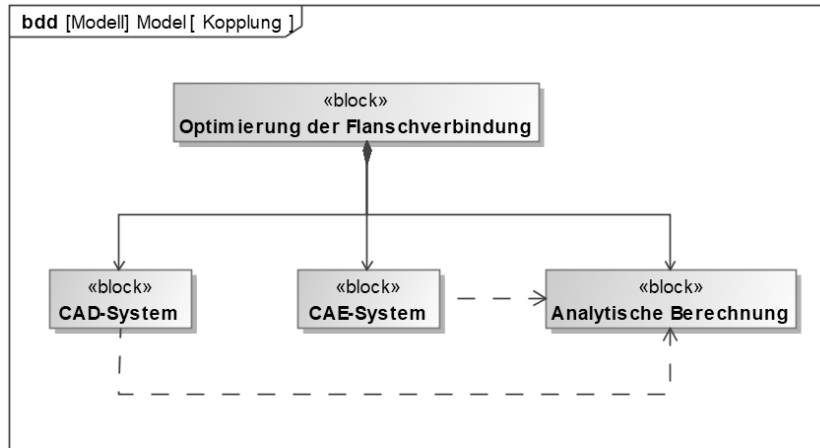


Abbildung 4-23: Blockdefinitionsdiagramm der Kopplung mit analytischer Berechnung

Der Anwender definiert in diesem Ansatz die Konfiguration der Flanschverbindung und die wirkenden Kräfte und Momente. Weitere Informationen wie die Vernetzung, das Material und die Kontaktbedingungen sind vordefiniert. Das Kriterium für die Änderung der Vorspannkräfte resultiert aus der nicht symmetrisch vorliegenden Druckverteilung an der Dichtung, welche bei einer asymmetrischen Belastung auftritt. Die Anpassung der Schraubverbindung wird dann, wie zuvor erwähnt, in einer analytischen Berechnung abgesichert. Der Workflow der Optimierung ist in Abbildung 4-24 als Aktivitätsdiagramm dargestellt.

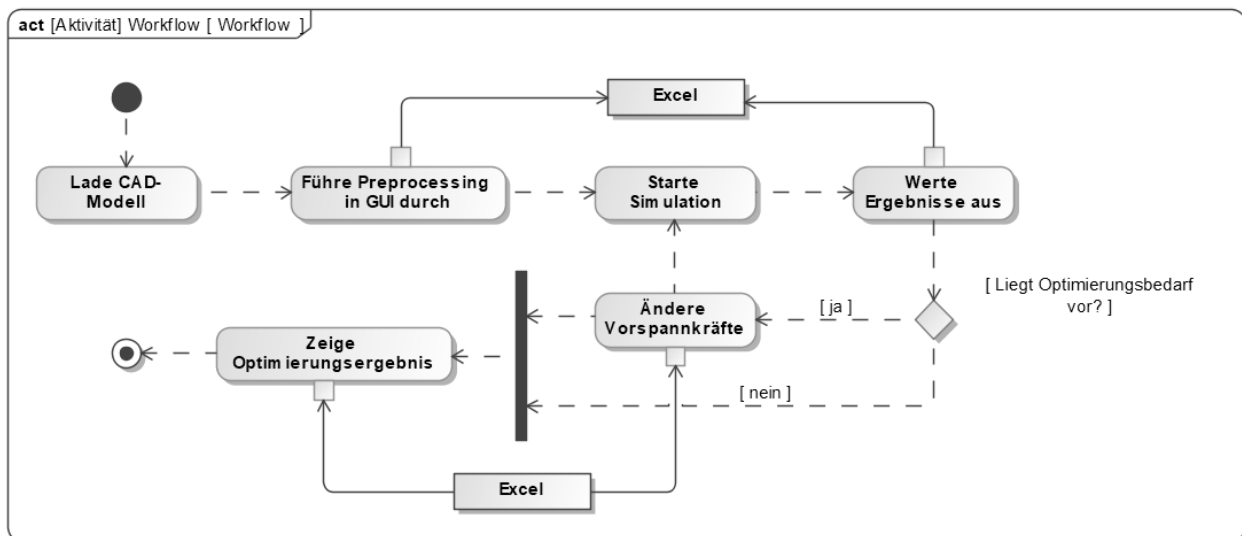


Abbildung 4-24: Aktivitätsdiagramm der Optimierung einer Flanschverbindung

Jede einzelne Schraubverbindung ist mit einer bestimmten Anzahl von Messgrößen gekoppelt. Die Messgrößen sind kreisförmig um die Flanschachse angeordnet und nehmen den Kontaktdruck auf. Diese werden vom Algorithmus ausgewertet und die Vorspannkraft der Flanschverbindung angepasst. In der Abbildung 4-25 ist das Ergebnis einer Optimierung dargestellt. Auf der linken Seite ist die GUI für den Anwender und auf der rechten Seite ist

die asymmetrisch beanspruchte Dichtung und die Dichtung nach der Optimierung dargestellt.

Weiterhin kann diese Methode auch tiefergehend in den PLM-Zyklus integriert werden. In der jetzigen Implementierung definiert der Anwender die Kräfte wie auch die Geometrie. Die angreifenden Kräfte und Momente können aber auch aus übergreifenden Problemstellungen abgeleitet werden. So können z. B. in modernen CAE Systemen zur Anlagenplanung Freischnitte nach statischen Analysen bei komplexen Rohrleitungssystemen vorgenommen werden. Diese könnten dann als Eingangsparameter im dargestellten Ansatz verwendet werden.

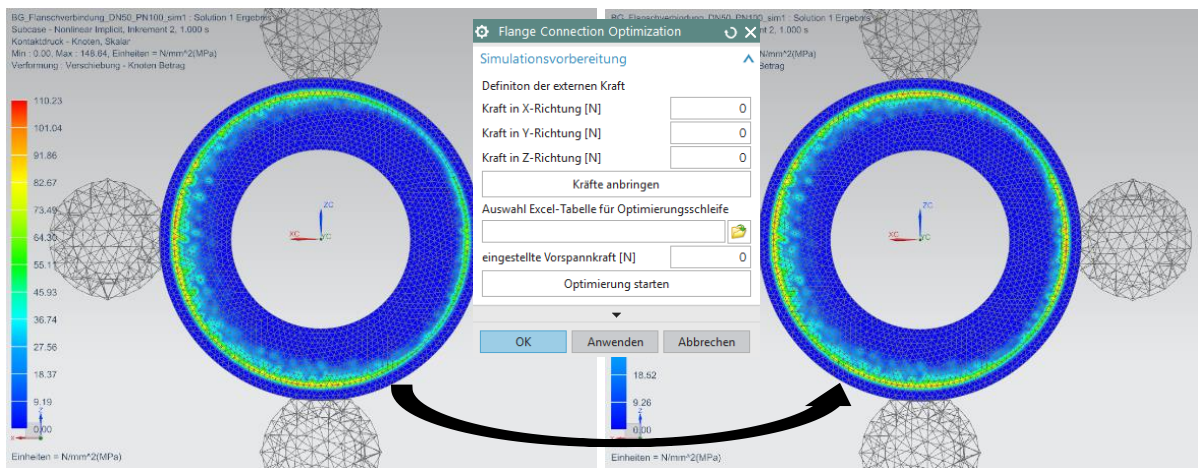


Abbildung 4-25: Ergebnis der Optimierung der Flanschverbindung (nach [He17])

4.5.3 Kopplung mit externen Simulationsumgebungen

Der komplexeste Fall ist die Kopplung mit einer externen Simulationsumgebung. Dieser tritt zumeist auf, wenn die interne Simulationsumgebung nicht mehr ausreichend oder nicht vorhanden ist. Da Problemstellungen in diesen Fällen (von Optimierungsstudien) meist individuell sind, sind vordefinierte Schnittstellen meist nicht vorhanden, ein reiner Geometrieexport im Rahmen einer Simulation dagegen schon.

Eine praktische Umsetzung, für diesen Fall, wird in der Fallstudie im folgenden Kapitel 5 ausführlich aufgezeigt. Dort ist eine Kopplung von Siemens NX (Siemens PLM Software) und Sigmasoft (Sigma Engineering GmbH), hinsichtlich einer rheologischen Optimierung von Spritzgussbauteilen, aufgeführt.

4.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde anhand einer Vielzahl von Beispielen aufgezeigt, wie bei einer Übertragung eines Systemmodells in eine implementierte Form vorgegangen werden kann. Die im Kapitel zuvor definierte Aufteilung von Analysetechniken, Konstruktionsfeature und Komponenten wurden dabei eingehalten. Darüber hinaus wurden ebenfalls Abläufe von

Analysen und Optimierungen aufgezeigt, bei welchen die genannten Techniken zum Einsatz kommen.

Der Einsatz von Methoden aus der Systementwicklung wird schon zu diesem Zeitpunkt als hilfreich bewertet, da bereits nur wenige Diagramme das Verständnis der Problemstellung erhöhen. Zeitlichen Einsparpotenziale können in diesem Kapitel zumindest schon erahnt werden, diese werden aber im nächsten Kapitel, welches eine vollständige Umsetzung zeigt, deutlich.

5 Wissensbasierte Unterstützung des Konstrukteurs hinsichtlich des spritzgussgerechten Bauteilentwurfs

Die dargestellte Methodik zur wissensbasierten Absicherung konstruktionsbegleitender Simulationen wird im Folgenden validiert. Dazu werden die gezeigten Methoden im Rahmen eines am Lehrstuhl „Rechnereinsatz in der Konstruktion“ der Universität Duisburg-Essen bearbeiteten Forschungsprojektes angewendet. Das Projekt „Wissensbasierte Produktplanung und Konstruktion spritzgegossener Formteile“ wurde von der deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördert (KO 160\15-1). Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation mit dem Lehrstuhl „Konstruktion und Kunststoffmaschinen“ ebenfalls der Universität Duisburg-Essen.

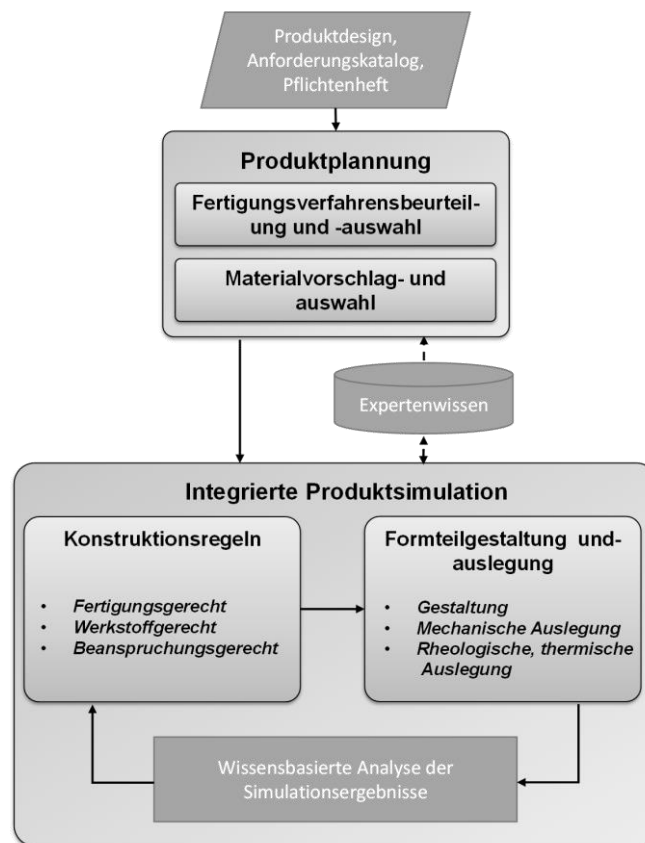


Abbildung 5-1: Projektaufbau

Der Ursprung des Projektes liegt in der fehlenden Unterstützung des Konstrukteurs beim spritzgussgerechten Bauteilentwurf. Wesentliche Ziele sind die Ermöglichung einer wissensbasierten Beurteilung der Fertigungsmöglichkeiten und der Werkstoffvorauswahl für

eine sichere und objektive Produktplanung. Ebenso soll eine Beschleunigung der Formteilgestaltung und -auslegung durch die Reduzierung erforderlicher Optimierungsschritte erreicht werden, vgl. Abbildung 5-1.

Der Konstrukteur soll dabei die meiste Zeit seine gewohnte CAD-Umgebung nicht verlassen müssen. Falls dies unumgänglich ist, soll die Interaktion mit anderen Systemen für den Konstrukteur so angepasst werden, dass eine Bedienung durch ihn, hinsichtlich des Fokus auf konstruktionsbegleitende Simulationen, ohne große Einarbeitung und Schulung möglich ist.

5.1 Rahmenbedingungen des Projektes

Das System wird mit Hilfe der in Kapitel 3 dargestellten Methodik entwickelt. Dementsprechend müssen die Rahmenbedingungen dahingehend angepasst werden. Am Entwicklungsprozess beteiligte Rollen sind ein Systementwickler, ein Konstrukteur und ein Berechnungsexperte.

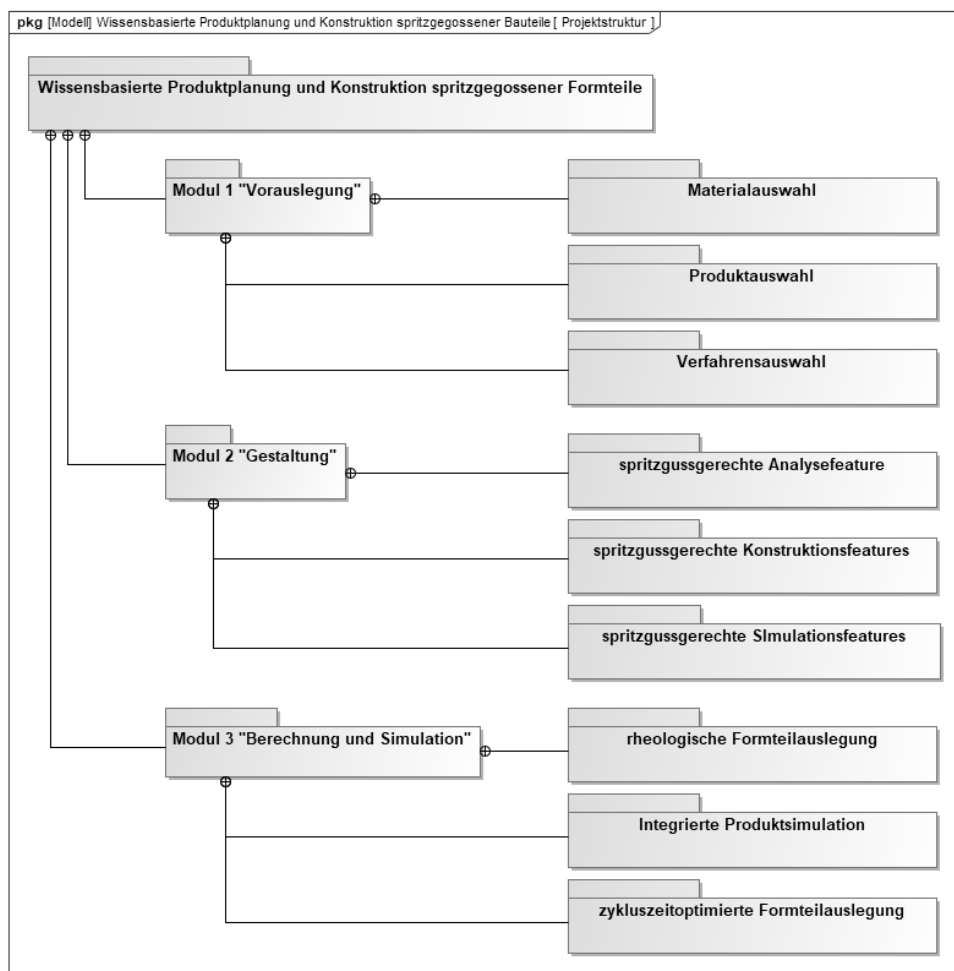


Abbildung 5-2: Paketdiagramm Projekt

Die Wissensakquisition gliedert sich in die Aufbereitung und Verfügbarmachung expliziten und impliziten Wissens. In diesem Projekt basiert das explizite Wissen hauptsächlich auf

Die Verknüpfung der Module 1 und 2 mit den Anwendungsfällen wird im folgenden Paketdiagramm in Abbildung 5-4 dargestellt. Damit wird deutlich, welche Anwendungsfälle welchen Paketen zugewiesen sind. Die Geometrieanalyse ist dementsprechend für alle Auswahlprozesse von Bedeutung.

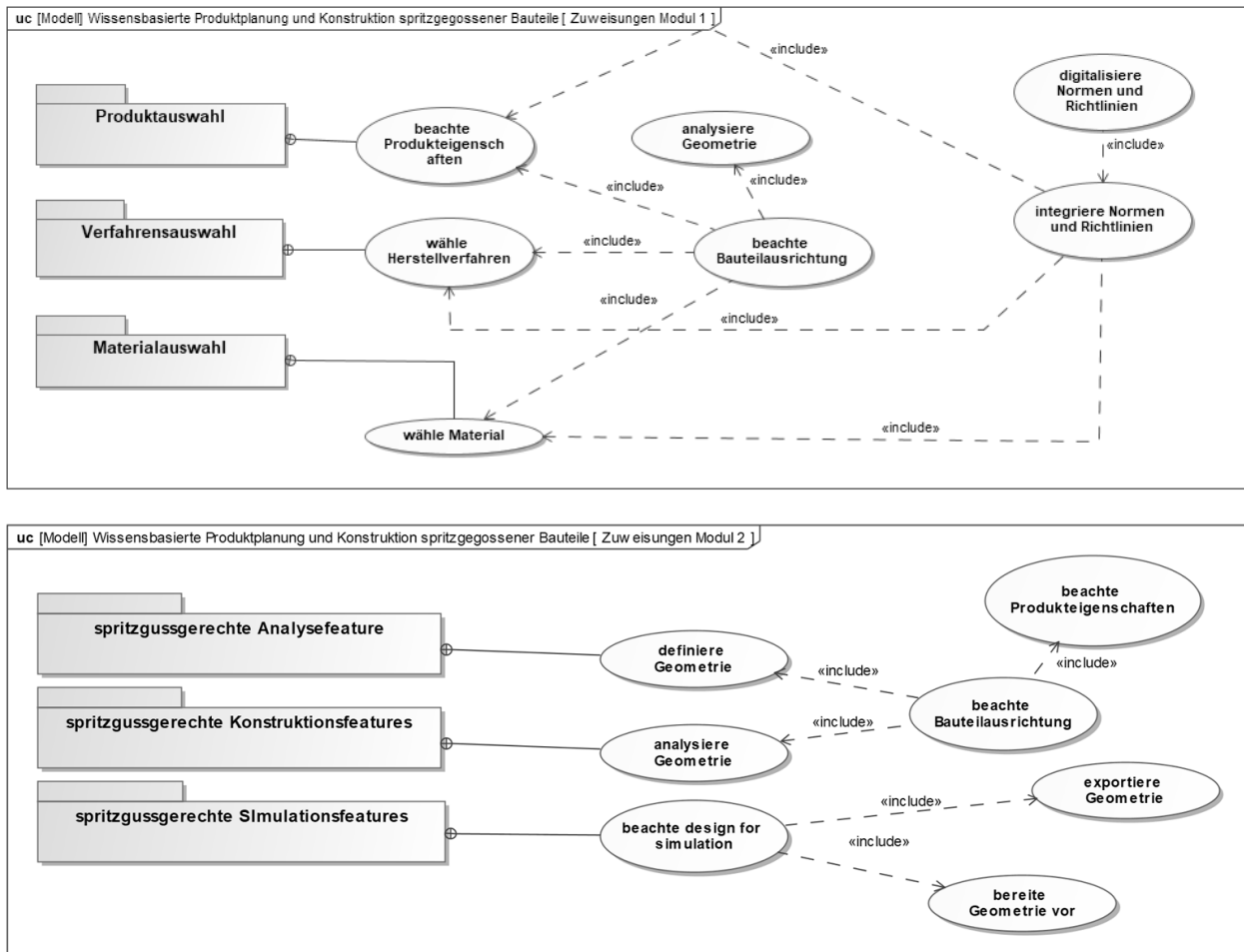


Abbildung 5-4: Paketdiagramme der Zuweisungen Module 1 und 2

Die Struktur des Projektes ist aufgeteilt in 4 Blöcke, dargestellt im Blockdefinitionsdiagramm in Abbildung 5-5. Dieses Diagramm beschreibt den Aufbau des gesamten Systems. Hieraus lassen sich alle weiterhin zu erstellenden funktionalen Beziehungen, Funktionsabläufe etc. ableiten.

Anforderungen an das gesamte Projekt sind im Anforderungsdiagramm zusammenfasst, vgl. Abbildung 5-6. Diese sind mit dem zuvor dargestellten Blockdefinitionsdiagramm verknüpft und müssen in diesem Fall vom System erfüllt („satisfy“) werden.

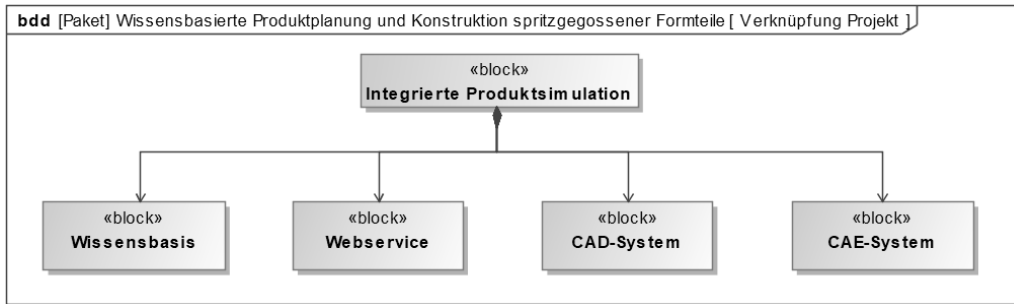


Abbildung 5-5: Blockdefinitionsdiagramm des Unterstützungssystems „Spritzguss“

Die dargestellten Diagramme bilden die Basis für die weitere Detaildefinition des Systems. Dazu werden Unterdiagramme verschiedener Typen erstellt, welche im Folgenden dargestellt werden.

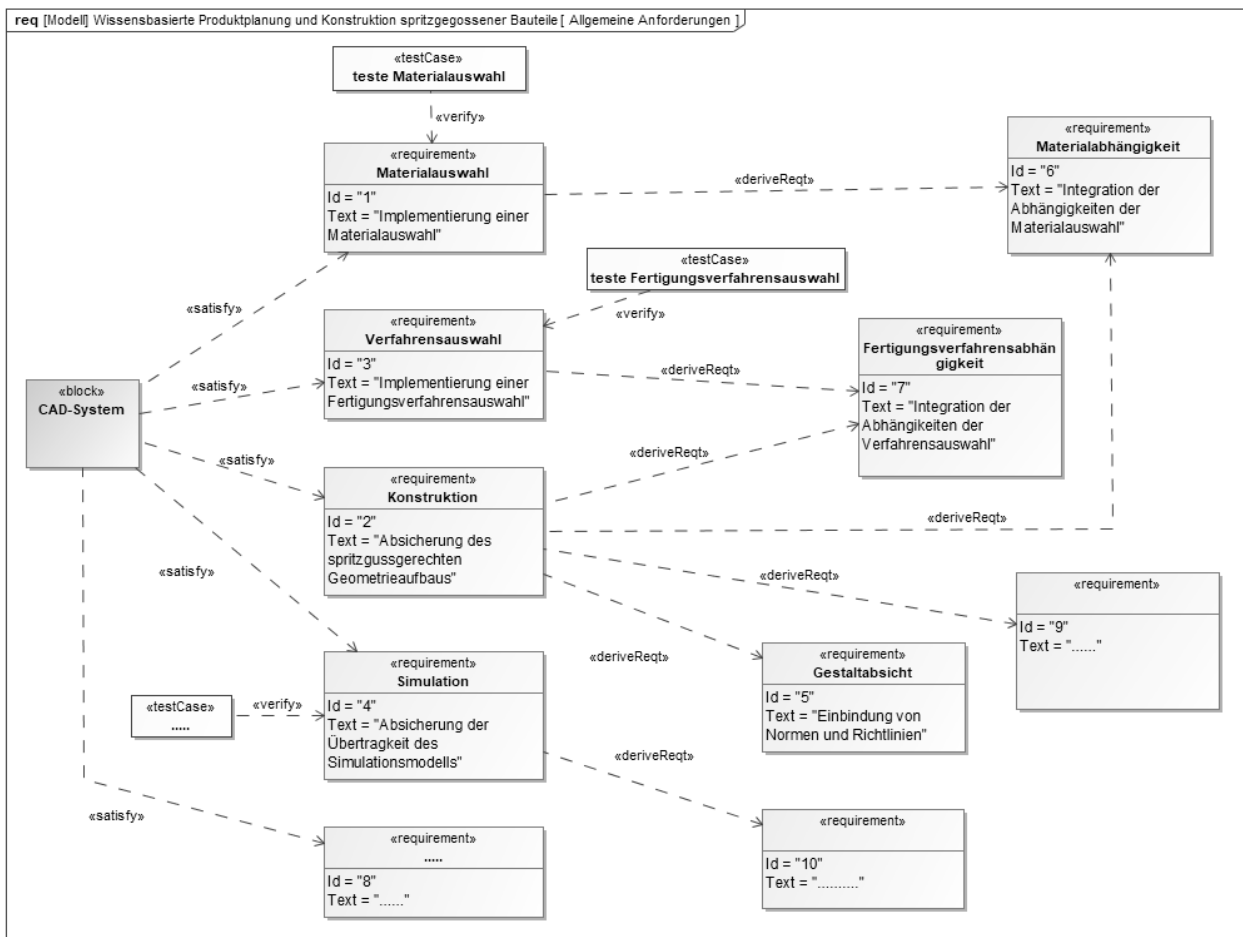


Abbildung 5-6: Anforderungsdiagramm des Projekts

5.2 Datenanbindung und Schnittstellenformate

Innerhalb des Projektes müssen drei Systeme verknüpft werden. Eine Anforderung an die Material- und Verfahrensauswahl und an die Gestaltung ist eine neutrale Wissensrepräsentation. Abgesichert wird dies durch die Verwendung eines Webservices und einer Datenbank. Alle relevanten Daten werden in einer Datenbank abgelegt, welche auf einen Server platziert ist, vgl. Abbildung 5-7. Zusätzlich gewährleistet diese Vorgehensweise einen geringeren Wartungsaufwand des Systems, da bei einer Einbindung an mehr als einem Arbeitsplatz nur der Webservice und die Datenbank aktualisiert werden müssen.

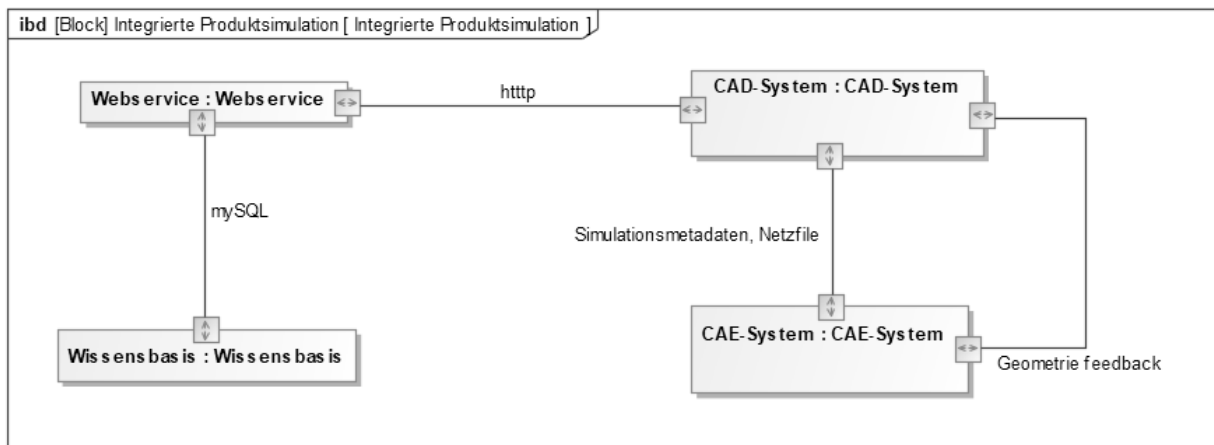


Abbildung 5-7: internes Blockdefinitionsdiagramm der Kommunikation des Softwareverbundes

Die Kommunikation der Module mit der Datenbank erfolgt dann über http, MySQL und Datenaustauschformate. Von den Modulen werden Abfragen an den Webservice gesendet. Die abgefragten Daten werden dann ggf. über ein neutrales Datenaustauschformat ins CAD-System geladen. Diese Daten können dann von entsprechenden Features verwendet werden. Sicherzustellen ist an dieser Stelle eine Regenerierungssteuerung, damit bei einer Änderung des Materials oder Verfahrens der Einfluss auf relevante Features erfasst werden kann.

5.3 Material- und Verfahrensauswahl

Im Rahmen des Projektes wurde die Auswahl der Materialien auf Thermoplaste und die Auswahl möglicher Fertigungsverfahren auf vier begrenzt. Fokussiert wird im weiteren Verlauf nur auf die Materialauswahl.

Der Zugriff auf einen Fragenkatalog erfolgt über den Webservice auf die Datenbank. Ein Browser dient als Benutzerschnittstelle. Besitzt das CAD-System hierbei einen eingebetteten Browser, soll der Zugriff darüber möglich sein (Anforderung an das Gesamtsystem). Die eigentliche Auswahl des Materials und des Fertigungsverfahrens wird sequentiell durchgeführt.

Bei der Materialauswahl wird zwischen zwei Anforderungslisten unterschieden. In der ersten – allgemeinen – wird der Konstrukteur durch einen Fragenkatalog geführt, welchen er mit Daten aus manuell vorliegenden Anforderungslisten und ggf. Daten aus dem CAD-System abarbeitet. Dabei wählt der Anwender anfangs aus groben Kategorien aus. Im nächsten Schritt können fixe Kennwerte und Gewichtungen definiert werden. Mittels einer Nutzwertanalyse wird dann ein Ranking der Materialien ermittelt, vgl. Abbildung 5-8.

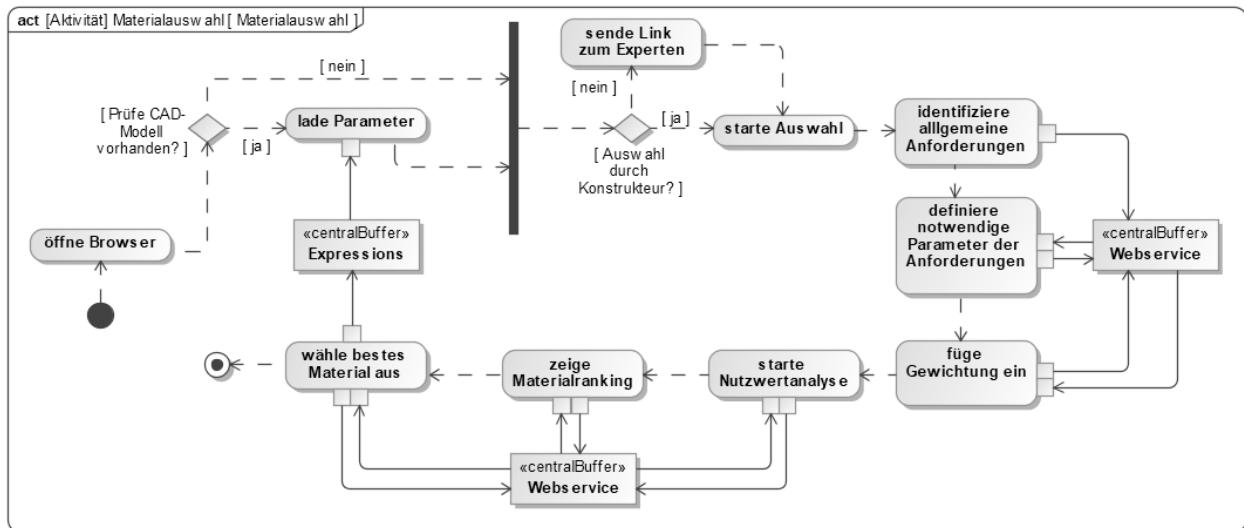


Abbildung 5-8: Aktivitätsdiagramm der Material und Verfahrensauswahl

Wie gerade angedeutet können ggf. Daten aus dem CAD-System verwendet werden. Exemplarische Geometrieparameter, wie die Wanddicke und der Bauraum in die jeweilige Koordinatenrichtung, werden entweder durch die Material- und Verfahrensauswahl dem Konstrukteur vorgegeben oder umkehrt, wenn das Modell schon vorliegt, als Kriterium den Auswahlen zugezogen. Dazu sind oder werden die Geometrieparameter im CAD-System als Parameter hinterlegt.

Eine Anforderung an das Gesamtsystem war die Berücksichtigung von Produkteigenschaften aus Normen und Richtlinien schon bei der Material- und Verfahrensauswahl. Bei den Anforderungslisten werden diese Eigenschaften berücksichtigt. Eine digitale Aufbereitung von Normen und Richtlinien war hierfür erforderlich.

5.4 Einbindung konstruktiver Anforderungen

Neben der Qualifizierung von Produkteigenschaften bei der Material- und Verfahrensauswahl können diese ebenso im weiteren Verlauf der geometrischen Modellerstellung eingebunden werden. Geometrische Restriktion aus Richtlinien und Normen lassen sich damit zu einer frühen Phase einbinden. Dazu muss das Produkt von vorherein definiert und jeweilige Normen hinterlegt sein. In der Abbildung 5-9 ist dies für Kinderspielzeug dargestellt.

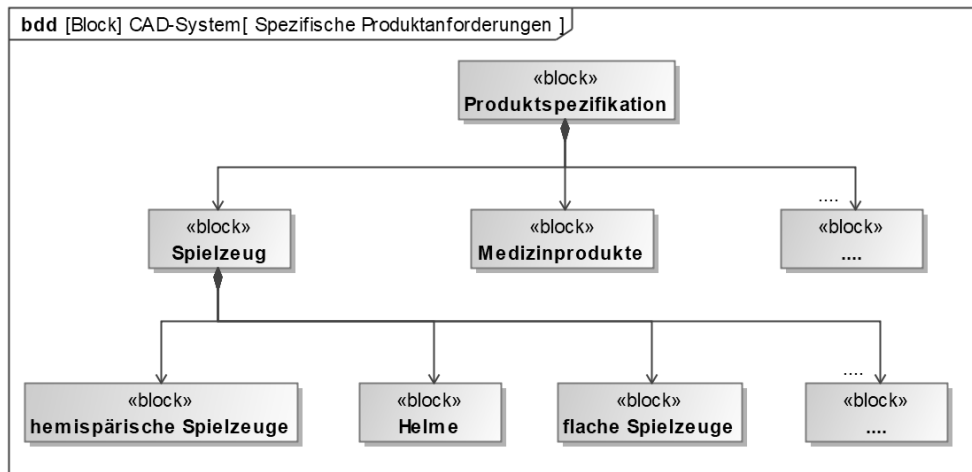


Abbildung 5-9: Blockdefinitionsdiagramm der konstruktive Anforderungen

Der verwendete Ansatz sieht vor, dass der Konstrukteur direkt in seinem CAD-System eine Anforderungsliste über ein Feature einsehen kann. Die Bedingungen sind dann im CAD-Modell zu definieren. Dies kann manuell oder automatisiert erfolgen, automatisiert, da einige Hersteller mittlerweile eine automatische Geometriererkennung in ihre CAD-Systeme implementiert haben. Dies bedeutet z. B., dass bei einer Regenerierung des Modells nach bestimmten Regeln geprüft wird, ob das Element aus der Anforderungsliste vorhanden ist. Bei einer manuellen Verknüpfung können dann, wenn erforderlich, standardmäßige Analysefeatures verwendet werden.

Durch die Verknüpfung von in der Norm vorgegebenen Abmessungen mit Maßparametern im CAD-Modell können diese als Konstruktionsbedingungen oder als Optimierungsziel in einer nachfolgenden Optimierungsstudie verwendet werden. Neben der Definition von Anforderungen aus der Norm sind auch benutzerdefinierte Anforderungen möglich. In der Folgenden Abbildung 5-10 ist dies für hemisphärisches Kinderspielzeug dargestellt.

In diesem Beispiel sind vier Anforderungen definiert, zwei aus der Norm DIN EN 71 [DIN71] für Kinderspielzeug und zwei anwenderspezifische. Neben der geometrischen Prüfung ist hier auch eine Überprüfung der definierten Oberflächengüte notwendig. In diesem Fall wählt der Anwender die Anforderung aus und verknüpft diese mit der gemeinten Fläche. Die Oberflächengüte wird, wenn schon festgelegt, aus der PMI ausgelesen. Eine weitere Anforderung erfordert die Sperrung einer vorgegebenen Funktionsfläche für eine Angussdefinition. Die verknüpfte Fläche ist dann im Angussdefinitionsfeature nicht mehr selektierbar.

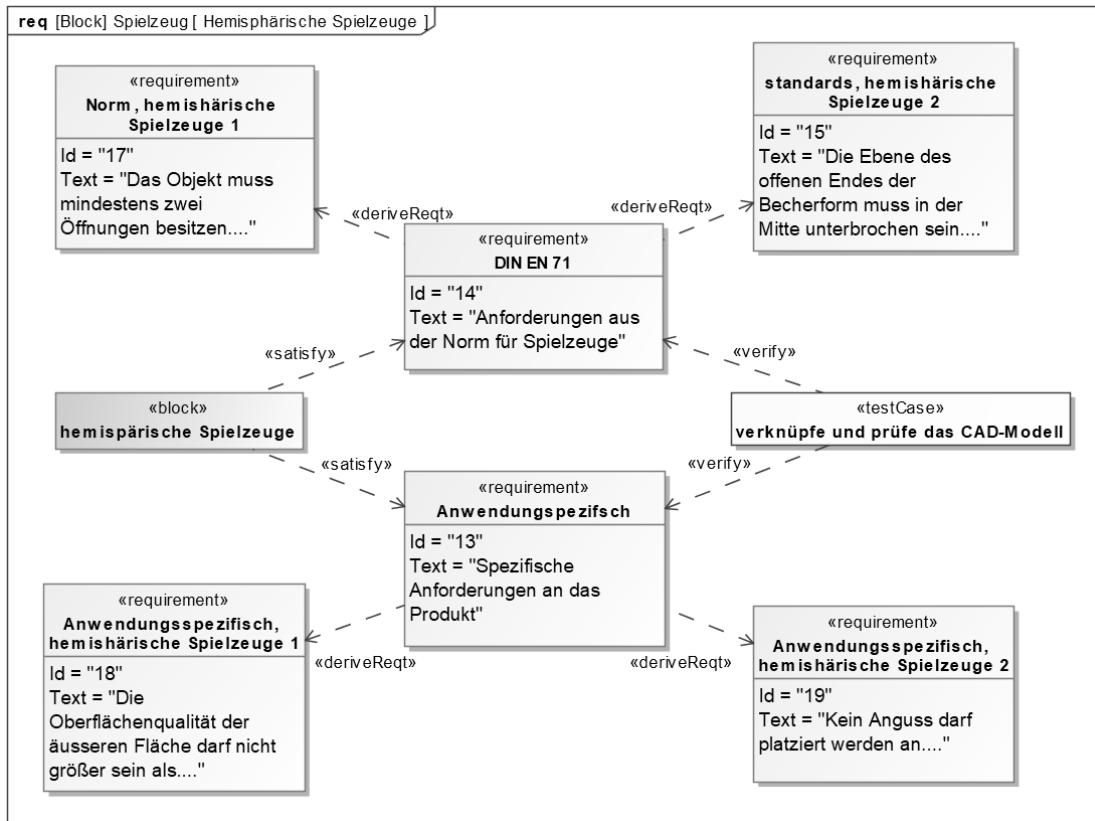


Abbildung 5-10: Anforderungsdiagramm der konstruktiven Anforderungen

Wiederkehrende konstruktive Anforderungen können auch durch benutzerdefinierte Features gelöst werden. Ein Beispiel dafür ist die Erstellung eines Filmgelenks, vgl. Abbildung 5-11. Bei der Platzierung wird automatisch die Randfaserdehnung des Filmgelenks überprüft. Dazu wird die berechnete mit der maximal zulässigen Dehnung, welche aus der Materialauswahl resultiert, verglichen. Ist die Bedingung zulässig, wird die Anforderung in der Anforderungsliste als erledigt markiert.

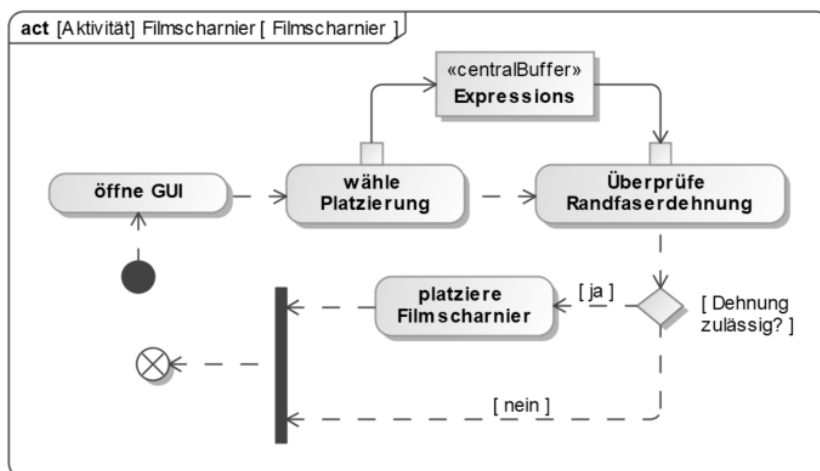


Abbildung 5-11: Aktivitätsdiagramm des Filmgelenks

Ist die Bedingung nicht erfolgreich, bekommt der Konstrukteur eine entsprechende Rückmeldung, dass entweder die Geometrie oder das Material angepasst werden muss.

5.5 Modellierungstechniken

Die Einbindung fertigungsgerechter Modellierungstechniken erfolgt über Features, welche mittels API programmiert oder als UDF eingebunden werden, vgl. Abbildung 5-12. Dieser selbstentwickelte Featureverbund ergänzt die schon im CAD-System verfügbaren Features. Die entwickelte Modellierungsmethodik lässt sowohl eine individuelle, wie auch standardisierte Modellierung zu, individuell, solange die geforderte Spritzgussgerechtigkeit zu überprüfen ist. Gewährleistet wird dies durch entwickelte Prüfmethode und Analysefeatures. Im Falle einer Standardisierung eines fertigungsgerechten Features ist die Spritzgussgerechtigkeit direkt sichergestellt.

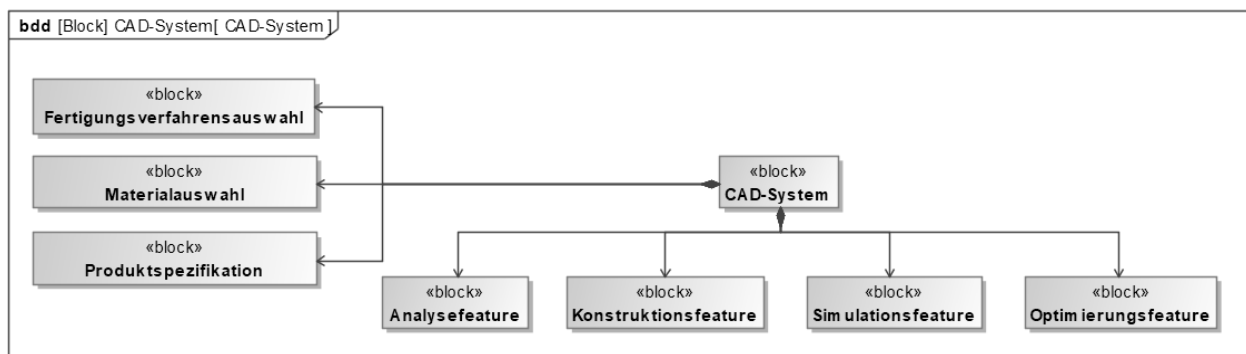


Abbildung 5-12: Blockdefinitionsdiagramm der Featurekategorien

Die generelle Modellierungsstrategie, welche in diesem Projekt definiert wurde, gliedert sich in drei Fälle, siehe auch Abbildung 5-13. Im ersten Fall startet der Anwender mit der Material- und Verfahrensauswahl und darauf folgt die eigentliche Modellierung. Der zweite Fall sieht vor, dass ein CAD-Modell bereits existiert. Aus diesem werden dann für die Auswahlprozesse relevante Kennwerte abgeleitet.

Wurden die Auswahlprozesse bereits durchgeführt und ein CAD-Modell existiert ebenfalls schon, beschreibt dies den dritten Fall. In diesem Fall muss der Anwender über eine vordefinierte Tabelle relevante Kennwerte, welche aus der Auswahl resultieren und aus dem CAD-Modell abgeleitet werden, vergleichen. Daraus werden dann Änderungen in der Material- und/oder Verfahrensauswahl vorgenommen und die Geometrie des CAD-Modells angepasst. Anforderungen an spritzgussgerechte Features ergeben sich größtenteils aus der Literatur. Die spritzgussgerechte Gestaltung wird von einer Vielzahl von Fachbüchern thematisiert, u. a. von [Eh07], [Br11]. Geometrieparameter, wie bei der Gestaltung von Rippen, sind in der Literatur nicht einheitlich festgelegt. Es kann vorweggenommen werden, dass dies keinen

Einfluss auf die spätere Implementierung der Regeln hat. In diesem Projekt werden Methoden exemplarisch umgesetzt und die verwendeten Geometrieparameter sind jederzeit anpassbar.

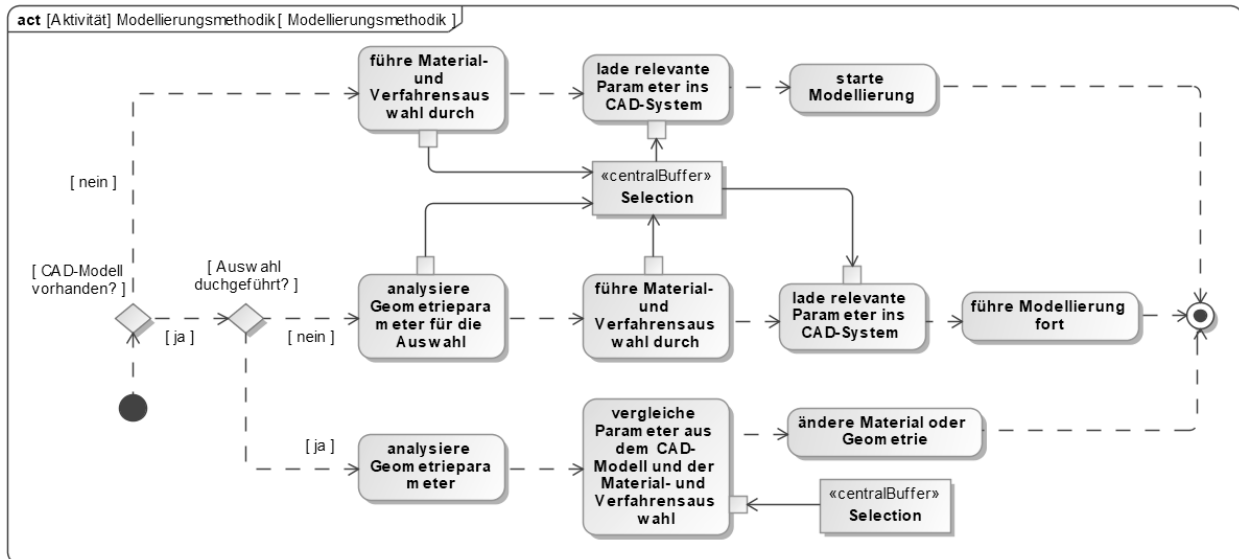


Abbildung 5-13: Aktivitätsdiagramm der Modellierungstechniken

Weiterhin sind die Zusammenhänge zwischen Material- und Verfahrensauswahl und den Features zu analysieren, da einige Geometrieparameter von diesen abhängig sind. Wenn das Material und das Verfahren bereits definiert sind, werden dem Konstrukteur bestimmte Randbedingungen vorgegeben. Über das Material wird z. B. eine Beschränkung hinsichtlich der minimalen und maximalen Wanddicke, wie auch der zulässige (materialabhängige) Winkel einer Entformungsschräge definiert. Das Verfahren gibt dagegen Randbedingungen, wie den maximalen Bauraum vor. Alle Randbedingungen sollen vom Konstrukteur manuell ein- und ausgeblendet werden können.

Ein Analysefeature, welches im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde, ist die Messung einer Spannungskonzentration an einer Rundung. Dieses wurde zuvor schon, inklusive der Implementierung, im Unterkapitel 4.1.1.1 dargestellt.

Die Geometrie des Bauteils besitzt einen großen Einfluss auf die Entformbarkeit. Dabei lässt sich aus definierten Regeln ableiten, dass keine Flächen senkrecht zur Trennebene liegen dürfen [Br11]. Durch das Einfügen einer Konizität an den relevanten Flächen wird die Reibkraft bei der Entformung herabgesetzt. Um die senkrecht liegenden Flächen zu ermitteln, wird ein Analysefeature erstellt, vorausgesetzt, die Öffnungsrichtung des Features ist definiert. Zum Einfügen von Entformungsschrägen wird ein Konstruktionsfeature definiert, vgl. Abbildung 5-14.

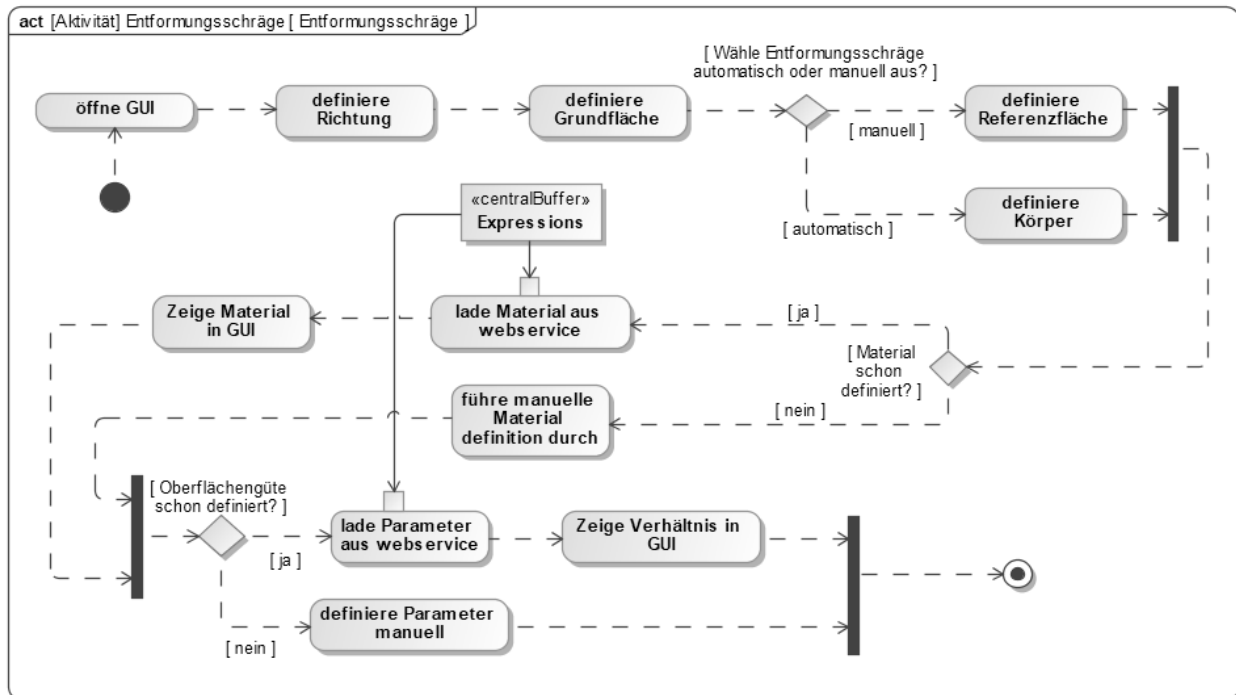


Abbildung 5-14: Aktivitätsdiagramm der Entformungsschräge

Die Entformungsschräge ist materialabhängig. Abgesichert wird dies, indem das Feature mit den Expressions verknüpft ist, welche bei der Materialauswahl im System hinterlegt wurden. Durch die Regenerierbarkeit wird auch bei einem nachfolgenden Materialwechsel der korrekte Winkel definiert.

Zur Versteifung von Kunststoffbauteilen werden Rippen definiert. Die Geometrie wird hauptsächlich über die Wanddicke gesteuert. Die zuvor dargestellte Entformungsschräge findet auch bei Rippen Anwendung. Dementsprechend wird diese mitberücksichtigt. Die Rippenherzeugung kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Bei der ersten werden als Leitkurven schon vorhandene Kurven ausgewählt, vgl. auch Abbildung 5-15. Bei der zweiten werden die Geometrie wie auch die Leitkurvenskizze über dasselbe Feature erstellt. Dabei sind die Kurven in Abhängigkeit des Kreuzungspunktabstands und eines Richtwertes zum Rippenwinkel zu erstellen. Angewendet werden soll dies für rechtwinklige oder kantenparallele und variable Rippenausrichtungen. Gerade bei der zweiten Definitionsweise kommt eine weitere Gestaltungsregel zum Tragen. Die Vermeidung von Masseanhäufungen an den Knotenpunkten wurde von vornherein durch die automatische Definition von Kreuzungspunkten ausgeschlossen. Ebenso bildet dies einen Kompromiss zwischen einer beanspruchungs- und fertigungsgerechten Gestaltung.

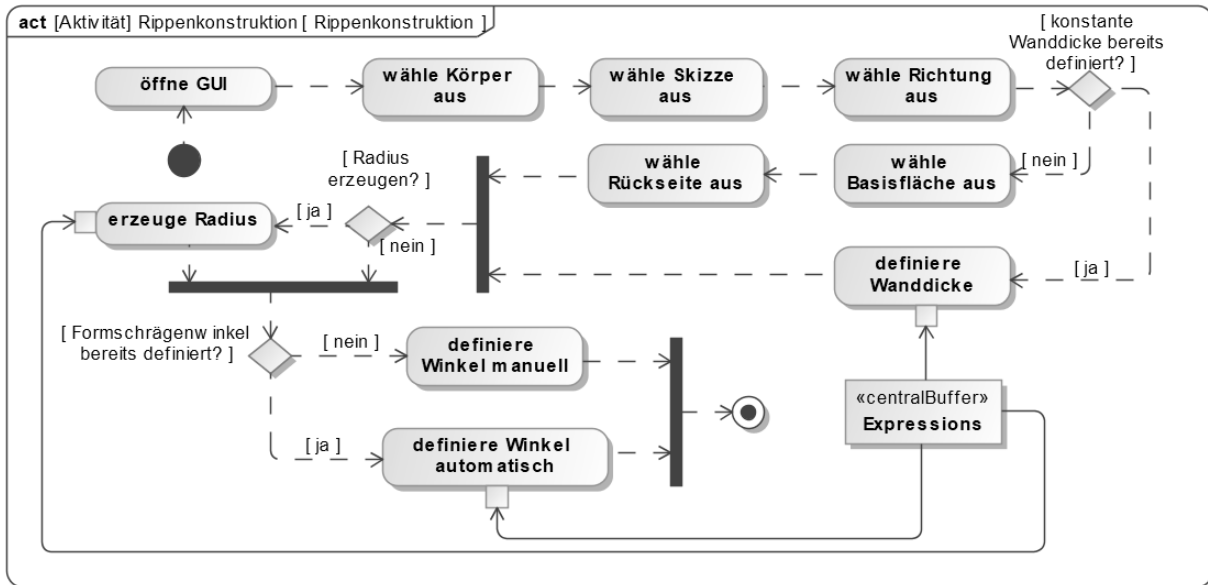


Abbildung 5-15: Aktivitätsdiagramm des Rippenfeature (skizzenbasiert)

Die zweite Methode zur Rippenerzeugung ist in ihrer implementierten Form in Unterkapitel 5.8.2 dargestellt. Ebenfalls dargestellt werden weitere implementierte Konstruktionsfeatures wie u. a. Winkelstücke und Wanddickenübergänge.

5.6 Simulationsvorbereitung

Die Simulationsvorbereitung im CAD-System gliedert sich zum einen in geometrievorbereitende Methoden und zum anderen in Methoden zur Schnittstellendefinition. Mit ersteren wird die Geometrie des CAD-Modells zum Geometriemodell des Simulationsmodells angepasst. Der zweite Punkt behandelt das Thema der Schnittstellendefinition. Oft verfügen CAD-Systeme und eigenständige Simulationsumgebungen über keine assoziative Schnittstelle. Die Übertragung erfolgt meist über neutrale Datenformate.

Eine Rückführung von Simulationsergebnissen wird damit erschwert. Viele der Anforderungen an eine geeignete Kopplung der Domänen CAD/CAE sind dementsprechend softwareabhängig.

5.6.1 Geometrievorbereitung

Für die Transformation des Geometriemodells des CAD-Modells in das des Simulationsmodells sind modellvorbereitende Schritte notwendig. In Anbetracht einer rheologischen Simulation liegt der Fokus hier nicht auf der Unterdrückung unterschiedlicher Features oder der Dimensionsreduktion, sondern auf einer möglichst realen Darstellung der späteren Kavität. Faktoren sind z. B. die Einbeziehung der Schwindung und der Toleranzen.

Die Schwindung wird über einen materialspezifischen Parameter gesteuert. Dieser wird ebenfalls aus den, aus der Materialauswahl definierten Expressions ausgelesen, vgl. Abbildung 5-16. Eine Regenerierbarkeit ist abgesichert.

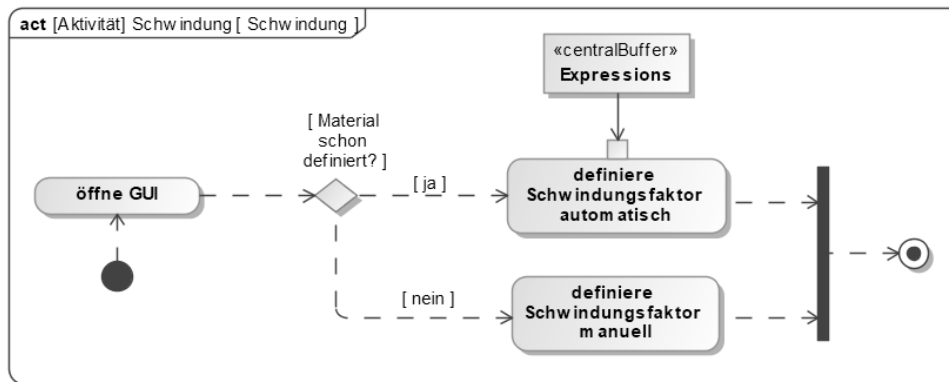


Abbildung 5-16: Aktivitätsdiagramm der Schwindung

Bei einer rheologischen Simulation muss die Kavität dem Geometriemodell des CAD-Modells entsprechen. Dabei muss auch das Toleranzmodell beachtet werden. Alle Maßtoleranzen müssen in diesem Fall auf das jeweilige Mindestmaß definiert sein, vgl. Abbildung 5-17. Dazu werden aus allen geometriestimmenden Maßen die jeweiligen Toleranzfelder ausgelesen und dann angepasst.

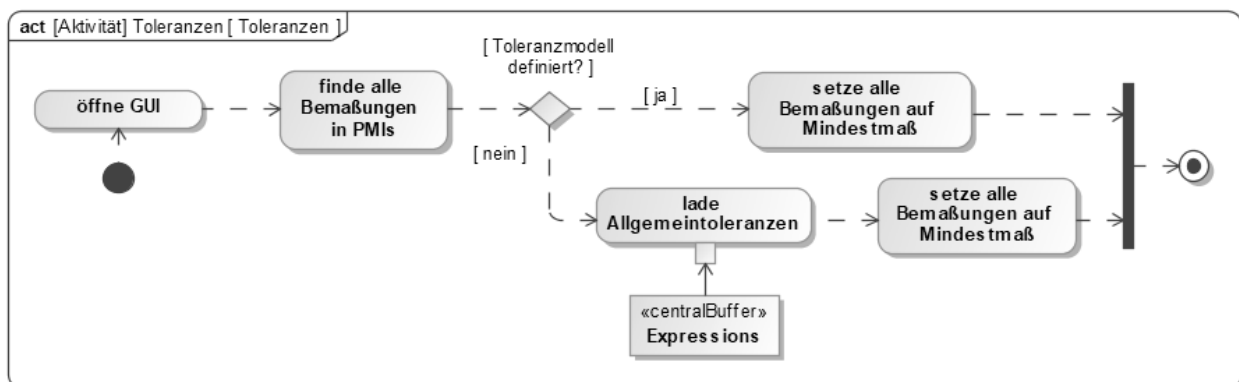


Abbildung 5-17: Aktivitätsdiagramm der Toleranzen

Wenn kein Toleranzfeld festgelegt ist, werden die Toleranzen als Allgemeintoleranzen behandelt. Die Abmaße sind in der Datenbank oder in einer Tabelle festgelegt. Die Toleranzklasse wird dabei vom Konstrukteur im Rahmen der Material- und Verfahrensauswahl definiert.

5.6.2 Schnittstelle

Zur Erstellung der Optimierungsroutine müssen Ergebnisgrößen aus der Simulation wieder in das CAD-System zurückgeführt werden. Die Rückführung wird erst im nächsten Unterkapitel

pitel thematisiert. Trotzdem muss dies aber als Anforderung mit in die Schnittstellenerstellung aufgenommen werden. Eine direkte Rückführung von Ergebnisgrößen ist mit der verwendeten Simulationsumgebung nicht möglich. Diese wird demnach nur für das Processing verwendet. Das Postprocessing findet dann in einer separaten Software statt.

Der erste Schritt vom Pre- zum Postprocessing ist die Geometrieübergabe vom CAD-System zum Simulationssystem in einem neutralen Datenformat. In der Simulationsumgebung wird das Bauteil vernetzt. Die Parameter zur Netzerstellung werden in das CAD-System zurückgeführt. Dies ist notwendig, um im CAD-System ein möglichst ähnliches zweites Netz zu erzeugen. Dieser zusätzliche Schritt wird benötigt, da mit der Simulationsumgebung nur Ergebnisgrößen aller Netzelemente, aber nicht das gesamte Netz, exportiert werden können. Diese werden dann in der Auswertungssoftware auf das zweite Netz übertragen. Dadurch ist die Durchführung des Postprocessings in einer neutralen Umgebung, wie auch eine spätere Übertragung von Ergebnisgrößen, gewährleistet. Der gesamte Workflow des Features ist in der Abbildung 5-18 zusammengefasst.

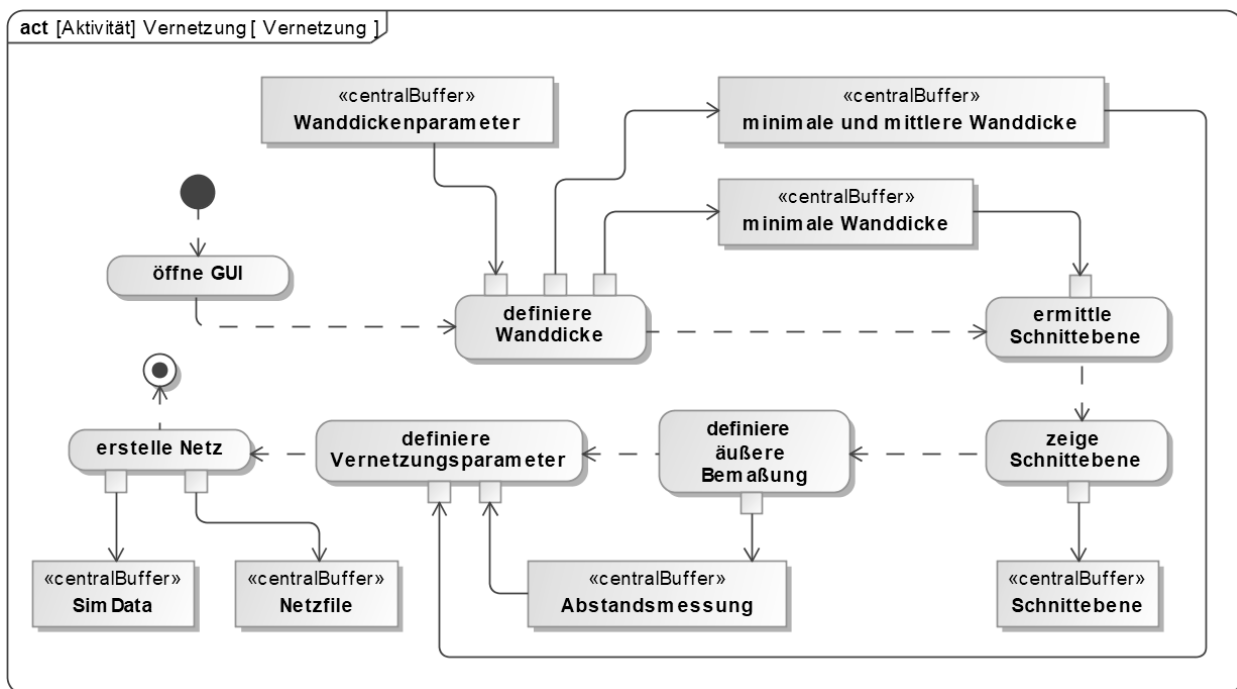


Abbildung 5-18: Aktivitätsdiagramm des Netzexports

Neben dem Netz wird eine Simulationsmetadatei mit relevanten Parametern zur Netzerstellung exportiert. Diese wird benötigt um im Postprocessing das Netz exakt zu orientieren.

5.7 Geometrierückführung

Nach Abschluss der Methodenentwicklung zum Processing und Postprocessing, welche hauptsächlich vom Projektpartner entwickelt wurden, werden Ergebnisgrößen in das CAD-System zurückgeführt. Dabei handelt es sich um Fließhilfen und Barrieren. Diese ergeben sich aus einem ungleichmäßigen Füllen des Bauteils. Für jede Hilfe oder Barriere werden eine Leitkurve wie auch Geometrieparameter abgeleitet. Es können drei geometrische Formen als Fließhilfe definiert werden (Rechteck, Rippe und Bogen). Als Fließbarriere ist lediglich die Auswahl der rechteckigen Geometrie möglich. Die Daten werden über ein neutrales Schnittstellenformat übertragen. Im CAD-System soll diese Datei über ein Feature teilautomatisiert verarbeitet werden.

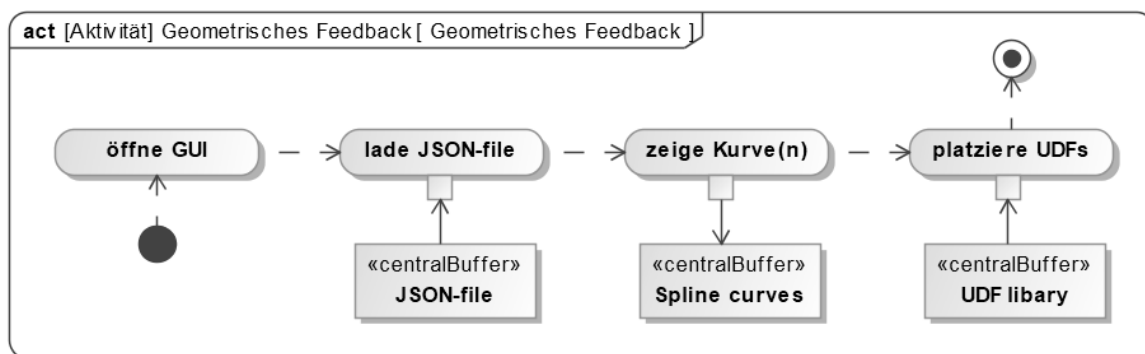


Abbildung 5-19: Aktivitätsdiagramm der Geometrierückführung

In der Metadatenfile ist die jeweilige Leitkurve in Form von Geometriepunkten beschrieben. Diese werden dann zur Definition einer Splinekurve im CAD-System verwendet. Die geometrischen Formen wie auch die Geometrieparameter werden ebenfalls aus dem neutralen Datenformat ausgelesen, vgl. Abbildung 5-19. Damit sind alle Randbedingungen zur Erstellung eines benutzerdefinierten Zugkörpers erfüllt.

5.8 Praktische Umsetzung

Nach Abschluss der Formalisierung im Rahmen der Systementwicklung ist der nächste Schritt die Implementierung in das CAD-System. Durchgeführt wird diese von einem Programmierer, inklusive einer methodischen Unterstützung, falls diese notwendig ist.

Die Implementierung erfolgt in das CAD-System Siemens NX 10 (Siemens PLM Software). Verwendet wurde die Programmierschnittstelle NX-Open mit der Programmiersprache C#. GUIs wurden mit dem Block UI Styler von NX erstellt. In der Abbildung 5-20 ist das Gesamtsystem in seiner implementierten Form dargestellt. Im Reiter links befinden sich die Auswahlprozesse und rechts daneben die unterschiedlichen Featurekategorien, vgl. Abbildung 5-12.

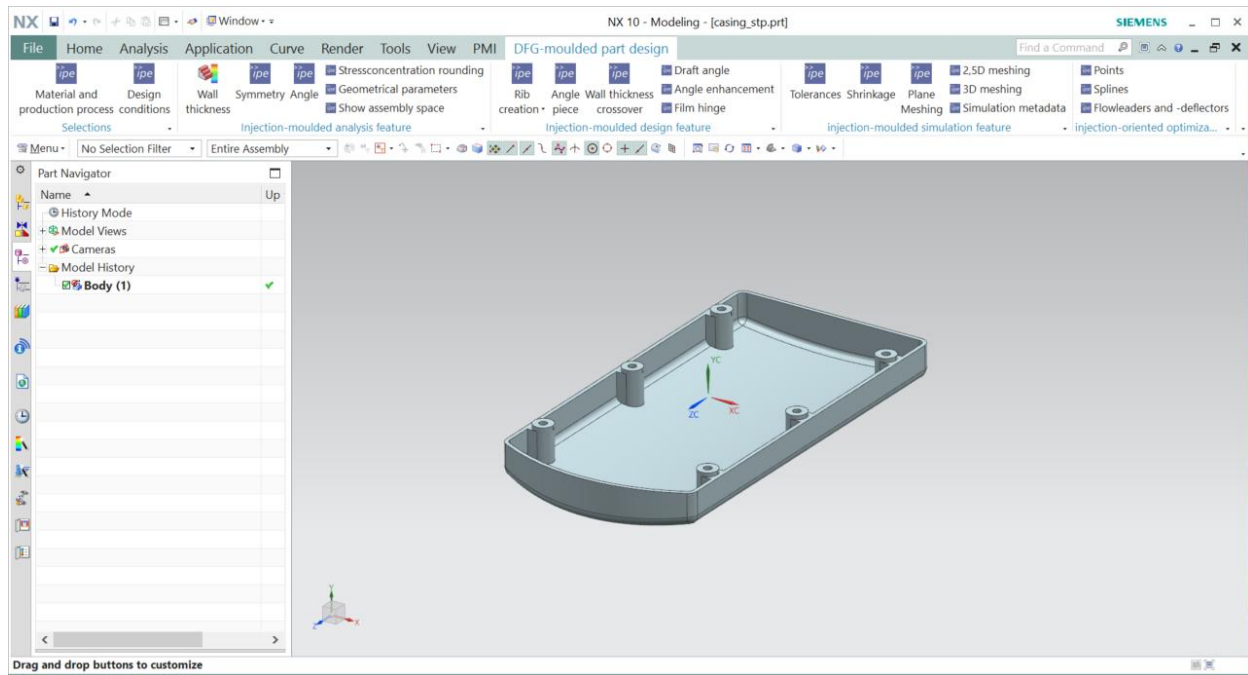


Abbildung 5-20: Ribboninterface „Spritzgussgerechte Konstruktion“

Der Datenaustausch zwischen den Auswahlprozessen und den Features arbeitet wie folgt: Die sich aus den Auswahlprozessen ergebenden Parameter werden über http und MySQL aus der Datenbank geladen und im CAD-System als Expressions gespeichert. Die Features greifen dann auf die Expressions zu. Eine Regenerierungssteuerung stellt sicher, dass aus jeweiligen Änderungen in den Auswahlprozessen auch Änderungen in den Features abgefangen werden.

5.8.1 Auswahlprozesse

In Abbildung 5-21 ist die Implementierung der Materialauswahl dargestellt, durch welche der Konstrukteur beim Auswahlprozess geführt wird. Programmiert wurde diese in der Hypertext Markup Language (HTML). Eine Lauffähigkeit im internen Browser von NX wie auch in externen Browsern wurde abgesichert.

Die Einbindung konstruktiver Anforderungen zur Qualifizierung der Modellerstellung oder der Modellierungsmethodik verläuft ähnlich. Anders als bei der Materialauswahl zuvor, werden relevante Daten nicht über Expressions, sondern über Attribute implementiert. Produktanforderungen können produktspezifisch in das CAD-System geladen werden. Wie bei der Systementwicklung zuvor erwähnt, sind die Anforderung teilweise abhängig vom Ergebnis der Material- und Verfahrensauswahl.

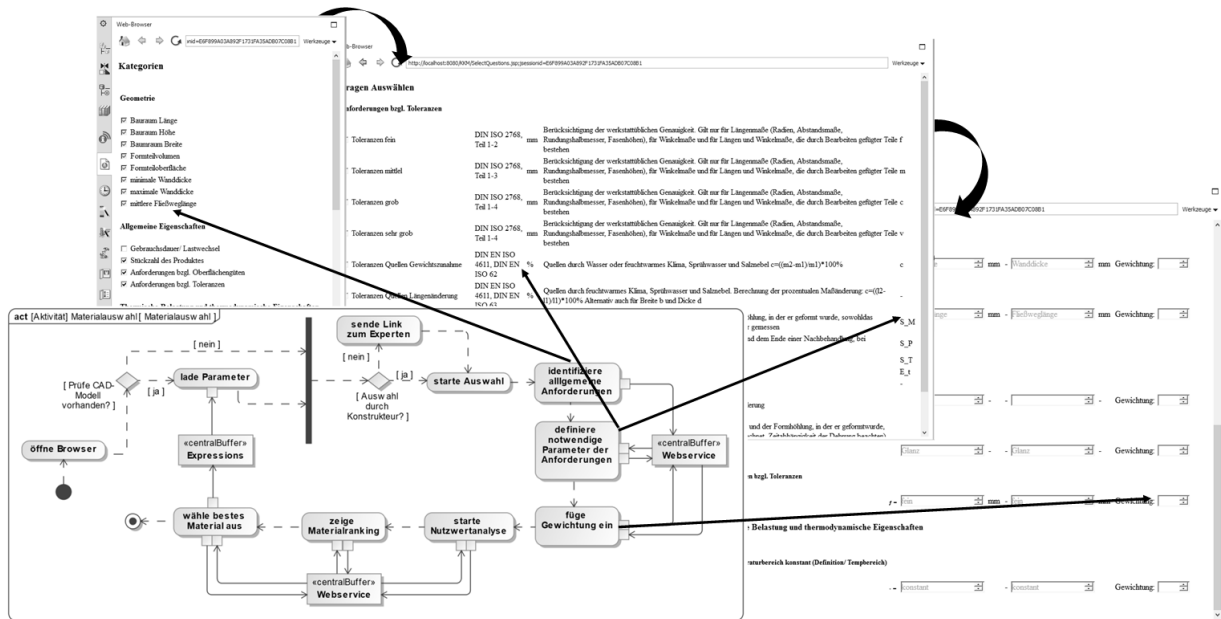


Abbildung 5-21: Implementierung der Materialauswahl

Als Beispiel dazu wird in der in Abbildung 5-22 die Oberflächengüte geprüft. Normen und Richtlinien, wie auch firmenspezifische Anforderungen können ebenfalls implementiert werden. Im vorliegenden Beispiel soll ein definierter Mindestabstand zwischen den Bohrungen eingehalten werden. Dazu werden im implementierten Prüftool die Bohrungen miteinander verknüpft und geprüft. Die Prüfbedingung wird in den Expressions hinterlegt. Dies würde eine Liveüberprüfung und eine Weiterverwendung in Optimierungsstudien sicherstellen.

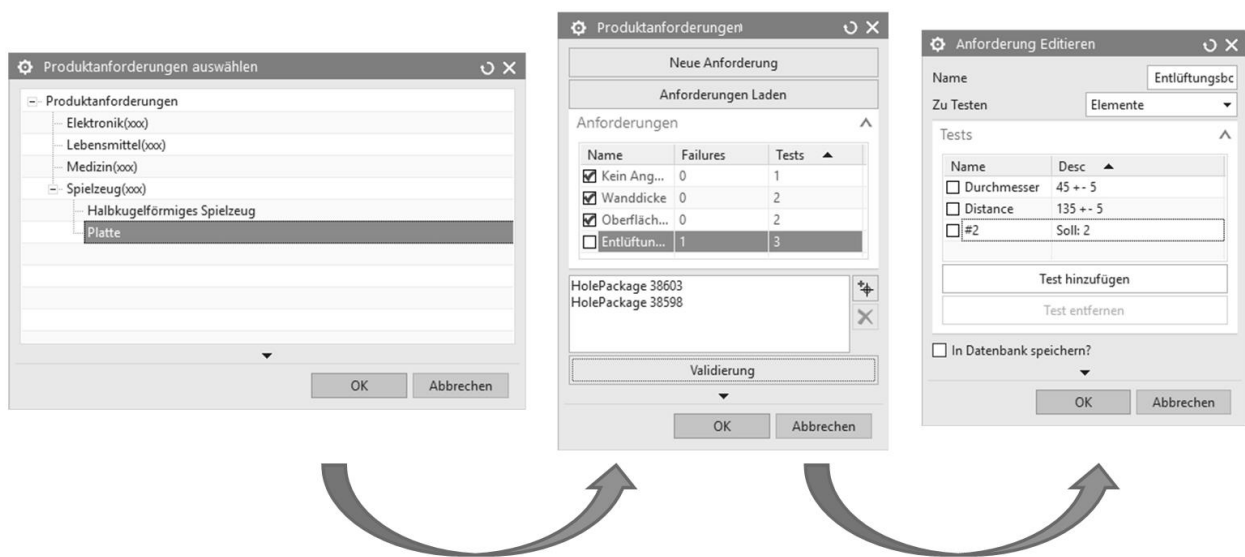


Abbildung 5-22: Einbindung konstruktiver Anforderung“

Der Konstrukteur oder der Administrator kann neue lokale Anforderungen und globale Produktanforderungen hinzufügen.

5.8.2 Spritzgussfeature

Im Folgenden werden prototypische Umsetzungen zu den vier aufgezeigten Featurekategorien gezeigt. Ein Beispiel zu einem spritzgussgerechten Analysefeature wurde bereits in Unterkapitel 4.1.1.1 gezeigt. Mit diesem kann die Spannungskonzentration einer Rundung gemessen werden. In der folgenden Abbildung 5-23 sind zwei implementierte Konstruktionsfeatures dargestellt. Bei beiden wurde die GUI mit dem Block UI Styler erstellt. Die Materialabhängigkeit wird über die vordefinierte Entformungsschräge verdeutlicht. Um den Konstrukteur die Absicht des Features zu verdeutlichen, wurden kleine Skizzen eingefügt, welche die parametrischen Zusammenhänge aufzeigen. Weitere Feature, welche implementiert wurden, sind in der zuvor gezeigten Abbildung 5-20, in der Ribbonleiste von NX10 dargestellt.

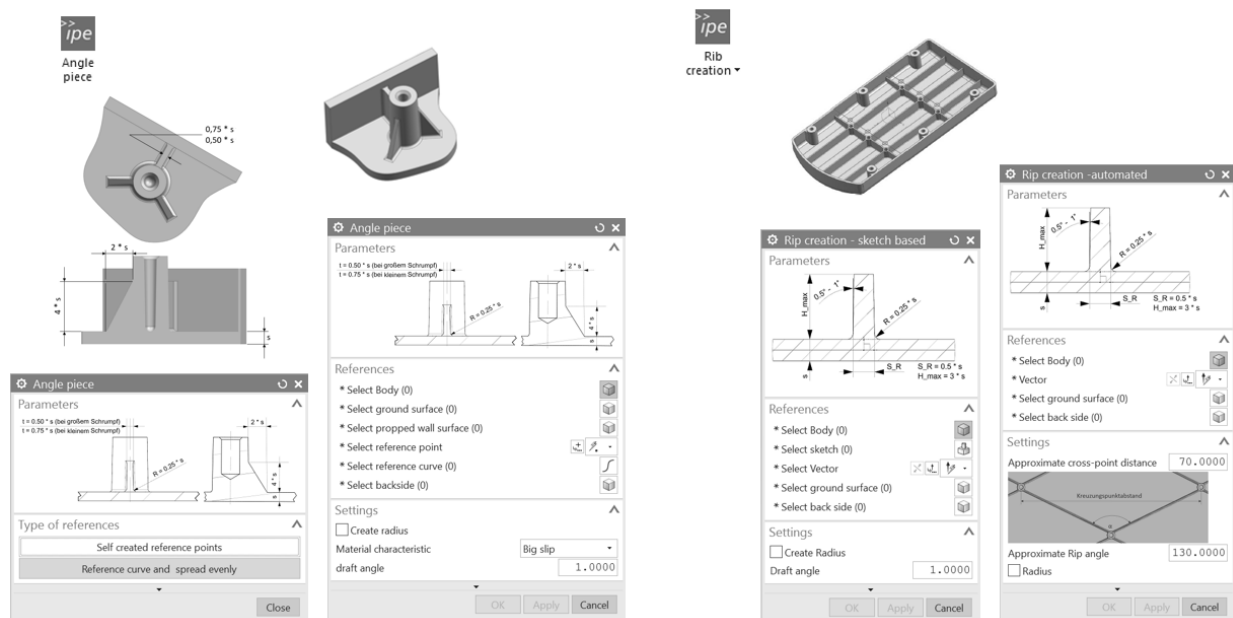


Abbildung 5-23: Implementierte Konstruktionsfeature in NX (nach ([Ue16])

Im Bereich der spritzgussgerechten Simulationsfeature wurden prototypisch Vernetzungsfeatures und Features zur Geometrie Vorbereitung umgesetzt. Für die Vorbereitung wurde ein Schwindungs- und Toleranzfeature implementiert, vgl. Unterkapitel 5.6.1. Das noch in der Abbildung 5-18 als Aktivitätsdiagramm dargestellte 3D-Export Feature ist in Abbildung 5-24 in seiner endgültigen Form dargestellt.

Für die darauffolgende Simulation werden das Geometriemodell als step-File (engl. Standard for the exchange of product model data), das erzeugte Netz und weitere Simulationsmetadaten, in Form einer JSON-Datei benötigt. Die Simulationsmetadaten enthalten u. a. Informationen über die Orientierung und die Anzahl der Netzsichten. Diese werden bei der Zusammenführung der Netze und des CAD-Modells in Matlab benötigt. In Matlab wird das Postprocessing durchgeführt.

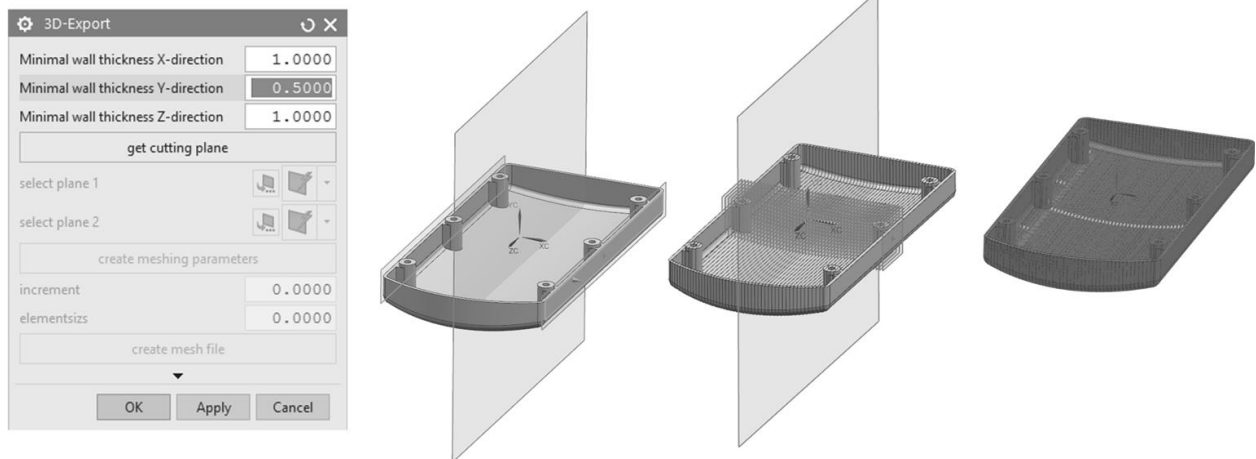


Abbildung 5-24: Implementierung der Vernetzung und Simulationsvorbereitung

Besteht Optimierungsbedarf, wie bei einer ungleichmäßigen Füllung des Bauteils, kann das Bauteil inklusive relevanter Metadaten in das CAD-System zurückgeführt werden. Das folgende Beispiel setzt voraus, dass der der Anguss an das Bauteil nicht anders positioniert werden kann, vgl. Abbildung 5-25.

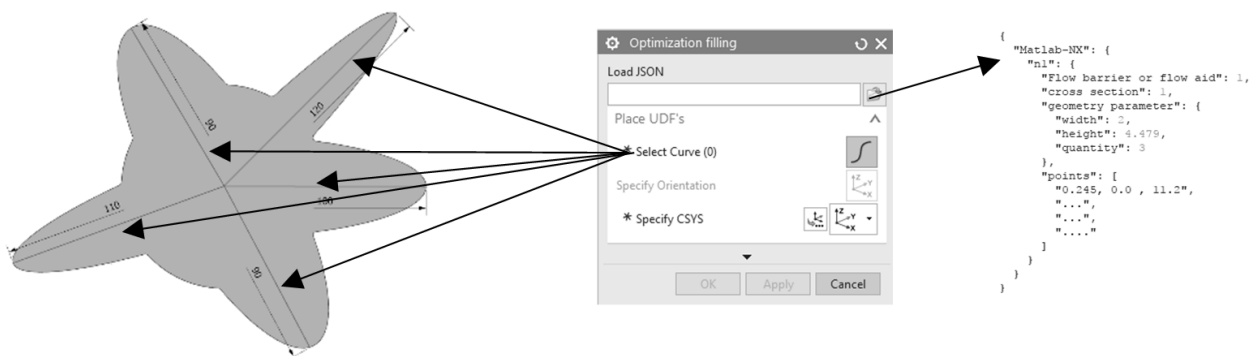


Abbildung 5-25: Rückführung der Geometrie aus der Simulation

Über ein Feature erfolgt ein Punkteimport. Die Punkte werden automatisch, da in Matlab festgelegt, Fließhilfen oder Barrieren zugeordnet und platziert. In weiteren Optimierungsiterationen werden die Geometrieparameter der Fließhilfen und Barrieren angepasst.

5.9 Validierung des Projekts

Im Folgenden wird die entwickelte Modellierungsmethodik überprüft und validiert. Dazu wurde für ein Beispielbauteil eine konventionelle und eine wissensbasierte Vorgehensweise zur Modellerstellung überprüft. Bei der Modellerstellung wurde die Zeit überwacht, welcher der Konstrukteur für die einzelnen Schritte, wie z. B. die Recherche zur Gestaltung und die Schritte zur Geometrierstellung, benötigt, dies dann jeweils für ein Feature selbst und das gesamte Bauteil. Die Abbildung 5-26 zeigt u. a. das Beispielbauteil „Kabeldose“. Das Material

war an dieser Stelle schon vorgegeben. Die Modellierung des Bauteils kann in die folgenden vier Schritte aufgeteilt werden:

- Grundkörpermodellierung
- Rippenkonstruktion
- Winkelstück
- Formschräge

Bei der reinen Grundkörpermodellierung war eine Zeitersparnis kaum messbar (2 %), da hier die wissensbasierte kaum von der konventionellen Modellierung abweicht. Im zweiten Schritt, der Modellierung der Rippen war der zeitlich größte Abstand messbar. In Abbildung 5-26 sind ebenfalls die einzelnen Schritte der konventionellen Konstruktion aufgegliedert, welche einem zusammengefassten Schritt bei der wissensbasierten Konstruktion entsprechen. Weiterhin sind in einem Balkendiagramm die zeitlichen Abstände festgehalten. Im Falle des spritzgussgerechten Rippenfeature wurde eine ungefähre Zeitersparnis von ca. 90 % gemessen.

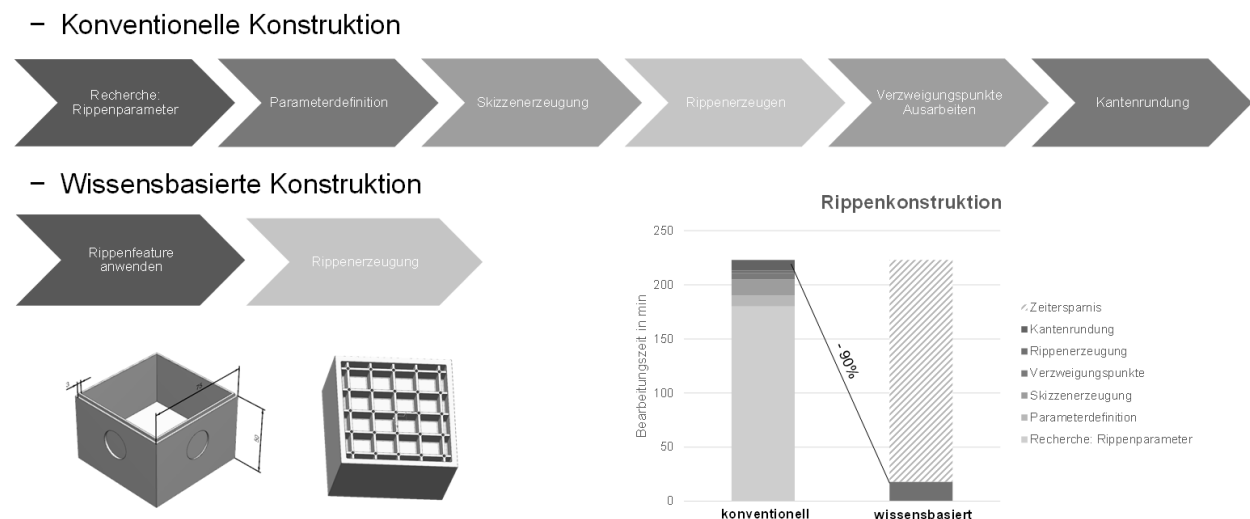


Abbildung 5-26: Validierung Rippenfeature an Bauteil „Kabeldose“

Bei der Erstellung der Winkelstücke (nicht sichtbar) und der Formschrägen beträgt die Zeitersparnis 82 % und 92 % Prozent. Die gesamte Zeitersparnis bei der wissensbasierten Konstruktion betrug 78,3 %, vgl. Abbildung 5-27.

Ein großer Vorteil der wissensbasierten Modellierungstrategie ist die Erzeugung parametrisierter Modelle, welche anpassbar, da regenerierungsfähig, sind. Weiterhin muss der Konstrukteur sich nicht erst spezifisches Wissen durch Recherchen usw. aneignen.

Das Beispielbauteil „Kabeldose“ konnte, bis auf den Grundkörper, mit den neu erstellten und standardisierten Konstruktionsfeature modelliert werden. Eine individuellere Gestaltung ist durch spritzgerechte Analysefeature abgesichert. Allerdings darf abgeschätzt werden, dass

die Zeitersparnis bei der Modellierung dann zwar nicht mehr in diesem Maße, aber definitiv vorhanden wäre.

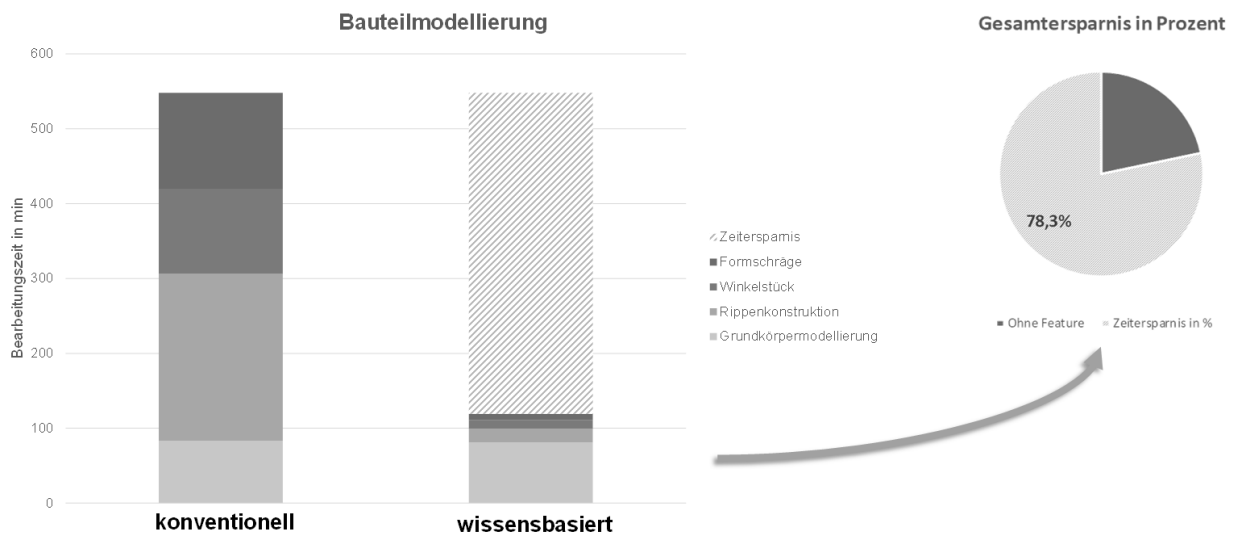


Abbildung 5-27: Validierung Bauteil „Kabeldose“

5.10 Zwischenfazit

Die Anwendung, der in Kapitel 3 entwickelten Methode, wurde an einem aktuellen Forschungsprojekt gezeigt. Dabei wurde die gesamte methodische Unterstützung des Konstrukteurs als neutrales System entwickelt und daraufhin in das CAD-System Siemens NX implementiert. Bei der Implementierung wurden verschiedene KBE-Techniken, welche Inhalt des Kapitels 4 waren, angewendet. Der Nutzen für den Konstrukteur wurde im Rahmen einer Validierung verdeutlicht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit hat eine methodische Vorgehensweise zur Entwicklung von KBE-Systemen mit dem Fokus auf die Prozesskette Konstruktion und Simulation vorgestellt. Neben den beiden Schritten, der Entwicklung der Wissensbasis und der Implementierung ins CAD-System, wurde der Schwerpunkt auf die (neutrale) Systementwicklung gelegt. Die vorgestellten Methoden unterstützen den Systementwickler, insbesondere im Bereich der Formalisierung und Implementierung. Die implementierten Systeme unterstützen den Konstrukteur bei der Durchführung von fortgeschrittenen Simulationen und führen zu einer qualitativen Absicherung und Optimierung des Konstruktions- und Berechnungsprozesses.

Bei der Erstellung der Wissensbasis war ein Teilziel eine direkte Identifizierung expliziter Lösungsvorschläge. Zur Aufbereitung und Transformation expliziten Wissens wird eine angepasste FMEA verwendet. Eine empfohlene Maßnahme der FMEA entspricht einem ersten expliziten Lösungsvorschlag. Implizites Wissen wird über Datenanalyse-Techniken aufbereitet.

Auf Grundlage der Wissensbasis wird ein Systemmodell erzeugt. Durch den gewählten modellbasierten Ansatz ist ein transparenter Entwicklungsprozess durch eine Einbeziehung verschiedener Experten bei der Systementwicklung gewährleistet. Erst nach vollständiger Formalisierung des Systemmodells beginnt die Phase der Implementierung. Die MBSE erlaubt die Definition spezifischer Sichten auf das Modell und eine Formalisierung auf unterschiedlichen Ebenen, wie die Definition von Funktionen, Anforderungen, Strukturen, Abläufen, usw.

Die dritte Stufe befasst sich mit der Implementierung. Diese beinhaltet zum einen eine Einteilung und Klassifizierung diverser KBE-Techniken und zum anderen Techniken zur Verknüpfungen des CAD-System mit einer Wissens- und Datenbasis. Daraufhin wurde ein Schwerpunkt auf die Ableitung einer spezifischen KBE-Technik aus dem Systemmodell gelegt. Dies ist gerade von Bedeutung, ob die Implementierung durch den Konstrukteur selbst oder durch einen Programmierer mit methodischer Unterstützung durch den Konstrukteur vorgenommen werden kann. Ein Beispiel dazu ist die Umsetzung über ein UDF oder ein Konstruktionsfeature, welches über eine systemspezifische API neu programmiert werden muss. Dazu wurden in einem gesonderten Kapitel eine Vielzahl von praktischen Beispielen, welche im Rahmen von Forschungsprojekten und unter Einbindung studentischer Abschlussarbeiten entwickelt wurden, präsentiert. Die Beispiele umfassen dabei zum einen

eine direkte Betrachtungsweise von simulationsgerechten Analyse- und Konstruktionsfeatures und Komponenten und zum anderen statische Analysen und Optimierungsstudien als Ganzes. Dabei wurden erstere in unterschiedliche Kategorien, u. a. nach ihrer Funktionsweise, eingeteilt. Die Beispiele zur statischen Analyse gliedern sich in die drei Schritte des Berechnungsprozesses (Preprocessing, Processing und Postprocessing). Die der Optimierungsstudien orientieren sich dagegen nach dem Grad der Kopplung (interne Kopplung, Kopplung mit analytischen Berechnungen und Kopplung mit externen Simulationsumgebungen).

Weiterhin wurde die entwickelte Methode an einem Forschungsprojekt erfolgreich angewendet und validiert. In dem Projekt „Wissensbasierte Produktplanung und Konstruktion spritzgegossener Formteile“ wurde ein ganzheitliches Unterstützungssystem, von der Materialauswahl, über die Modellierung bis zur rheologischen Optimierung, mittels MBSE-Techniken definiert. Darauf folgte eine prototypische Implementierung in einen Softwareverbund. Durch die wissensbasierte Konstruktion konnte gegenüber der konventionellen Konstruktion der zeitliche Aufwand bei der Bauteilauslegung reduziert wie auch die Prozessqualität erhöht werden.

Die vorgestellte Methode bietet an verschiedenen Stellen das Potenzial zur Weiterentwicklung wie auch zur Verallgemeinerung. Es kann versucht werden, die Schnittstellen zwischen den drei Stufen der Vorgehensweise informationstechnisch zu verknüpfen. Dabei muss untersucht werden, inwieweit sich aus dem aufbereiteten Wissen in der Wissensbasis Funktionen, Strukturen oder Anforderungen bei der Systementwicklung ableiten und übertragen lassen. Denkbar ist an dieser Stelle die Entwicklung einer Software mit der die angepasste FMEA durchgeführt werden kann. Durch Selektieren und Verknüpfen der Tabellenfelder durch den Anwender werden dann z. B. Workflows oder Anforderungen definiert, welche ins Systemmodell in Form erster Diagramme übertragen werden.

Bei der Schnittstelle der Systementwicklung und der Implementierung muss untersucht werden, wie aus dem Systemmodell KBE-Techniken abgeleitet und angewendet werden können. Eine Möglichkeit ist die Definition von vorgefertigten Bausteinen schon im System selbst, welche bei der Implementierung auf eine bestimmte Art von KBE-Technik hinweisen. Auch könnte versucht werden, eine Struktur des KBE-Systems direkt abzuleiten. Als Beispiel können im Systemmodell definierten Blockdefinitionsdiagramme genannt werden. Mittels diesen lässt sich die Struktur in die Programmierumgebung übertragen.

Allgemein lässt sich der Fokus der entwickelten Methodik anders setzen. Neben der Prozesskette Konstruktion-Simulation können andere Prozesse mit in die Betrachtung eingeschlossen werden. Eine Verallgemeinerung der Methodik ist möglich.

Einer der Schwerpunkte dieser Arbeit war die Übertragung des Systemmodells auf KBE-Techniken. Weniger stark betrachtet und einbezogen wurden die Übertragung des Systemmodells aufpassende Techniken zur Wissensbereitstellung im CAD- und CAE-System. Dies gilt gerade in Bezug auf neue Techniken im Bereich der Webtechnologien, Big Data oder der künstlichen Intelligenz.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Informationsgehalt des Produktmodells (nach [An10])	6
Abbildung 2-2: Frontloading im Entwicklungsprozess (nach [SzBe07])	7
Abbildung 2-3: Ansatz für eine eigenschaftsbasierte Erfassung des Produktreifegrades (nach [StGr+09])	8
Abbildung 2-4: Systematischer Planungsansatz im CAE (nach [Pa12])	10
Abbildung 2-5: Konstruktionsmethodik nach VDI-Richtlinie 2221 mit integrierter Nutzerinteraktion (nach [PaFe+13], [BoFr+16])	11
Abbildung 2-6: Arten von Volumenmodellen (nach [Lu09], [De04])	13
Abbildung 2-7: ABC-Konzept (nach [VDI2211])	18
Abbildung 2-8: Integration von Berechnungsverfahren (nach [VDI2211])	19
Abbildung 2-9: Höherwertige Konstruktionsobjekte (nach [Ke14])	22
Abbildung 2-10: Externe und interne Simulation (nach [Kl15a])	23
Abbildung 2-11: Modell eines technischen Systems (nach [PaFe+13], [VDI2221])	32
Abbildung 2-12: Verschiedene Diagrammtypen in SysML (nach [Al12], [WeSo14])	35
Abbildung 2-13: MBE-Sichten auf das Systemmodell (nach [KaAd+16])	36
Abbildung 2-14: Verknüpfung der Grundbegriffe des Wissensmanagements (i. A. a., [No11], [Ke14])	37
Abbildung 2-15: Phasenmodell eines KBE-Projekts (nach [VDI5610-2])	38
Abbildung 2-16: Beispielhafte Architektur eines wissensbasierten Systems (i. A. a., [Lu09])	40
Abbildung 2-17: Verknüpfung über Webservice (nach [MaHu+16])	43
Abbildung 3-1: Sichten auf Druckbehälterauslegung	46
Abbildung 3-2: Schmalseiteneinheit (nach [Kl15b])	48
Abbildung 3-3: Allgemeine und spezifische Anforderungen an die Methode	51
Abbildung 3-4: systemtechnischer Ansatz zur KBE-Methodenentwicklung	53
Abbildung 3-5: Gemeinsame Definition des Systemmodells	56
Abbildung 3-6: Komplexität der Implementierung	58
Abbildung 3-7: Wertigkeit der Absicherung	59
Abbildung 3-8: Paketdiagramm Schmalseiteneinheit	64
Abbildung 3-9: Blockdefinitionsdiagramm der Schmalseiteneinheit	64
Abbildung 3-10: Aktivitätsdiagramm der Schmalseiteneinheit	65
Abbildung 3-11: Erweitertes Aktivitätsdiagramm der Schmalseiteneinheit	65
Abbildung 3-12: Anwenderprogramm externe Temperaturübertragung Creo Simulate	66
Abbildung 4-1: Aktivitätsdiagramm der Spannungskonzentration	70
Abbildung 4-2: Implementierung der Spannungskonzentration (nach [Da16])	71
Abbildung 4-3: Aktivitätsdiagramm des Symmetriefeature	72
Abbildung 4-4: Implementierung des Symmetriefeatures (nach [Ma16])	72
Abbildung 4-5: Aktivitätsdiagramm der Kopplung PMIs mit Randbedingungen	76
Abbildung 4-6: Implementierung der Kopplung PMI mit Randbedingung (nach [Ma16])	76
Abbildung 4-7: Simulationsgerechte Komponenten	77
Abbildung 4-8: Blockdefinitionsdiagramm der Einbindung des Wälzlagers	78
Abbildung 4-9: Aktivitätsdiagramm der Platzierung des Wälzlagers	79
Abbildung 4-10: Implementierung der Wälzlager (nach [Na14])	79
Abbildung 4-11: Aktivitätsdiagramm der Schraubenauswahl	80
Abbildung 4-12: Implementierung der Schraubenauswahl (u. a. nach [So14])	81
Abbildung 4-13: Aktivitätsdiagramm der Flanschverbindung	82
Abbildung 4-14: Implementierung der Flanschverbindung (nach [Lo16])	83

Abbildung 4-15: Blockdefinitionsdiagramm „Elastomerkupplung“	84
Abbildung 4-16: Aktivitätsdiagramm „Elastomer Kupplung“	85
Abbildung 4-17: geplante Verknüpfung Matlab-Abaqus	85
Abbildung 4-18: Anwenderprogramm zur Lebensdauerabschätzung bei Elastomerkupplungen.....	86
Abbildung 4-19: Abstandsmessung in der V-Rinne.....	88
Abbildung 4-20: Aktivitätsdiagramm der Geradheitsmessung.....	88
Abbildung 4-21: Blockdefinitionsdiagramm einer internen Kopplung	89
Abbildung 4-22: Behavioral Modeling von PTC Creo.....	90
Abbildung 4-23: Blockdefinitionsdiagramm der Kopplung mit analytischer Berechnung.....	91
Abbildung 4-24: Aktivitätsdiagramm der Optimierung einer Flanschverbindung	91
Abbildung 4-25: Ergebnis der Optimierung der Flanschverbindung (nach [He17]).....	92
Abbildung 5-1: Projektaufbau	95
Abbildung 5-2: Paketdiagramm Projekt	96
Abbildung 5-3: Anwendungsfalldiagramm des Unterstützungssystems „Spritzguss“	97
Abbildung 5-4: Paketdiagramme der Zuweisungen Module 1 und 2	98
Abbildung 5-5: Blockdefinitionsdiagramm des Unterstützungssystems „Spritzguss“	99
Abbildung 5-6: Anforderungsdiagramm des Projekts.....	99
Abbildung 5-7: internes Blockdefinitionsdiagramm der Kommunikation des Softwareverbundes	100
Abbildung 5-8: Aktivitätsdiagramm der Material und Verfahrensauswahl	101
Abbildung 5-9: Blockdefinitionsdiagramm der konstruktive Anforderungen	102
Abbildung 5-10: Anforderungsdiagramm der konstruktiven Anforderungen.....	103
Abbildung 5-11: Aktivitätsdiagramm des Filmgelenks.....	103
Abbildung 5-12: Blockdefinitionsdiagramm der Featurekategorien.....	104
Abbildung 5-13: Aktivitätsdiagramm der Modellierungstechniken	105
Abbildung 5-14: Aktivitätsdiagramm der Entformungsschräge.....	106
Abbildung 5-15: Aktivitätsdiagramm des Rippenfeature (skizzenbasiert)	107
Abbildung 5-16: Aktivitätsdiagramm der Schwindung	108
Abbildung 5-17: Aktivitätsdiagramm der Toleranzen.....	108
Abbildung 5-18: Aktivitätsdiagramm des Netzexports.....	109
Abbildung 5-19: Aktivitätsdiagramm der Geometrierückführung	110
Abbildung 5-20: Ribboninterface „Spritzgussgerechte Konstruktion“	111
Abbildung 5-21: Implementierung der Materialauswahl	112
Abbildung 5-22: Einbindung konstruktiver Anforderung“	112
Abbildung 5-23: Implementierte Konstruktionsfeature in NX (nach [Ue16]).....	113
Abbildung 5-24: Implementierung der Vernetzung und Simulationsvorbereitung.....	114
Abbildung 5-25: Rückführung der Geometrie aus der Simulation.....	114
Abbildung 5-26: Validierung Rippenfeature an Bauteil „Kabeldose“	115
Abbildung 5-27: Validierung Bauteil „Kabeldose“	116

Literaturverzeichnis

- [Ab05] Abramovici, M.: Rechnerintegrierte Produktentwicklung. Skript zur Vorlesung, Bochum, 2005.
- [Al12] Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2012.
- [An06] Anderl, R.: Produktdatentechnologie A. CAD-Systeme und CAx-Prozessketten. Skript zur Vorlesung., Darmstadt, 2006.
- [An10] Anderl, R.: Grundlagen des CAE/CAD. Skript zur Vorlesung, Darmstadt, 2010.
- [ArBa+93] Arabshahi, S.; Barton, D. C.; Shaw, N. K.: Steps towards CAD-FEA integration. In *Engineering with Computers*, 1993, 1; S. 17–26.
- [Be11] Bergenthal, J.: Final Report Model Based Engineering (MBE), 2011.
- [BeMü99] Beisheim, N.; Müller, N.: Die Anwendung der Feature-Technologie im Konstruktions-Informationssystem. In *IMW-Institutsmitteilung*, 1999.
- [BoFr+16] Boese, A. et al.: Nutzerintegration bei der Produktentwicklung am Beispiel der Medizintechnik. In (Stelzer, R. Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben 2016 - Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*. Dresden, 30. Juni - 1. Juli 2016. TUDpress, Dresden, 2016.
- [BoGr+10] Boy, J.; Grau, M.; Trautmann, T.: Management und interdisziplinäre Integration von CAE Daten. In *NAFEMS Magazin*, 2010, 1; S. 46–58.
- [BoKa14] Bodendorf, F.; Kaiser, C.: Case Based Reasoning. In *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik, Online Lexikon*, 2014.
- [BöLi+12] Böhme, C.; Lieberwirth, C.; Brökel, K.: Konzept zum Parameterraustausch zwischen unterschiedlichen CAD/CAE-Plattformen. In *Tagungsband 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*, 2012; S. 655–663.
- [BoSh+14] Boussuge, F. et al.: Template-based Geometric Transformations of a Functionally Enriched DMU into FE Assembly Models. In *Computer-Aided Design and Applications*, 2014, 11; S. 436–449.
- [Br09] Brandstätter, M. F.: Kompatibilitätsmodellierung im Systems-Engineering Umfeld. Dissertation, 2009.
- [Br11] Brinkmann, T.: *Handbuch Produktentwicklung mit Kunststoffen*. Hanser, München, 2011.
- [Bu96] Bugow, R.: Die Bereitstellung von Teilebibliotheken im rechnerunterstützten Konstruktionsprozess. Dissertation. Beuth, Berlin, 1996.
- [Ch07] Chahrour, R.: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2006. Kassel Univ. Press, Kassel, 2007.
- [CiJa14] Ciomber, I.; Jakel, R.: Systematische Berechnung und Vergleich spannungsminimaler Kerbkonturen mittels Creo Simulate. In (Berger, M. Hrsg.): *SAXSIM 2014: Saxon Simulation Meeting - 6. Simulationsanwendertreffen*. Universitätsverlag Chemnitz, Chemnitz, 2014.
- [Co10] Conrad, K.-J.: *Grundlagen der Konstruktionslehre*. Hanser, München, 2010.

- [CoPe+06] Compton, P. et al.: Experience with Ripple-Down Rules. In Knowledge-Based Systems, 2006, 19; S. 356–362.
- [CuVe+10] Curran, R. et al.: A multidisciplinary implementation methodology for knowledge based engineering: KNOMAD. In Expert Systems with Applications, 2010, 37; S. 7336–7350.
- [DaLu+08] Danjou, S.; Lupa, N.; Koehler, P.: Approach for Automated Product Modeling Using Knowledge-Based Design Features. In Computer-Aided Design and Applications, 2008, 5; S. 622–629.
- [De02] Deutsche Forschungsgemeinschaft: SPP 732: Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse. <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5466022>.
- [De04] Denkena, B.: CAx-Anwendungen in der Produktion. Skript zur Vorlesung, Hannover, 2004.
- [De17] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz: Case-Based Reasoning. <https://www.dfki.de/web/kompetenz/ccabr>.
- [DeBr+07] Deng, Y.-M. et al.: Feature-based CAD-CAE integration model for injection-moulded product design. In International Journal of Production Research, 2007.
- [DGQ13-11] DGQ 13-11: FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [Di07] Dittmann, L. U.: OntoFMEA: ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Dissertation. DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 2007.
- [DIN13445] DIN-EN 13445: Unbefeuerte Druckbehälter. Beuth, Berlin, 2017.
- [DIN60812] DIN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen. Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [DIN71] DIN-EN 71: Sicherheit von Spielzeug - Teil 1: Mechanische und physikalische Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [DIN9000] DIN-EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [Du05] Duddeck, F.: Multidisziplinäre Optimierung im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie. In 2. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage, 2005.
- [Du08a] Dungs, S.: Wissensbasierte Geometriemodelle zur Strukturanalyse. Dissertation. Shaker, Aachen, 2008.
- [Du08b] Duddeck, F.: Multidisciplinary optimization of car bodies. In Structural and Multidisciplinary Optimization, 2008, 35; S. 375–389.
- [Dy02] Dyla, A.: Modell einer durchgängig rechnerbasierten Produktentwicklung. Dissertation, München, 2002.
- [Eh07] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren. Hanser, München, 2007.
- [EhKi+14] Ehrlenspiel, K. et al.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [EhMe13] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser, München, 2013.

- [EiRo+14] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [EiSt09] Eigner, M.; Stelzer, R. Hrsg.: Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2009.
- [EsLl11] Estrada, G.; Lloveras, J.: Application of MOKA Methodology to capture Knowledge in Design for Pokayoke Assembly. In International Conference on Engineering Design, ICED 11, 2011.
- [FaRo10] Fachbach, B.; Rosenberger M.: Herausforderungen bei der Implementierung von Simulationsdatenmanagement (SDM) in komplexen Entwicklungsumgebungen. In NAFEMS Magazin, 2010, 1; S. 26–38.
- [Fi16] Fiebig, S.: Form- und Topologieoptimierung mittels Evolutionärer Algorithmen und heuristischer Strategien. Dissertation, 2016.
- [GoDa] Gonzalez, A. J.; Dankel, D. D.: Engineering of knowledge-based systems.
- [GrAb16] Grundel, M.; Abbulawi, J.: SkiPo – Ein skizzen- und portbasiertes Modell für die Entwicklung von mechanischen Systemen. In (Stelzer, R. Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2016 - Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Dresden, 30. Juni - 1. Juli 2016. TUDpress, Dresden, 2016.
- [Ha07] Harzheim, L.: Strukturoptimierung. Deutsch, Frankfurt, 2007.
- [Ha16] Hagenreiner, T.: Ansätze zur Effizienzsteigerung und impliziten Wissensvermittlung in der Konzeptphase der virtuellen Entwicklung von Serienprodukten. Dissertation. Dr. Hut, Duisburg, 2016.
- [Ho02] Hoffmann, R.: Integration höherwertiger Feature-Elemente in den rechnergestützten Konstruktionsprozeß. Dissertation. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [Ho15] Hooshmand, Y.: Transparenzerhöhung bei der Entwicklung von individualisierten Produkten in der Einzelfertigung. Dissertation. Dr. Hut, München, 2015.
- [Hu16] Humpa, M.: CAD-Methodik zur Produktivitätssteigerung in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung. Dissertation, Duisburg, 2016.
- [Ju13] Jung, D.: Adaptive Relaxation zur Stabilisierung und Beschleunigung partitionierter Multiphysiksimulationen. Dissertation, 2013.
- [Ka13] Kaiser, L.: Modellierungssprachen, Methoden und Werkzeuge für das Model-based Systems Engineering, Mannheim, 2013.
- [KaAd+16] Kaufmann, U. et al.: 10 theses about MBSE and PLM. Position Paper, München, 2016.
- [Ke14] Kesselmans, C.: Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse. Dissertation. Cuvillier; Cuvillier Verlag, Göttingen, 2014.
- [KeKö13] Kesselmans, C.; Köhler, P.: Komponentenübergreifende Abhängigkeiten in Gestaltungs- und Berechnungsprozessen. In Konstruktion, 2013; S. 87–90.

- [KeWa16] Kestel, P.; Wartzack, S.: Wissensbasierter Aufbau konstruktions-begleitender Finite-Elemente-Analysen durch ein FEA-Assistenzsystem. In (Stelzer, R. Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2016 - Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Dresden, 30. Juni - 1. Juli 2016. TUDpress, Dresden, 2016; S. 315–329.
- [KiKa+] Kipping, A.; Katzenschwanz, C.; Gooris, E.: Multidisziplinäre Optimierung von Fahrwerksbauteilen: DVM-Tag 2008.
- [Kl15a] Klemme, U.: Methoden zum wissensbasierten Aufbau simulationsorientierter Produktmodelle. Vortrag zur Dissertation, Duisburg, 2015.
- [Kl15b] Klemme, U.: Methoden zum wissensbasierten Aufbau simulationsorientierter Produktmodelle. Dissertation. Cuvillier, Göttingen, 2015.
- [KlKö12] Klemme, U.; Köhler, P.: A Hybrid Redesign Strategy to Derive Load-Adaptive Parts. In Computer-Aided Design and Applications, 2012, 9; S. 665–677.
- [Kö02] Köhler, P.: Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau. Vogel, Würzburg, 2002.
- [Kö16] Köhler, P.: CAD-Praktikum für den Maschinen- und Anlagenbau mit PTC Creo. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [Kö17] Köhler, P.: Informationstechniken zur Wissensintegration in Engineering-Prozesse. Vorlesung, 2017.
- [Kr07] Krastel, M.: Integration of Simulation and Computation in a PDM Environment (SimPDM), 2007.
- [KrGa+07] Kranke, H.-J.; Gausemeier, J.; Krause, F.-L.: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. Hanser, München, 2007.
- [La12] La Rocca, G.: Knowledge Based Engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. In Advanced Engineering Informatics, 2012; S. 159–179.
- [Le05] Lee, S. H.: A CAD–CAE integration approach using feature-based multi-resolution and multi-abstraction modelling techniques. In Computer-Aided Design, 2005, 37; S. 941–955.
- [Li16] Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung. Hanser, München, 2016.
- [Lo16] Loibl, A.: Ansätze für eine wissensbasierte Auslegung von Schraubverbindungen in konstruktionsbegleitenden Simulationen. Masterarbeit, Duisburg, 2016.
- [Lu09] Lupa, N.: Einsatz wissensbasierter Features für die automatische Konfiguration von Produktkomponenten. Dissertation. Cuvillier, Göttingen, 2009.
- [Lu11] Lutz, C.: Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte, 2011.
- [Ma15] Martha, A.: Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung. Dissertation, Duisburg, 2015.
- [MaBe05] Mattheck, C.; Bethge, K.: Zur Plausibilität der Methode der Zugdreiecke. In Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2005, 36.

- [MaHu+16] Manoharan, T.; Humpa, M.; Martha, A.: Knowledge integration in CAD-CAM process chain. In Computer-Aided Design and Applications, 2016, 13; S. 729–736.
- [Me99] Mertens, H.: DFG-Schwerpunktprogramm "Innovative, rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse – Integration von Gestaltung und Berechnung". In (VDI Hrsg.): Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung. VDI-Verlag, 1999.
- [Mi06] Mirkheshti, R.: Zur Entwicklung von Berechnungsmethoden und deren Integration in den Produktentwicklungsprozess. Dissertation, 2006.
- [No11] North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2011.
- [Pa12] Passek, T.: Qualitätsmanagement im Umfeld des Computer Aided Engineering. Qualitätssicherung von Berechnung und numerischer Simulation zur Auslegung und Absicherung funktionaler Karosserieeigenschaften am Beispiel des Fußgängerschutzes. Dissertation. VDI-Verl., Düsseldorf, 2012.
- [PaFe+13] Pahl, G.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz: Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [PäTr+12] Pährisch, M.; Triebel, M.; Schlenkrich, M.: Simulationsdatenmanagement komplett: Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau 2012. 16. Kongress SIMVEC ; Baden-Baden, 20. und 21. November 2012. VDI-Verl., Düsseldorf, 2012; S. 759–770.
- [Pf17] Pfenning, Michael, Roth, Arnold: Systemmodellierung für das Internet der Dinge – Transformation von Systemmodell in IoT-Plattform im Kontext später Produktlebenszyklusphasen. In (Schulze, S.-O. et al. Hrsg.): Tag des Systems Engineering, Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016. Hanser, München, 2017; S. 353–364.
- [Pr08] SimPDM - Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM-Umgebung, 2008.
- [Pr12] Simulation Data Management in Integrated Collaborative CAD / CAE Process Chains, 2012.
- [PrRa+12] Probst, G. J. B.; Raub, S. P.; Romhardt, K.: Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2012.
- [Ro95] Roller, D.: CAD. Effiziente Anpassungs- und Variantenkonstruktion. Dissertation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [Ru91] Ruf, T.: Featurebasierte Integration von CAD/CAM-Systemen. Dissertation. Springer, Berlin, Heidelberg, 1991.
- [Sc93] Schreiber, G.: KADS. A principled approach to knowledge-based system development. Acad. Press, London, 1993.
- [Se94] Sandler, U.: 3D-CAD. Die Produktivität der neuen Systemgeneration. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994.

- [SeWa11] Sendler, U.; Wawer, V.: Von PDM zu PLM. Prozessoptimierung durch Integration. Hanser, München, 2011.
- [SiNo12] Sindelar, R.; Novak, P.: Simulation Integration Framework. In *Industrial Informatics (INDIN)*, 2012, 10; S. 80–85.
- [Sk07] Skarka, W.: Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA. In *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2007, 20; S. 677–690.
- [SmBr09] Smit, M. S.; Bronsvort, W. F.: Integration of Design and Analysis Models. In *Computer-Aided Design and Applications*, 2009, 6; S. 795–808.
- [Sp12] Spitz, M.: Modellbasierte Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomerbauteile. Dissertation, Duisburg, 2012.
- [Sp17] Springer Gaber: Gaber Wirtschaftslexikon. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/wissensbasiertes-system.html>.
- [Sp98] Speck, H.-J.: Methode zur entwicklungsbegleitenden Ergebnisdokumentation bei der Produktdatenmodellentwicklung. Dissertation. Shaker, Aachen, 1998.
- [SpKr97] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. Hanser, München, 1997.
- [St01] Stokes, M.: Managing engineering knowledge. MOKA: methodology for knowledge based engineering applications. Professional Engineering Publishing, London, 2001.
- [St06] Strohmeier, O.: Integration von Wissensmodulen in den virtuellen Produktentwicklungsprozess. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006.
- [St07] Stekolschik, A.: Ein Beitrag zum ganzheitlichen Qualitätsmanagement von CAD-Modellen in der Produktentstehung. Dissertation. Shaker, Aachen, 2007.
- [St08] Steinbichler, G.: Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung. Dissertation, 2008.
- [StGr+09] Stöber, C. et al.: Herausforderung Design for X (DfX). In (Meerkamm, H. Hrsg.): 20th Symposium Design for X. 20. Symposium Neukirchen 2009, 24. September 2009. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen, 2009.
- [StJo14] Stark, R.; Jochem, Roland, Lünemann, Pascal, Schober, Johannes: Risikoidentifizierung zur proaktiven Qualitätsabsicherung in der Virtuellen Produktentstehung. In (Stelzer, R. Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2014. Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Dresden, 26. - 27. Juni 2014. TUDpress, Dresden, 2014.
- [SzBe07] Szeghő, K.; Bercsey, T.: Kosten- und Risikomanagement in der frühen Phase der Produktentwicklung. In (Meerkamm, H. Hrsg.): 18. Symposium Design for X. 18. Symposium, Neukirchen 2007, 11. und 12. Oktober 2007. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen, 2007.
- [Te15] Te Hesens, O.: Ganzheitlicher Ansatz zur Dimensionierung und Optimierung von Extrusionswerkzeugen am Beispiel von Wendelverteiltern. Dissertation, 2015.
- [TiDe+11] Tietjen, T.; Decker, A.; Müller, D. H.: FMEA Praxis. Das Komplettpaket für Training und Anwendung. Hanser, München, 2011.

- [VaBl+09] Vajna, S. et al.: CAx für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [VDI2209] VDI-Richtlinie 2209: 3D-Produktmodellierung. Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [VDI2211] VDI-Richtlinie 2211: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Berechnungen in der Konstruktion. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [VDI2218] VDI-Richtlinie 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [VDI2221] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [VDI2230-2] VDI 2230-2: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Mehrschraubenverbindungen. Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [VDI2249] VDI-Richtlinie 2249: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - CAD-Benutzungsfunktionen. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [VDI5610-1] VDI 5610-1: Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [VDI5610-2] VDI 5610-2: Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Wissensbasierte Konstruktion (KBE). Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [WaRo+17] Walden, D. D.; Roedler, G. J.; Forsberg, K.: INCOSE systems engineering handbuch. Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-Prozesse und -Aktivitäten. GfSE, München, 2017.
- [WeSo14] Weilkiens, T.; Soley, R. M.: Systems Engineering mit SysML/UML. Anforderungen, Analyse, Architektur. dpunkt.verl., Heidelberg, 2014.
- [ZhSi+14] Zhang, P. et al.: Multi-Objective Tradeoffs in the Design Optimization of a Brushless Permanent-Magnet Machine With Fractional-Slot Concentrated Windings. In IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 2014, 50.

Unveröffentlichte Publikationen am Institut für Produkt Engineering

- [Da16] Dagdeviren, A.: Ansätze für eine wissensbasierte Unterstützung des Konstrukteurs am Beispiel des spritzgussgerechten Bauteilentwurfs. Bachelorarbeit, Duisburg, 2016.
- [He17] Heinrich, K.: Ansätze für eine Optimierung von Flanschverbindungen in konstruktionsbegleitenden Simulationen. Masterarbeit, Duisburg, 2017.
- [Lo16] Loibl, A.: Ansätze für eine wissensbasierte Auslegung von Schraubverbindungen in konstruktionsbegleitenden Simulationen. Masterarbeit, Duisburg, 2016.
- [Ma16] Mai, T.: Ansätze für eine wissensbasierte Unterstützung bei konstruktionsbegleitenden Simulationen. Masterarbeit, Duisburg, 2016.
- [Na14] Nagraszus, T.: Konfiguration numerischer Simulationsmodelle durch Pro/Toolkit. Masterarbeit, Duisburg, 2014.
- [So14] Song, Y.: Automatische Einbindung von idealisierten Komponenten bei konstruktionsbegleitenden Simulationen. Masterarbeit, Duisburg, 2014.
- [Ue16] Uellendahl, M.: Integration von fertigungsspezifischem Wissen in ein CAD-System am Beispiel des spritzgussgerechten Bauteilentwurfs. Masterarbeit, Duisburg, 2016.

Eigene Publikationen

Andrae, R.; Porsch, A.; A. Loibl; Köhler, P.; Wortberg, J.: Knowledge-Based Product Planning and Designing of Injection-molded Parts. In ANTEC 2018: Proceedings of the Plastics Technology Conference, ANTEC 2018, The Plastics Technology Conference, Orlando, USA, 2018.

A. Loibl, Andrae, R.; Köhler, P.: Unterstützung bei der konstruktionsbegleitenden Simulation von Flanschverbindungen. In 10. Saxon Simulation, Chemnitz, 2018, ISBN: 978-3-96100-044-9.

Andrae, R.; Köhler, P.: Knowledge based support for the designer at the interface of CAD/CAE. In Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design: Volume 6: Design Information and Knowledge. ICED 17 - 21st International Conference on Engineering Design, Vancouver, Kanada, 2017, S. 1 – 10. ISBN: 978-1-904670-94-0.

Porsch, A.; Andrae, R.; Köhler, P.; Wortberg, J.: Knowledge-Based Approach for an Automatic Cavity Balancing for Injection Molding. In ANTEC 2017: Proceedings of the Plastics Technology Conference, ANTEC 2017, The Plastics Technology Conference, Anaheim, USA, 2017.

Andrae, R.; Porsch, A.; Köhler, P.; Wortberg, J.: Knowledge-Based Support for the Designer regarding Injection-molded Part Design. In ANTEC 2017: Proceedings of the Plastics Technology Conference, ANTEC 2017, The Plastics Technology Conference, Anaheim, USA, 2017.

Andrae, R.; Köhler, P.: Modellbasierte KBE-Methodenentwicklung im Bereich der konstruktionsbegleitenden Simulation. In 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017: Interdisziplinäre, Duisburg, 2017, S. 223 – 234. ISBN: 978-3-940402-15-8.

Mistler, M.; Andrae, R.; Wortberg, J.; Köhler, P.: Wissensbasierte Absicherung virtueller Lebensdauerprognosen von Elastomerbauteilen. In 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017: Interdisziplinäre Produktentwicklung, 2017, S. 121 – 130, ISBN: 978-3-940402-15-8.

Porsch, A.; Andrae, R.; Wortberg, J.; Köhler, P.: Knowledge based approach for an automatic rheological optimization of injection molded parts. In 32nd International Conference of the Polymer Processing Society, Lyon, Frankreich, 2016.

Andrae, R.; Köhler, P.: Methoden zur Absicherung simulationsgerechter Produktmodelle. In Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016: Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, EEE 2016, Dresden, 2016, S. 403 – 418, ISBN: 978-3-95908-062-0.

Andrae, R.; Köhler, P.: Wissensbasierte Unterstützung des Konstrukteurs an der Schnittstelle CAD-CAE. In 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016: Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion, am 6. und 7. Oktober 2016 in, 2016, S. 59 – 68. ISBN: 978-3-8440-4732-5.

Andrae, R.; Köhler, P.: Simulation-oriented Transformation of CAD Models. In Computer-aided design & applications, Jg. 17, 2016, 3, S. 340 – 347, ISSN: 1686-4360.

Köhler, P.; Andrae, R.; Danjou, S.; Heinemann, A.; Humpa, M.; Hungenberg, P.; Manoharan, T.; Martha, A.: CAD-Praktikum für den Maschinen- und Anlagenbau mit PTC Creo. Köhler, P., (Hrsg.), Wiesbaden, Springer Verlag, 2016, 375 Seiten. ISBN: 978-3-658-15388-5; 978-3-658-15389-2.

Andrae, R.; Köhler, P.: Toleranzmessung und Toleranzauswertung auf Basis virtueller Produktmodelle. In 6. Workshop der Arbeitsgemeinschaft Toleranzmanagement (ATOL), "Toleranzmanagement und -Simulation in der Praxis", 2016.

Andrae, R.; Köhler, P.: Simulation-oriented transformation of CAD models. In Proceedings of CAD'15: International CAD Conference and Exhibition 2015, 2015, S. 225 – 230.

Andrae, R.; Köhler, P.: Challenges associated with teaching CAD/CAE. In Proceedings of CAD'14, 2014: International CAD Conference and Exhibition 2014, 2014, S. 138 – 140.

Andrae, R.; Köhler, P.: Wissensintegration im Simulationsumfeld von Creo Simulate durch Anwendungsprogrammierung. In 6. Saxon Simulation, Chemnitz, 2014, ISBN: 978-3-944640-06-8.

Seidel, R.; Köhler, P.; Ansätze zur konstruktionsbegleitenden Multiphysik-Simulation von Baugruppen. In SAXSIM 2013: Saxon Simulation Meeting - 5. Simulationsanwendertreffen SAXSIM, Chemnitz, 2013.

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

