Christoph Kesselmans

Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse

Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Christoph Kesselmans

aus

Viersen

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing Jörg Feldhusen, RWTH-Aachen

Tag der mündlichen Prüfung: 14.07.2014

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2014
Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2014

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist
es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg
(Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2014
Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-680-5
eISBN 978-3-7369-4680-4

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Rechnereinsatz in der Konstruktion am „Institut für Produktentwicklung“ der Universität Duisburg-Essen. Meinem Doktorvater und Lehrstuhlinhaber, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler, möchte ich an dieser Stelle für die uneingeschränkte Unterstützung danken. Seine freundliche Art ermöglichte es, Gedanken und Ideen offen auszutauschen und sie zu konkreten Ansätzen und Entwicklungen heranreifen zu lassen. Ohne die fachlichen aber ebenso persönlichen Gespräche wäre dies keineswegs möglich gewesen. Danke für Ihr Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen, Inhaber des Lehrstuhls und Institut für allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus der RWTH-Aachen, danke ich für die Übernahme des Korreferates und das damit verbundene Interesse an meiner Arbeit. An Herrn Prof. Dr.-Ing. Conrad Eller, der an der Hochschule Niederrhein das Fachgebiet Mechanik vertritt, richte ich meinen Dank für die außergewöhnlich gute Betreuung während meines Studiums. Die befürwortenden Gespräche haben dazu beigetragen, eine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter anzustreben und können somit als Grundvoraussetzung für diese Arbeit angesehen werden.

Bei meiner Lehrstuhlkollegin Dipl.-Ing. Birte Szöke und meinen Lehrstuhlkollegen Dipl.-Ing. Uwe Klemme, Dipl.-Ing. Alexander Martha, Dipl.-Ing. Marcin Humpa, Thivakar Manoharan M. Sc., Yousef Hooshmand M. Sc. und René Andrae M. Sc. bedanke ich mich für die vielen konstruktiven Diskussionen, die meine Arbeit positiv beeinflusst haben. Aufgrund des überaus freundschaftlichen Verhältnisses entstand ein außergewöhnlich harmonisches Arbeitsklima. Herrn Dipl. Pol-Wiss. Rüdiger Kaulen und Frau Antje Birkholz M. Sc. danke ich für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Für die Vermittlung praktischer Fähigkeiten, die ich als Fundament meines beruflichen Lebenswegs ansehe, bedanke ich mich bei Stefan Schmitz und Lorenz Peters. Angesichts der ununterbrochenen, privaten Unterstützung in jeglicher Hinsicht schulde ich meinem Freund Dipl.-Ing. (FH) Dirk Esser Dank der besonderen Form. Ich bedanke mich bei meinen Eltern, Elisabeth und Peter Kesselmans sowie bei meinen Schwiegereltern, Helma und Peter Kreutzer, für den familiären Rückhalt und die Unterstützung in vielfältiger Hinsicht.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Sabine Kesselmans, die mir auch in schwierigen Situationen durch ihre außergewöhnliche Fähigkeit, Motivation zu schenken, in besonderer Weise zur Seite gestanden hat. Ihr und unseren gemeinsamen Kindern Fabian und Philipp Kesselmans widme ich diese Arbeit.

Viersen im Juli 2014 *Christoph Kesselmans*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN ..... **XI**

TERMINI ..... **XIII**

1 EINLEITUNG **1**

2 GRUNDLAGEN HEUTIGER KONSTRUKTIONSPROZESSE **5**

2.1 Komplexität 5
2.2 Der Konstrukteur und sein Tätigkeitsumfeld 7
2.2.1 Anforderungen an den Konstrukteur 8
2.2.2 Verantwortung im Konstruktionsprozess 10
2.3 Das methodische Konstruieren 10
2.3.1 Produkt- und Funktionsstruktur 12
2.3.2 Konstruktionsarten 13
2.3.3 Konstruktionsphasen 15
2.4 Informationstechnische Hilfsmittel 17
2.4.1 Das integrierte Produktmodell 18
2.4.2 Gestaltmodellierung in CAD-Systemen 21
2.4.2.1 Feature-Technologie 22
2.4.2.2 Unterstützung methodischer und kreativer Schritte 23
2.4.2.3 Parametrik, Konstruktionsabsicht und Produktlogik 26
2.4.2.4 Neutrale Datenformate 28
2.4.3 Berechnungsmodelle und -software 30
2.4.4 Verknüpfung von Gestalt- und Berechnungsmodellen 35
2.4.5 Informationsverarbeitung und Wissensmanagement im Konstruktionsprozess 39

3 ANALYSE AUSGEWÄHLTER KONSTRUKTIONSPROZESSE **49**

3.1 Differenzierung der Konstruktionsprozesse hinsichtlich des Neuheitsgrades 49
3.2 Ausgangspunkte für Konstruktionsprozesse 51
3.2.1 Beispiel für primäre Konstruktionsprozesse 52
3.2.2 Beispiel für sekundäre Konstruktionsprozesse 53
3.3 Entwerfen in sekundären Konstruktionsprozessen 58
3.3.1 Konfigurationssystem Zahnradgetriebe 58
3.3.2 Konfigurationssystem Zahnkupplung 60
3.3.3 Modellkonfiguration und Automatisierung des Konstruktionsprozesses 61
3.3.4 Fazit 64
3.4 Konzipieren und Entwerfen in primären Konstruktionsprozessen 65
3.4.1 Konzipieren in einer Anpassungskonstruktion 65

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.4.2 Konzipieren in einer Neukonstruktion mit disziplinübergreifenden Aspekten ... 67
3.4.3 Fazit ... 72
3.5 Die iterative Lösungssuche in einem primären Konstruktions-prozess ... 73
3.5.1 Bewertungen im Gestalt- und Berechnungsmodell ... 75
3.5.2 Nachführen von Änderungen ... 77
3.5.3 Wechsel eines Funktionsträgers ... 79
3.5.4 Fazit ... 80
3.6 Anforderungen an höherwertige Konstruktionsobjekte ... 80

4 PARAMETRISIERUNG VON GESTALT- UND BERECHNUNGSMODELLEN ... 83

4.1 Informationstechnische Aspekte ... 83
4.1.1 Textdateien zur Modellspeicherung ... 83
4.1.2 Programmierschnittstellen ... 84
4.2 Parameterbasierte Berechnungen in CAD-Prozessen ... 87
4.2.1 Zuordnung von Parametern ... 87
4.2.2 Integrierte Berechnungen ... 88
4.2.2.1 Beziehungseditor als Berechnungssystem ... 88
4.2.2.2 Integrierte Berechnungsmodule ... 89
4.2.3 Gekoppelte Berechnungen ... 89
4.2.3.1 Grundlegende Kopplungsmöglichkeiten im Überblick ... 90
4.2.3.2 Vordefinierte Schnittstellen ... 91
4.2.3.3 Verarbeitung von Ein-und Ausgabedateien ... 93
4.2.3.4 API des Berechnungsprogrammes ... 96
4.3 Richtungsabhängigkeit und Variation von Parametern ... 97
4.3.1 Bidirektionale Kopplung ... 97
4.3.2 Variation von Berechnungsergebnissen ... 99
4.3.3 Integration von Vorauslegungen ... 101
4.4 Wertebereiche der Konstruktionsparameter ... 104
4.5 Berechnungsrelevante Zusammenhänge in Baugruppen ... 109
4.5.1 Ganzheitliche Sichtweise ... 109
4.5.2 Produktlogik ... 111

5 HÖHERWERTIGE KONSTRUKTIONSOBJEKTE ... 113

5.1 Präzisierung der Merkmale ... 113
5.1.1 Wirkungsbereich ... 113
5.1.2 Definition ... 115
5.1.3 Internes Verhalten ... 117
5.1.4 Schnittstelle zu angrenzenden Komponente ... 118
5.1.5 Erzeugung höherwertiger Konstruktionsobjekte ... 120
5.2 Höherwertige Konstruktionsobjekte in der Baugruppen-modellierung ... 121
5.2.1 Einbau eines höherwertigen Konstruktionsobjektes ... 122

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.2.2 Einbaureihenfolge 123
5.2.3 Austausch eines höherwertigen Konstruktionsobjektes 124
5.3 Exemplarische Umsetzung 124
5.3.1 Festlegung der Systemumgebung 125
5.3.2 Konzeption 126
5.3.3 Konzeptumsetzung 128

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 133

ANHANG 137

ABBILDUNGSVERZEICHNIS 141

LITERATURVERZEICHNIS 143

LEBENSLAUF 153

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
API	Application Programming Interface
ActiveX	Active Extension
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
COM	Component Object Model
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
CSP	Constraint Satisfaction Problem
DCOM	Distributed Component Object Model
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
ERP	Enterprise Resource Planning
FEM	Finite Elemente Methode
FKM	Richtlinien des Forschungskuratoriums Maschinenbau
HKO	Höherwertiges Konstruktionsobjekt
i. d. R.	in der Regel
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
JT	Jupiter Tesselation
KBE	Knowledge-Based Engineering
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine- und mittelständische Unternehmen
MEBP	Maschinenelementeberechnungsprogramm
MKS	Mehrkörpersimulation
NC	Numerical Control
OLE	Object Linking and Embedding
OOP	Objektorientierte Programmierung
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	Surface Tesselation Language
U3D	Universal 3D
VB	Visual Basic
vgl.	vergleiche
WWG	Walzwerkgetriebe der Fa. SMS-Meer
XML	Extensible Markup Language
z. B.	zum Beispiel
ZBG	Herstellerbezeichnung der Fa. Siemens Balligzahnkupplungen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Termini

Ausgehend von der Vielzahl der Termini, die sowohl je nach Autor variieren als auch teilweise unterschiedlich aufgefasst werden, dient diese Tabelle der Festlegung der Terminologie, einschließlich der Erläuterungen, wie Begriffe im Kontext dieser Arbeit verstanden werden sollten.

Begriff	Bedeutung / Erläuterung
Abhängigkeit	Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Konstruktionskomponenten, können funktionaler und/oder geometrischer Natur sein. Abhängigkeiten zur Platzierung von Bauteilen in einer Baugruppe sollen als Platzierungsreferenzen verstanden werden.
Auslegung, auslegen	übergreifender Begriff für Dimensionierung und Nachrechnung einer Konstruktionskomponente
Austauschformate	siehe neutrale Formate
Berechnungslogik	Logik im Berechnungsablauf, die festlegt, unter welchen Bedingungen die Berechnungen in welcher Reihenfolge ausgeführt werden; im Bereich der Maschinenelemente in Form eines Ablaufplans definiert und im Berechnungsprogramm hinterlegt
Berechnungsmodell	Modell, bestehend aus Geometrie-, Werkstoff- und Belastungsgrößen
bewerten	Beurteilung hinsichtlich der Eignung und Erfüllung der Gerechtheiten
bidirektional	Informationsübertragung von Modell A nach Modell B ebenso möglich wie von Modell B nach Modell A, Antonym von unidirektional,
Datenstruktur	Schema, Vorschrift oder Spezifikation zur Zusammenfassung, Speicherung und Steuerung der Methodenzugriffe auf Daten, die Modelle repräsentieren
Datentyp	Informationstechnischer Grundbaustein, Spezifikation von Wertebereichen und zulässigen Operationen, z. B. String, Double etc.
Differentialbauweise	Aufgliederung der Funktionen, die von einem Bauteil übernommen werden auf mehrere Bauteile
Dimensionierung	Festlegen der Hauptabmessungen bzw. Bestimmung der groben Parameterwerte einer Konstruktion
entwerfen	Vorgang zur Weiterqualifizierung eines (Lösungs-) Konzeptes, Ergebnis ist der Entwurf
entwickeln	siehe konstruieren
Familientabelle	Möglichkeit zur Abbildung von Varianten eines Konstruktionselementes innerhalb eines CAD-Systems
Festigkeitsnachweis	Bestätigung, dass die endgültige Gestalt des Bauteils den Belastungen gerecht wird
Funktionsstruktur	Verknüpfungsstruktur der Teilfunktionen zur Abbildung der Gesamtfunktion
Geometrie	Äußere (Flächen-)Abgrenzung oder volumenbezogene Ausprägung eines Konstruktionselementes
Gerechtheit	Begriff für Erfüllung spezifischer Anforderungen an die Konstruktion
Gestaltmodell	Modell, bestehend aus Geometrie- und Werkstoffgrößen und der Konstruktionsabsicht, d. h. es beinhaltet geometrische, stoffliche und logische Aspekte

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Begriff	Bedeutung / Erläuterung
Integralbauweise	Zusammenfassung der Funktionen mehrerer Bauteile zu einem Bauteil
Konsistenz	Widerspruchsfreiheit von Modellen
konstruieren	Oberbegriff für das Zusammentragen aller zur Schaffung und zum Betrieb eines technischen Gebildes notwendigen Informationen
Konstruktionsabsicht	Zielvorstellung des Konstrukteurs, welchem Zweck sein Handeln (Bewerten, Gestalten etc.) aus funktionaler Sicht dienen soll. Gedankenschritte, die zu konkreten Festlegungen geführt haben. Hieraus können Regeln und Logik abgeleitet werden.
Konstruktionskomponenten	Oberbegriff für alle in einer Konstruktion vorhandenen Bauteile und Baugruppen; dazu gehören: Normteile, Maschinenelemente, Neuteile, Zulieferkomponenten Wiederholteile etc.
Konzept, konzipieren	Tätigkeit, um eine (abstrakte) Vorstellung über die prinzipielle Funktionsweise einer Konstruktion zu gewinnen. Ergebnis ist die prinzipielle Lösung, das Lösungsprinzip oder Konzept; häufig in Form von groben Skizzen
Maschinenelemente	weitestgehend genormte „Standardbauteile", die wiederkehrend eingesetzt, aber speziell für den konkreten Einsatzzweck in der Konstruktion auszulegen sind
Mastermodell	übergeordnetes Modell eines Produktes, aus dem die für die weiteren Prozessschritte notwendigen Modelle abgeleitet werden; auch das Modell aus dem im Rahmen einer Variantenkonstruktion auftragsspezifische Instanzen abgeleitet werden
natives Datenformat	proprietäres oder dem Softwaresystem zugehöriges Datenformat
neutrales Datenformat	standardisiertes Datenformat für den Datenaustausch zwischen Softwaresystemen
Physikalischer Effekt	physikalisches Phänomen, kausaler Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung
Produkt	Erzeugnis, im Zusammenhang des Maschinenbaus auch Maschine, Konstruktion, Anlage, Apparat etc.
Produktlogik	ganzheitliches, logisches Verhalten aller Komponenten eines Produktes; kann als Oberbegriff für die Summe aller Konstruktionsabsichten verstanden werden
Produktmodell	virtuelle Ansammlung der Produktinformationen (totales Produktmodell bildet die Informationen aller Lebensphasen ab)
Platzierungsreferenz	Verweis auf eine Kante, Fläche etc. zur Ausrichtung und Orientierung von Konstruktionskomponenten innerhalb einer Baugruppe
Semantik	interpretierbare Bedeutung einer Symbolik oder abstrakter Beschreibungen von Zusammenhängen
Strukturmodell	konzeptionelles „Gerüst“ zur Strukturierung von CAD-Modellen
unidirektional	Antonym von bidirektional, Informationsübertragung erfolgt nur von Modell A nach Modell B (nicht umgekehrt)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1 Einleitung

Der steigende Wettbewerbsdruck zwingt die Unternehmen, sämtliche Schritte innerhalb der Wertschöpfungskette stetig effizienter auszuführen und die Produktqualität zu steigern. Hinreichend bekannt sind die Feststellungen, dass während der Konstruktionsphase der Großteil der Produktkosten festgelegt wird und dass die Unternehmenserlöse direkt mit der Produktqualität in Korrelation stehen. Eine entsprechend hohe Aufmerksamkeit ist daher der Erzeugung von Lösungsprinzipien und dem Vergleich von Lösungsalternativen während der konstruktiven Tätigkeit zuzuteilen. Alternative Lösungsvarianten müssen sich schneller und zuverlässiger als bisher miteinander vergleichen lassen, damit in möglichst kurzer Zeit die Auswirkung auf den aktuellen Konstruktionsstand bewertet werden kann. Der Konstrukteur, der maßgeblich die Produktgestalt und damit die Funktionalität eines technischen Produktes vorgibt, steht in hoher Verantwortung gegenüber dem gesamten Unternehmenserfolg. Die heute vom Markt geforderten Produkte vereinigen hoch komplexe Technologien aus verschiedenen Ingenieursdisziplinen. Hieraus ergibt sich, dass die im Konstruktionsumfeld notwendige ganzheitliche Betrachtungsweise mehr denn je als eine Herausforderung anzusehen ist.

Diese Arbeit zeigt auf, mit welchen Problemen der Konstrukteur während des Konstruktionsprozesses konfrontiert wird und liefert einen Beitrag zur Klärung der Frage, in welcher Form in Zukunft Systemunterstützung bereitgestellt werden muss. Dazu werden ausgewählte Konstruktionsprozesse bezüglich der verfügbaren Systemunterstützung analysiert und Schlussfolgerungen abgeleitet. Dies erfolgt mit Bezug auf unterschiedliche Neuheitsgrade und Konstruktionsphasen. Eine Vielzahl der aufgezeigten Aspekte basiert auf industrienahen Problemstellungen, wodurch direkt die Forschungsrelevanz nachgewiesen wird. Die vorliegende Arbeit stellt Möglichkeiten vor, in welcher Form Konstruktionsabläufe unter Berücksichtigung von zu integrierenden Berechnungen automatisiert werden können. Allgemeinere Erläuterungen zu den verwendeten Beispielen verringern die zu leistende Transferarbeit bei der Übertragung auf vergleichbare Problemstellungen.

Die heutige Produktentwicklung ist durch den Einsatz vielfältiger Softwaresysteme geprägt, mit deren Hilfe die realen Produkte als digitale Modelle abgebildet und verwaltet werden. Die ganzheitliche Betrachtung einer Konstruktionsaufgabe verlangt nach einer verstärkten Vernetzung dieser Systeme. Der Neuheitsgrad einer Konstruktion beeinflusst jedoch die Kopplungsmöglichkeiten und den damit verbleibenden manuellen Aufwand, Teilmodelle aufeinander abzustimmen entscheidend. Die manuelle Abstimmung der Teilmodelle birgt die Gefahr inakzeptabler Inkonsistenzen zwischen den notwendigen Teilmo-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

dellen. Heute bieten CAD-Systeme umfangreiche Funktionalität zur durchgängigen Abbildung der Konstruktionsabsicht und Produktlogik. Berechnungssoftware ist bereits mit spezifischem Berechnungs- und Auslegungswissen angereichert oder kann damit angereichert werden. Um den Konstrukteur bei der verantwortungsvollen Konstruktionstätigkeit, die hochkomplexe Denkvorgänge voraussetzt, von Routinetätigkeiten zu entlasten, müssen diese beiden Domänen stärker miteinander verknüpft werden. Da die Anforderungen an den Konstrukteur und seine Verantwortung stetig wachsen, müssen die Softwaresysteme ihn in Zukunft bei der Entscheidungsfindung aktiver unterstützen.

Die Sicherung der Wirtschaftlichkeit der Unternehmen fordert mehr denn je Vereinheitlichungsmaßnahmen. Dies gilt auch für Konstruktionen mit hohem Neuheitsgrad oder Konstruktionen, bei denen kundenindividuelle Anpassungen berücksichtigt werden müssen. Sollen standardisierte Konstruktionskomponenten als Lösungsträger zur Erfüllung von Teilfunktionen innerhalb einer Baugruppe genutzt werden, müssen komponentenspezifische Randbedingungen beachtet werden. Das bedeutet, dass im CAD-System neben den Platzierungsbedingungen insbesondere funktionale und berechnungsrelevante Abhängigkeiten zu angrenzenden Konstruktionskomponenten zu berücksichtigen sind. Auch in leistungsfähigen CAD-Systemen fehlen heute Mechanismen, um automatisiert Bewertungsvorgänge zu initiieren, die eine funktionale Eignung im Baugruppenkontext sicherstellen. Derzeit muss der Konstrukteur manuell für die Einhaltung von Randbedingungen und Nachführung von Änderungen sorgen.

Kapitel 2 liefert Einblicke in das umfangreiche Arbeitsumfeld des Konstrukteurs und in die für die vorliegende Arbeit wichtigsten konstruktionsmethodischen Aspekte. Neben der Darstellung informationstechnischer Grundlagen virtueller Produktmodelle werden allgemeine Forschungsfelder der Wissensverarbeitung im Konstruktionsumfeld vorgestellt.

Aufbauend weist Kapitel 3 den Bedarf weiterführender Unterstützungsmethoden nach. Zur Darstellung werden Konstruktionsbeispiele herangezogen, die sich hinsichtlich ihres Neuheitsgrades unterscheiden. Es wird diskutiert, welche Funktionalität heutige Softwaresysteme bieten, um den auftretenden Problematiken zu begegnen, und welche Möglichkeiten und Grenzen der Systemunterstützung sich in Bezug auf Neu-, Anpassungs-und Variantenkonstruktionen ergeben. In diesem Kontext wird auf Konfigurationssysteme eingegangen, die neben Konfigurierungsregeln auch notwendige Berechnungen in den Auslegungsablauf integrieren. Hierdurch hebt sich diese Arbeit von vergleichbaren Arbeiten in diesem Bereich ab. Erkenntnisse dieses Kapitels werden in Form von Anforderungen zusammenfasst, die als notwendige Basis für die konzeptionelle Entwicklung der höherwertigen Konstruktionsobjekte herangezogen werden.

Kapitel 4 setzt sich mit den Möglichkeiten der Kopplung von Gestalt- und Berechnungsmodellen auseinander. Dabei wird Bezug auf die bis dahin vorgestellten Problemfelder

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

genommen. Es werden parameterbasierte Methoden zur Systemkopplung vorgestellt, verglichen und weiterentwickelt bzw. Verbesserungspotentiale abgeleitet. Darüber hinaus wird explizit auf die Abbildung der Produktlogik in digitalen Produktmodellen im Berechnungskontext eingegangen. Dieses Kapitel schafft die wichtige informationstechnische Grundlage für die ebenfalls bei den höherwertigen Konstruktionsobjekten zu überwindende Kopplungsproblematik.

Wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die Entwicklung eines konzeptionellen Ansatzes für höherwertige Konstruktionsobjekte. Höherwertige Konstruktionsobjekte unterstützen den Konstrukteur, Inkonsistenzen zwischen Gestalt- und Berechnungsmodell zu vermeiden und die Gefahr der Nichtberücksichtigung relevanter Vorschriften zu verringern. In diesem Zusammenhang wird die notwendige Abbildung der wechselseitigen Komponentenabhängigkeiten im digitalen Produktmodell eine zentrale Rolle einnehmen. Kapitel 5 befasst sich mit der Definition und dem Aufbau höherwertiger Konstruktionsobjekte. Hierzu werden konstruktionsmethodische und informationstechnische Aspekte aufgegriffen, die in den vorherigen Kapiteln gewonnen wurden. Die Beispiele sind derart ausgewählt, dass sie die repräsentative Darstellung der Problemfelder, aber auch die Verdeutlichung der Lösungsansätze zulassen. Es wird gezeigt, wie mit höherwertigen Konstruktionsobjekten der Konstruktionsprozess unterstützt werden kann und wie der Konstrukteur beim Gegenüberstellen von Lösungsalternativen von dieser Unterstützung profitiert. Aufbauend auf der allgemeingültigen Beschreibung und Definition des konzeptionellen Ansatzes der höherwertigen Konstruktionsobjekte erfolgt in diesem Kapitel ebenfalls eine exemplarische Umsetzung. Hierzu ist es notwendig, leistungsfähige CAD-Software hinsichtlich der geforderten Kriterien anzupassen und die CAD-Modelle mit Berechnungsmodellen bidirektional zu koppeln. Die gewählten Fallbeispiele weisen sowohl Einsatztauglichkeit als auch den praktischen Nutzen der höherwertigen Konstruktionsobjekte nach. Da es mit den höherwertigen Konstruktionsobjekten gelingt, den CAD-Prozess hinsichtlich der Zeiteffizienz und Qualität zu unterstützen, werden sie insbesondere der Forderung nach einer stetig effektiveren Produktentwicklung gerecht.

Kapitel 6 reflektiert die gewonnenen Erkenntnisse und beschreibt Ansatzpunkte für weiterführende Arbeiten.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Grundlagen heutiger Konstruktionsprozesse

Das „Konstruieren“ kann als geistig-schöpferische Tätigkeit aufgefasst werden, die sich zwischen Kunst und Wissenschaft platziert [He05]. Konstruieren dient hauptsächlich dazu, alle notwendigen Informationen, die zur Schaffung und zum Betrieb technischer Gebilde notwendig sind, zusammenzutragen. Der Konstrukteur speichert diese Informationen heutzutage innerhalb eines virtuellen Produktmodells. Er hat dafür zu sorgen, dass die Konstruktion eine weitestgehend optimale Umsetzung der im Vorfeld oftmals unscharf definierten Aufgabe darstellt. Hierzu muss er stetig den aktuellen Konstruktionsstand mit den Anforderungen und Randbedingungen abgleichen, um seine Vorstellung in funktionierende und herstellbare Gestalt zu überführen. Vor dem Hintergrund der Produktverantwortung und Produkthaftung muss der Konstrukteur während der Lösungsfindung die Alternativen hinsichtlich deren Eignung bewerten. Termintreue zwingt ihn, in möglichst kurzer Zeit den angemessensten Kompromiss zu bilden. Er trägt nicht nur den Großteil der technischen, sondern auch einen entscheidenden Teil der wirtschaftlichen Verantwortung, da er durch die Gestaltung signifikant die Produktkosten beeinflusst. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, dass der Konstrukteur seine Arbeiten äußerst bewusst und strukturiert ausführen muss.

An dieser Stelle zeichnet sich bereits die Gesamtkomplexität des Konstruktionsprozesses ab. Auch wenn bereits vielfältige Hilfsmittel und Methoden verfügbar sind, sorgt die Anzahl der Einflussfaktoren dafür, dass das heutige „Konstruieren“ nach wie vor eine Herausforderung darstellt.

2.1 Komplexität

Wie bereits festgestellt, steht im engen Zusammenhang mit dem Konstruieren die Überprüfung verschiedenster Anforderungen. Der Begriff „Gerechtheit“ definiert, in welchem Maße die Konstruktion spezifische Anforderungen erfüllt. Die Einhaltung der Gesamtheit aller von der Konstruktion einzuhaltenden Gerechtheiten verursacht die hohe Komplexität der Konstruktionsaufgabe. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier einige genannt: funktionsgerecht, fertigungsgerecht, montagegerecht, belastungsgerecht, normgerecht, termingerecht, sicherheitsgerecht, recyclinggerecht, kostengerecht etc.. Diese, zum Teil widersprüchlichen, fallabhängig zu gewichtenden Eigenschaften bzw. Anforderungen müssen von der endgültigen Konstruktion erfüllt werden. Abbildung 2-1 zeigt das im Konstruktionsprozess typische iterative Vorgehen. Die Iterationsschleifen sind der Tatsache ge-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

schuldet, dass mögliche Ansätze und Ideen der Bewertung nicht standhalten und verworfen werden müssen; die folgenden Änderungen sind dann erneut zu bewerten, bis sich das Gesamtsystem zu einer weitestgehend optimalen Lösung "zusammenschnürt".

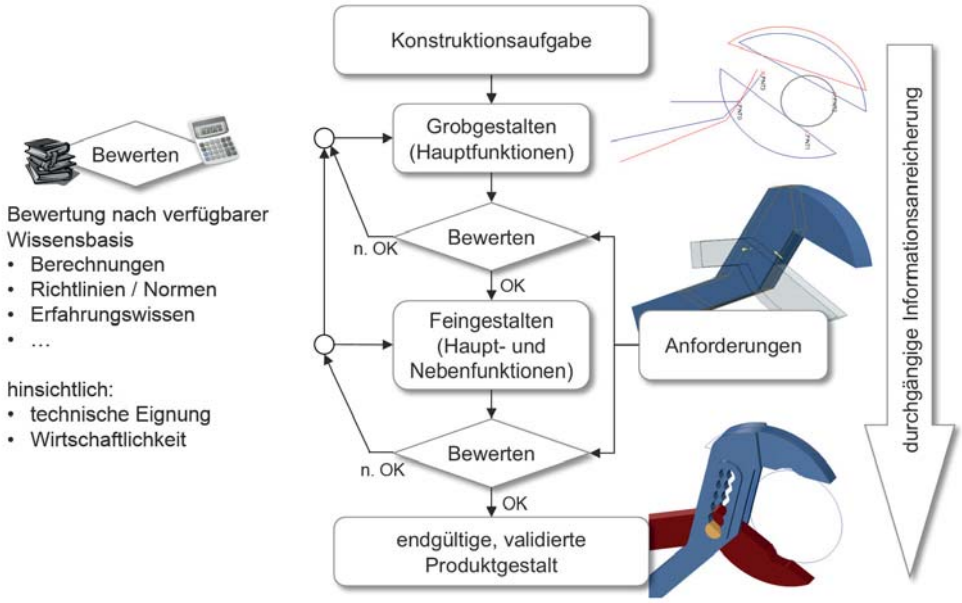


Abbildung 2-1: Iterationsschleifen durch abwechselndes Gestalten und Bewerten

Hinzu kommt, dass in frühen Phasen der Konstruktion nur wenige Konstruktionsparameter bekannt sind. Dies können z. B. max. Bauraum, Abstände, zu übertragende Leistung oder der notwendige Produktdurchsatz sein. Berechnungen, die als mögliches Bewertungsverfahren herangezogen werden können, setzen Kenntnis über die geometrische Ausprägung voraus. Die geometrische Ausprägung wiederum bedingt die Ergebnisse der Berechnungen. Die so entstehenden zirkulären Abhängigkeiten lassen sich nur eliminieren, wenn der Konstrukteur damit beginnt, einzelne Konstruktionsparameter sukzessiv festzulegen und im weiteren Verlauf ändert und konkretisiert, sodass eine kontinuierliche Informationsanreicherung stattfindet. Zur Bewertung verschiedenster Teilprobleme stehen Berechnungsvorschriften zur Verfügung oder können fallabhängig entwickelt werden, z. B. mit Hilfe elementarer mechanischer Gesetzmäßigkeiten. In Normen, Richtlinien und Fachliteratur sind Auslegungsregularien enthalten, die zur Lösung allgemeiner Teilprobleme beitragen. Darüber hinaus fließt das subjektive Erfahrungswissen des Konstrukteurs in die Bewertung des aktuellen Konstruktionsstands ein. Da Konstruktionsaufgaben in der Praxis meist in engen Zeitfenstern ausgeführt werden müssen, fällt es i. d. R. schwer abzuschätzen, welcher Bewertungsaufwand einer einzelnen Alternative (die evtl. wieder verworfen wird) zugeteilt werden muss, um deren Eignung festzustellen bzw. widerlegen zu können. Zumal Konstruktionsdetails, die im Grobentwurf noch nicht bekannt waren oder als unkritisch beurteilt wurden, dafür sorgen können, dass ein weit vorangetriebener Lösungsweg verworfen werden muss. Eine weitere zentrale Frage, die sich der Konstrukteur im Bewertungsprozess fortwährend stellen muss, ist daher die der Aussagekraft einer Bewertung.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Eine klare Definition oder eine vollständig allgemeingültige Beschreibung der Konstruktionstätigkeit ist aufgrund der mannigfachen Abhängigkeiten und unterschiedlichsten Einflussfaktoren bis heute nicht möglich. Hier deutet sich auch eines der wesentlichen Probleme zur Formulierung allgemeingültiger Handlungsstrategien für die Konstruktionstätigkeit an. Die Konstruktionsmethodik zielt darauf ab, eben genau diese Handlungsstrategien bereitzustellen. Die vielen Abhängigkeiten sorgen in vergleichbarer Weise auch für die Probleme bei der Entwicklung gänzlich allgemeingültiger Konstruktionssoftware. Daraus folgt, dass der Konstrukteur ein wichtiges Organ im Umfeld der heutigen Produktentwicklung darstellt und dass auf seine Intelligenzleistung auch in Zukunft nicht verzichtet werden kann. Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, stellt Abbildung 2-2 verschiedene Einflussgrößen und Abhängigkeiten auf den heutigen Konstruktionsprozess und damit auf den Konstrukteur von heute dar. In den folgenden Unterkapiteln werden diese Einflussfaktoren schrittweise aufgegriffen.

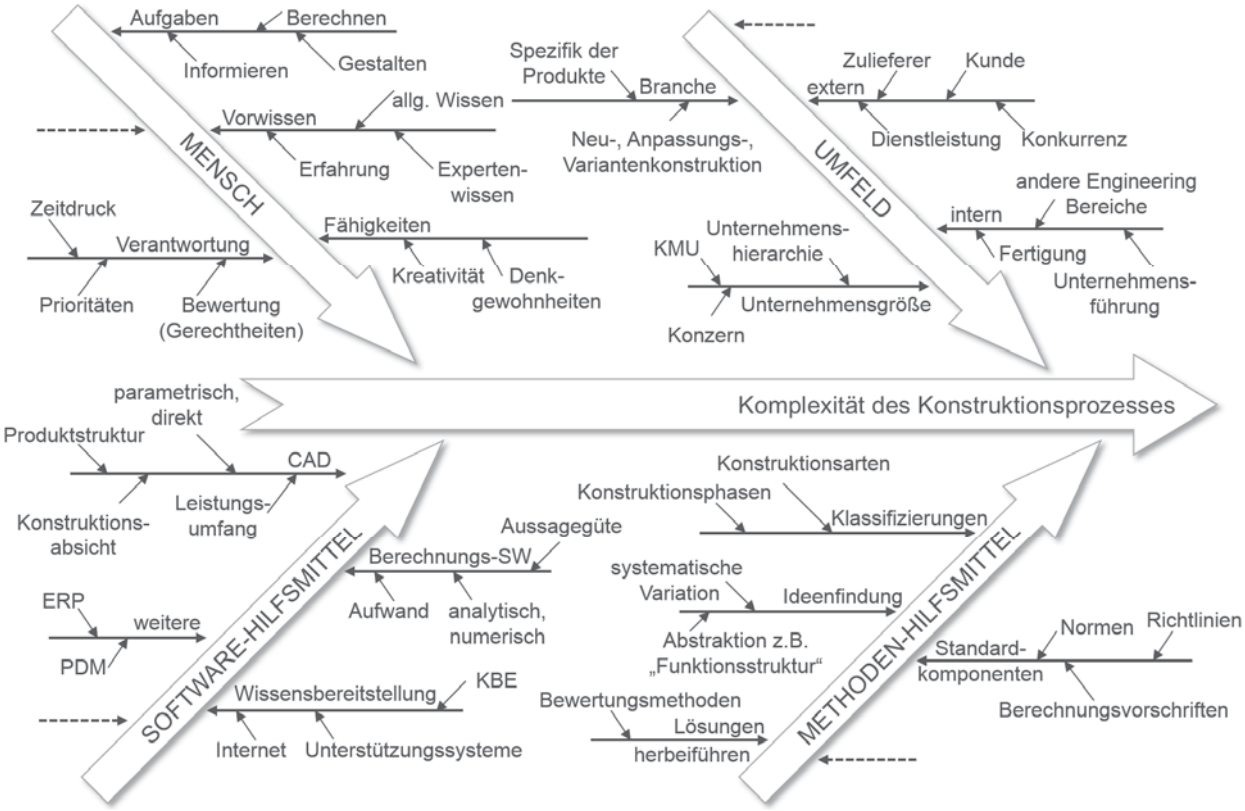


Abbildung 2-2: Abhängigkeitsdiagramm: Komplexität des Konstruktionsprozesses

2.2 Der Konstrukteur und sein Tätigkeitsumfeld

Laut VDMA [VD13] waren im Jahr 2012 rund 971.000 Menschen in den ca. 6000 Unternehmen mit der Herstellung von Maschinen und Anlagen beschäftigt. Etwa zwei Drittel der Unternehmen beschäftigten weniger als 100 Personen, damit ist der heutige deutsche Maschinenbau maßgeblich durch mittelständische Unternehmensstrukturen geprägt. Die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

häufig in Kleinserie oder auch als Einzelstücke gefertigten Maschinen lieferten einen pro-Kopf-Umsatz von 213.000 Euro. Auch wenn sich aus diesen Aussagen keine direkten Schlüsse über die unmittelbar im Entwicklungsprozess involvierten Personen ableiten lassen, zeigen Sie eine Tendenz bezüglich der Anzahl an Konstrukteuren, die in kleinen Entscheidungshierarchien arbeiten. Die stetig steigende Komplexität der Produkte fordert vom Konstrukteur einerseits breites Wissen über verschiedenste ingenieurswissenschaftliche Disziplinen, andererseits die notwendige Tiefe des Wissens, um der Verantwortung gerecht werden zu können. Unterschiedlichste Aspekte sorgen für einen stetig anhaltenden Wandel des gesamten Konstruktionsumfeldes und beeinflussen damit die dem Konstrukteur abverlangten Fähigkeiten.

2.2.1 Anforderungen an den Konstrukteur

Vielfach wird zwischen dem Produktentwickler, dem Konstrukteur und dem Detailkonstrukteur bzw. Technischen Zeichner differenziert. Der Produktentwickler ist dabei als Organ, das den Produktentwicklungsprozess ganzheitlich überwacht und koordiniert, eher für die neuen Ideen und Konzepte verantwortlich. Der Konstrukteur ist für die Gestaltung einzelner Bauteile und Ideenumsetzung verantwortlich und der Detailkonstrukteur bzw. der Technische Zeichner für die Anfertigung der Zeichnungen. Wobei hier sicherlich die Einbeziehung der Unternehmensgröße von entscheidender Bedeutung sein wird. Tendenziell übernimmt der Konstrukteur in kleineren mittelständischen Firmen weitreichendere Aufgaben als in großen Unternehmen, z. B. auch die Projektkoordination oder das Erzeugen neuer Ideen oder Lösungsansätze. Er steht dabei häufig direkt im Kontakt mit Kunden, Zulieferfirmen, Kollegen aus dem Vertrieb, Partnerunternehmen, die nach seinen Vorgaben Maschinenteile entwickeln und fertigen und muss ebenso seine Zeichnungen detaillieren. Innerhalb kleinerer Unternehmen bildet er die Schnittstelle zwischen Unternehmensführung und der Produktionsabteilung. Da heutige Maschinen neben den mechanischen auch eine Vielzahl elektrischer Komponenten enthalten, steht er ebenfalls in enger Abstimmung mit anderen Engineering-Bereichen, die intern oder extern angesiedelt sein können, um z. B. Sensoren und Aktuatoren in seiner Konstruktion zu berücksichtigen. Mit wachsender Unternehmensgröße sind die Unternehmensstrukturen und Abteilungen feiner aufgelöst, woraus eine spezifizierte und differenziertere Aufgabenteilung resultiert. Der Konstruktionsprozess und die auszuführenden Tätigkeiten müssen also im Kontext der gesamten Umgebung betrachtet werden. Was dagegen alle Konstrukteure vereint, ist das CAD-System. Es ist heute als das zentrale Werkzeug und Arbeitsmittel des Konstrukteurs anzusehen und stellt die universale Substitutionsform des traditionellen Zeichenbrettes dar. Aber auch hier bestehen Unterschiede. Während führende Großunternehmen der Automobil- sowie Luft- und Raumfahrtindustrie die richtungweisenden Vorstöße der modernen Produktentwicklung vorgeben, fehlen in kleinen und mittelständischen Unternehmen häufig technische, organisatorische, personelle und finanzielle Voraussetzungen (vgl.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[KöDa06]) zum Betrieb entsprechend komplexer Systeme. Einblicke in verschiedene Industrieunternehmen bestätigen, dass dem Konstrukteur aus unterschiedlichen Gegebenheiten nicht immer alle wünschenswerten Werkzeuge zur Verfügung stehen. Der Konstrukteur wird dann gezwungen, kurzfristig zu improvisieren und mit den Mitteln, die ihm zur Verfügung stehen, ein brauchbares Ergebnis zu erzielen. Hierbei kann es beispielsweise auch vorkommen, dass ein Tabellenkalkulationsprogramm zur Ermittlung von Biegelinien oder als Optimierungswerkzeug eingesetzt wird, obwohl speziell dafür entwickelte Software angeboten wird.

Die Trennung der Tätigkeiten im Konstruktionsumfeld ist heute demnach nur unscharf möglich. Im Sinne der durchgängigen Konstruktion erfolgt die Umsetzung einer Konstruktionsaufgabe von der Idee bis zur fertigen Zeichnung innerhalb des CAD-Systems. Wobei hier einerseits verschiedene Personen verschiedene Rollen einnehmen können, andererseits verschiedene Rollen von einer Person eingenommen werden. Dies zeigt, dass zur sprachlichen Vereinfachung weiterer Betrachtungen eine Namenskonvention notwendig ist. In Bezug auf diese Arbeit wird als „Konstrukteur“ daher diejenige Person verstanden, die im betrachteten Moment das Produktmodell mit Informationen anreichert. Dies kann das Erzeugen der ersten grundlegenden Skizze oder auch das Anbringen einer Oberflächenangabe sein.

Die im Jahr 2012 veröffentlichte Studie über das Projekt „Konstrukteur 2020“ [AlDe12] stellt die Tätigkeitsfelder und die zukünftigen Perspektiven des Konstrukteurs dar. Die Ergebnisse der Studie basieren auf Befragungen von Professoren und Studenten aus Fakultäten für Ingenieurwissenschaften renommierter Universitäten und Fachhochschulen sowie Vertretern aus namhaften Industrieunternehmen. Insbesondere die Interviews der Konstrukteure aus den Industrieunternehmen bestätigen in der Studie, dass analog zur Aufgabenbeschreibung des Konstrukteurs nicht generell festgehalten werden kann, wie groß der Teil nicht standardisierter und damit innovativer und kreativer Tätigkeiten im Vergleich zu standardisierten Routinetätigkeiten ist. Der Neuheitsgrad einer Konstruktion beeinflusst also ebenso die geforderten Tätigkeiten und Unterstützungsmöglichkeiten des Konstrukteurs. Sinnvollerweise wird diesbezüglich in Neu-, Anpassungs-, und Variantenkonstruktion unterschieden, wobei die Branche, in der das Unternehmen tätig ist, signifikant über die Häufigkeit der jeweiligen Konstruktionsart entscheidet. Sofern entsprechende Neuheitsanteile in der Konstruktion vorhanden sind, wird das Ergebnis des Konstruktionsprozesses personenabhängig sein. Bei einheitlicher Aufgabenbeschreibung ist von zwei verschiedenen Konstrukteuren weder eine exakt einheitliche Arbeitsweise noch ein exakt identisches Ergebnis zu erwarten. Das Vorwissen des Konstrukteurs beeinflusst die endgültige Ausprägung entscheidend. Auch die heute bekannten Konstruktionsmethoden können dies nicht vollständig verhindern. BIRKHOFER [Bi11] hebt hervor, dass die systematischen Ansätze des methodischen Konstruierens auch im Zeitalter von „Digital Mock Up‘s“

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

und „Augmented Realitiy“[1] nicht an Bedeutung verlieren können und dass die Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeit eine der anspruchsvollsten menschlichen Denkleistungen darstellt.

2.2.2 Verantwortung im Konstruktionsprozess

Vor dem Hintergrund der gesetzlich geregelten Produkthaftung und zur Sicherung der Zuverlässigkeit der Konstruktionselemente über die gesamte Produktlebenszeit bzw. über das definierte Wartungsintervall, ist es notwendig, die Produktgestalt weitestgehend durch Berechnungen abzusichern. Daher spielen Festigkeitsberechnungen eine zentrale Rolle im Konstruktionsprozess. Welche Berechnungen erforderlich sind und welche Softwaresysteme dazu eigesetzt werden, ist erneut abhängig von der Branche und vom Produktbereich.

Während der Konstrukteur in kleineren Unternehmen die Berechnungen zur Bewertung seiner Entwürfe selber durchführen muss und für deren Qualität verantwortlich ist, kann sein Berufskollege aus dem großen Unternehmen seinen Entwurf an einen Berechnungsspezialisten übergeben. An dieser Stelle deutet sich bereits an, dass im Konstruktionsumfeld bereits bewertende Abschätzungen auch ohne eine Berechnungsexperten wünschenswert sind. In Form von „konstruktionsnahen“ oder „konstruktionsbegleitenden“ Berechnungen, die weniger Expertenwissen benötigen oder mit Berechnungslogik angereichert sind, versucht man heute diesem Wunsch nachzukommen. Wenngleich der Konstrukteur die Berechnungen nicht selbstständig durchführen muss, trägt er einen Teil der Verantwortung für deren Ergebnisse, da er häufig Berechnungskriterien und die Aussagegüte mitbestimmen muss. HERFELD [He07] ist der Fragestellung nachgegangen, wer die Verantwortung in der gemeinschaftlichen (Konstruktion und Berechnung/Simulation) Produktentwicklung trägt. Die Ergebnisse der durchgeführten Studie unterstreichen die Verantwortungsverteilung: „Die Konstruktion trägt hierbei die Hauptverantwortung und wenn man davon ausgeht, dass Verantwortung nicht teilbar ist, dann trägt sie somit die alleinige Verantwortung über den gesamten Entwicklungsprozess. Die Simulation ist nur phasenweise an der Verantwortung beteiligt und spielt dadurch auch über den gesamten Prozess hinweg wieder eher die Rolle des Unterstützers in bestimmten Prozessphasen, was den Möglichkeiten und Ansprüchen der Simulation widerspricht.“

2.3 Das methodische Konstruieren

„Während das Konstruieren bis weit in das 19. Jahrhundert hinein von handwerklichen Fertigkeiten, praktischen Erfahrungen und individueller Kreativität geprägt war, mehrten sich seit Mitte des 19. Jahrhunderts die Bemühungen um eine Verwissenschaftlichung der Konstruktion. Vor allem Konstruktionswissenschaftler an den technischen Hochschulen

[1] Als repräsentative Begriffe für hochgradig virtuelle Umgebungen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

verfolgten das Ziel, den intuitiv geprägten Vorgang des Konstruierens wissenschaftlich zu durchdringen und zu einem systematischen, durch allgemeine Gesetzmäßigkeiten geleiteten Prozess zu machen. Die Verwissenschaftlichung der Technik brachte zahllose neue Ansätze und Methoden hervor, (...). Die mit dem Spannungsverhältnis zwischen „Kunst“ und Wissenschaft verknüpften Entwicklungen und Auseinandersetzungen werden vor allem für den deutschsprachigen Raum untersucht.“ [He05]. Heymann stellt in seiner Arbeit umfassend die Ergebnisse eines DFG-geförderten Projektes zur Untersuchung der Entwicklungen in der Konstruktionsmethodik vor. Abbildung 2-3 zeigt die entstandene Zusammenfassung und die Ausrichtung der wichtigsten Vertreter der Konstruktionslehre als Zeitdiagramm. Es zeigt sich ein Bild, das von einer Pendelbewegung zwischen Fachvertretern der praktisch orientierten Methoden und Fachvertretern der strengen systematischen Methoden geprägt ist.

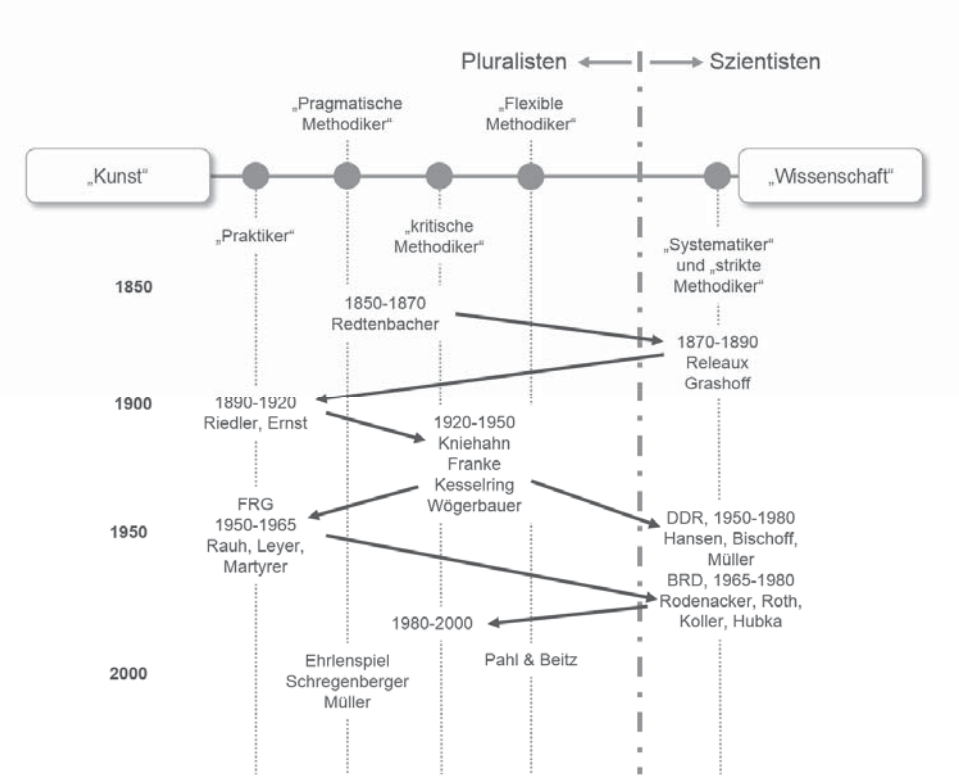


Abbildung 2-3: Entwicklung der Konstruktionsmethodik nach Heymann [He05]

In den letzten Jahrzehnten sind folglich zahlreiche Werke zum methodischen Konstruieren entstanden. Weitestgehend produktneutrale Ansätze werden insbesondere in [FeGr13], [Li09], [Ko98], [EhMe13], [ClRo13], [Ro00], [Ro01], [StRi13] vorgestellt. Eine nahezu vollständige Zusammenstellung internationaler Forschungsaktivitäten findet sich in der Schriftenreihe der ICED-Konferenzen [Hu81].

Obwohl die *VDI-Richtlinie 2221* [VDI93] bereits über zwanzig Jahre alt ist, gilt sie bis heute als anerkannte Richtlinie zum methodischen Konstruieren. Die VDI-Richtlinie fungiert als „Dachrichtlinie“ und wurde in den Jahren nach ihrer Erscheinung um die *VDI 2222*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[VDI97] und *VDI 2223* [VDI04] ergänzt, die tiefere Betrachtungen der methodischen Konstruktion zulassen. Darüber hinaus können diese Richtlinien bzw. das methodische Konstruieren unerfahrene Konstrukteure beim Problemlösen unterstützen, da Erfahrungsdefizite durch systematische Vorgehensweisen stellenweise ausgeglichen werden können.

Weitere aktuelle Werke, die sich mit der allgemeinen Konstruktionslehre im Maschinenbau befassen, finden sich in [HoMe12a], [HoMe10], [KuHi08] und [Co13]. Sie enthalten viele praxisnahe Beispiele, die sich auf vergleichbare konstruktive Problemstellungen übertragen lassen.

2.3.1 Produkt- und Funktionsstruktur

Praktisch einheitlich betrachtet wird die Auffassung, dass es zweckmäßig ist, im Kontext der methodischen Konstruktion von Funktionen zu sprechen. Eine Funktion beschreibt lösungsneutral die Beziehungen zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems. Dabei bildet die Gesamtfunktion die übergeordnete Funktion, die eine Konstruktion erfüllen soll. Diese ist zunächst in Teilfunktionen zu untergliedern, denn den weniger komplexen Teilfunktionen können dann (sofern fein genug aufgelöst) prinzipielle Lösungen und diesen schlussendlich physikalische Effekte zugeordnet werden. Die Funktionsstruktur bildet den Zusammenhang zwischen den Teilfunktionen ab. KOLLER und KASTRUP stellen eine sehr umfangreiche und anerkannte Sammlung in Form von Konstruktionskatalogen zur Verfügung, die den Zusammenhang zwischen physikalischem Effekt und Prinziplösung herstellen [KoKa98]. Weniger wissenschaftliche, aber durchaus vergleichbare Sammlungen sind heute bereits jedem Konstrukteur über interaktive Internetseiten frei zugänglich, vgl. [CR13].

Das Konstruktionsleitsystem „KALEIT“ ist ein Beispiel dafür, dass längst versucht wurde, die Funktionsstruktur zentral in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess einzugliedern [Ku92]. Vergleicht man heutige CAD-Systeme, zeigt sich, dass nahezu durchgängig die Produktstruktur in den Mittelpunkt des Konstruktionsprozesses gestellt wird und weniger die Funktionsstruktur. Ein aktuellerer konstruktionsmethodischer Ansatz zur Transformation von Gestalt und Funktion ist der des Elementmodells „Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen“. Dieser Ansatz basiert im Wesentlichen darauf, dass jeglicher Energie-, Stoff- und Informationsaustausch über Wirkflächen erfolgen muss und die Leitstützstrukturen die Wirkflächenpaare miteinander verbindet. Am Beispiel einer Nietverbindung ist dieser Ansatz in [AlMa02] weiter ausgeführt. Die Arbeit von MATTHIESEN [Ma12] zeigt, dass auch aktuelle Forschungen an diesem Grundgedanken festhalten.

Abbildung 2-4 zeigt die Unterschiede zwischen Produkt- und Funktionsstruktur. Die Funktionsstruktur stellt die logische Verknüpfung der Teilfunktionen dar, die Produktstruktur die logische Verknüpfung der Konstruktionselemente, die ihrerseits Funktionsträger sind. Es können einerseits verschiedene Konstruktionsobjekte gemeinsam eine Funkti-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

on erfüllen, andererseits kann eine Konstruktionskomponente mehrere Funktionen erfüllen. Der Fall der eindeutigen, beidseitigen Zuordnung tritt in der Praxis nur für bestimmte Sonderfälle ein. Ferner gilt es zu beachten, dass eine Produktstruktur immer nur einer Sichtweise (konstruktiv, fertigungsorientiert, montageorientiert etc.) gerecht werden kann und dementsprechend nur eine von verschiedenen Möglichkeiten darstellt. Die Produktstruktur spiegelt sich heutzutage nicht nur im CAD-System sondern, auch im ERP- und PDM-System wider.

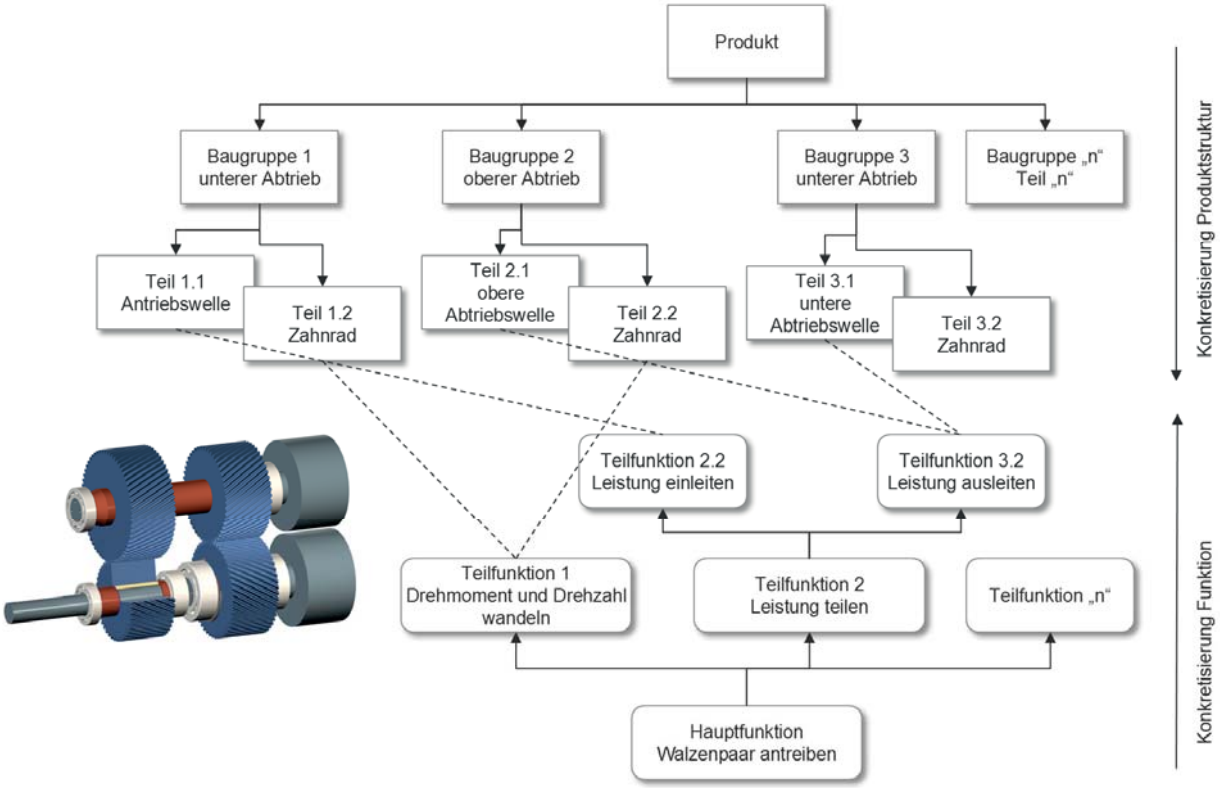


Abbildung 2-4: Vergleich Funktions- und Produktstruktur am Beispiel eines Walzwerkgetriebes

2.3.2 Konstruktionsarten

Wie bereits festgestellt, beeinflusst der Neuheitsgrad einer Konstruktionsaufgabe die Tätigkeiten des Konstrukteurs. Aus konstruktionsmethodischer Sicht kann abhängig vom Neuheitsgrad der Konstruktion in Neu-, Anpassungs-, und Variantenkonstruktion unterschieden werden. Die Definition der Konstruktionsarten ist FELDHUSEN und GROTHE [FeGr13] entnommen und kann stellvertretend für viele weitere Autoren angesehen werden:

Neukonstruktionen ergeben sich als Erfordernis aus neuen, bisher unbekannten Aufgabenstellungen. Die Lösung derartiger Konstruktionsprobleme kann sich entweder durch Auswahl und Kombination an sich bekannter Prinzipien und Technologien ergeben oder es muss technisches Neuland betreten werden. Auch wenn bekannte und nur wenig geänderte Aufgabenstellungen mit neuen Lösungsprinzipien gelöst werden, spricht man von Neu-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

konstruktionen. I. d. R. erfordern sie ein Durchlaufen aller Konstruktionsphasen, die Einbeziehung physikalischer und verfahrenstechnischer Grundlagen sowie eine umfassende technische und wirtschaftliche Aufgabenklärung. Neukonstruktionen können das gesamte Erzeugnis oder nur Baugruppen und Einzelteile betreffen.

Bei *Anpassungskonstruktionen* bleibt man bei bekannten und bewährten Lösungsprinzipien und passt die Gestaltung an veränderte Randbedingungen an. Dabei ist die Neukonstruktion einzelner Teile und Baugruppen oft nötig. Bei dieser Aufgabenart stehen geometrische, festigkeitsmäßige, fertigungstechnische und werkstofftechnische Fragestellungen im Vordergrund.

Bei *Variantenkonstruktionen* werden im Zuge der Auftragsabwicklung Größe und/oder Anordnung von Teilen und Baugruppen innerhalb von Grenzen vorausgedachter Systeme variiert (z. B. Baureihen oder Baukästen). Im Rahmen der Auftragsabwicklung müssen somit keine aufwendigen Konstruktionsprobleme mehr gelöst werden.

In der Praxis fällt die scharfe Trennung zwischen den Konstruktionsarten schwer. Grund dafür ist die subjektive Auffassung, wie groß der Neuheitsanteil einer Konstruktion sein muss, um schon Neukonstruktion und nicht mehr Anpassungskonstruktion zu sein. Die Auffassung, wo die Grenzen zwischen Neu- oder Anpassungs- oder Variantenkonstruktion liegen, hängt zudem vom subjektiven Empfinden und Kenntnisstand des Konstrukteurs ab. EHRLENSPIEL und MEERKAMM [EhMe13] vergleichen die Ergebnisse zweier Studien hinsichtlich der Verteilungen der Konstruktionsarten bezogen auf die Gesamtheit aller Konstruktionen und weisen ebenfalls auf die vorhandene Streuung hin: Neukonstruktion 33% bzw. 10%, Anpassungskonstruktion 37% bzw. 15% und Variantenkonstruktion 30% bzw. 70%. KURZ et al. [KuHi08] geben die Verteilung bezogen auf den allgemeinen Maschinenbau wie folgt an: Neukonstruktion 25%, Anpassungskonstruktion 55% und Variantenkonstruktion 20%. Trotz der variierenden Aussagen ist festzuhalten, dass die Neu- und Anpassungskonstruktionen nach wie vor eine bedeutende Rolle im Konstruktionsalltag spielen werden, da zu erwarten ist, dass der Markt stetig nach neuen innovativen Produkten verlangen wird.

Insbesondere bei der Variantenkonstruktion muss besonderer Wert auf die Auswahl der Gestaltungsprinzipien „integral oder differential“ gelegt werden, die bei der Bauteil- und Baugruppengestaltung zum Tragen kommen. Insbesondere bei höheren Stückzahlen verursacht die Differentialbauweise höhere Herstellkosten als die Integralbauweise. Wird eine Variantenkonstruktion angestrebt, die es dem Kunden ermöglichen soll, sein Produkt kundenindividuell zu konfigurieren, kann jedoch die Differentialbauweise zielführender sein, da der Kunde den Mehrwert der Anpassungsfähigkeit entsprechend wertschätzt [ScHe12]. Die Branche, die Stückzahl und der Kunde beeinflussen hier demnach die Konstruktionstätigkeit entscheidend.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2.3.3 Konstruktionsphasen

Die primär auszuführenden Tätigkeiten im Konstruktionsprozess in Bezug auf den zeitlichen Ablauf lassen sich in vier Phasen unterteilen. Die in der anerkannten Literatur zum methodischen Konstruieren definierten Begriffe sind bezüglich der Konstruktionsphasen zum Teil unterschiedlich und unterschiedlich stark untergliedert. Ein detaillierter Vergleich der verschiedenen Autoren kann aus [St06] entnommen werden. Einigkeit besteht jedoch über vier Hauptphasen. Stellvertretend für viele andere Autoren sind diese nach EHRLENSPIEL und MEERKAMM [EhMe13]:

Das *Klären der Aufgabenstellung* dient der Klärung aller Zusammenhänge, die mit der Aufgabenstellung verknüpft sind. Der Konstrukteur versucht die Aufgabe zu gliedern, den Arbeitsablauf zeitlich und personell zu organisieren sowie Informationen, die mit der Aufgabe in Zusammenhang stehen, zusammenzutragen. Ergebnis ist die aus dem Lastenheft erstellte Anforderungsliste, in der (möglichst) alle Anforderungen (z. B. Betriebsparameter und deren zulässige Abweichungen) zusammengefasst werden.

Beim *Konzipieren* versucht man, eine Vorstellung darüber zu gewinnen, wie und mit welchen Mitteln das Produkt prinzipiell oder qualitativ funktionieren könnte. Dabei wird zunächst die Aufgabe in bekannte Teilprobleme (z. B. nach Teilfunktionen) zerlegt. An dieser Stelle werden funktionale Zusammenhänge zunächst skizzenhaft dargestellt. Ergebnis ist das Konzept oder eine prinzipielle Lösung.

Das *Entwerfen* bezeichnet die Phase, in der das qualitativ funktionierende Produkt aus der Form eines Konzeptes in ein quantitativ funktionsfähiges und fertigbares, körperlich gestaltetes Gebilde überführt wird. Dies ist ein ausgeprägt iterativer Prozess, bei dem sich Synthese (Vorstellung, Zeichnung) und Analyse (Berechnung, Bewertung, Versuch) ständig gegenseitig beeinflussen und abwechseln. Ergebnis ist der endgültige Entwurf.

Beim *Ausarbeiten* des Entwurfs werden die wesentlichen Informationen niedergelegt, die man zur Materialbeschaffung und Produktion benötigt. Die endgültige Feingestaltung und maßstäbliche Festlegung aller Details (z. B. Oberflächenangaben, Toleranzen etc.) wird vorgenommen. Ergebnis ist die vollständige Produktdokumentation mit allen normgerechten Baugruppenzeichnungen, Fertigungszeichnungen, Stücklisten und Montageanleitungen.

Die scharfe Trennung der Konstruktionsphasen ist, wie auch schon bei den Konstruktionsarten, in der Praxis nicht immer möglich. Dennoch können Konstruktionsphasen und Konstruktionsarten in Zusammenhang gebracht werden, vgl. Abbildung 2-5.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

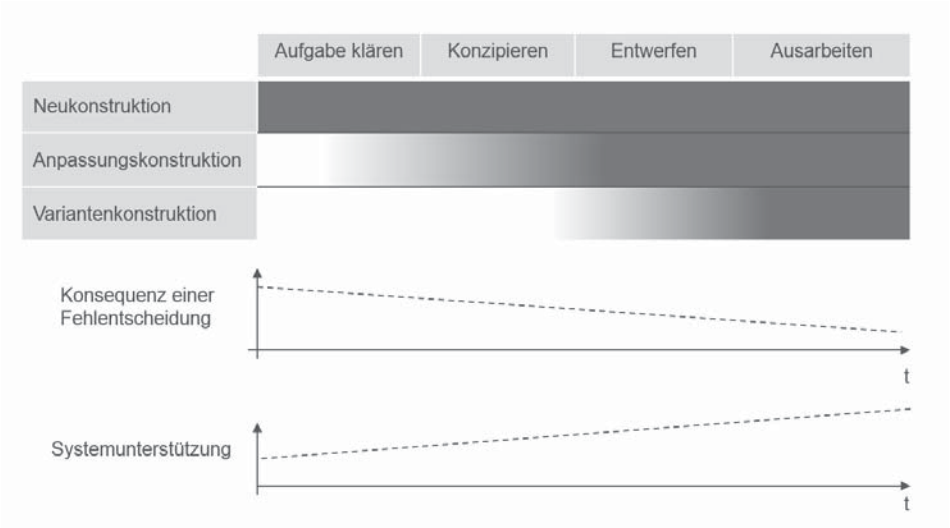


Abbildung 2-5: Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen

Aus der VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1 lässt sich in Bezug auf die prinzipielle Lösung, die aus der Konzeptphase resultiert, folgende Aussage entnehmen [VDI97]: „Eine Fehlentscheidung kann in einer nachgeordneten Phase bzw. einem nachgeordneten Arbeitsabschritt durch noch so weit gehende Optimierungen in der Regel nicht mehr ausgeglichen werden.“ Dabei ist die Konzeptphase die kreativste Phase des Konstruierens. Die erstellten Prinzipskizzen sollen bewusst detailarm und abstrakt ausgeführt werden, um die Kreativität nicht unnötig einzuschränken. Lagerungen, Federn, Bolzen usw. werden daher zumeist nur schematisch abgebildet. Ein Kreis beispielsweise kann so zur abstrakten, unscharfen und schnellen Darstellung eines Drehgelenkes verwendet werden, welches später (Entwurf) durch Gleitlager oder Wälzlagerung in den unterschiedlichsten Bauformen realisiert wird. Häufig werden auch zusätzlich Hinweistexte auf den Skizzen platziert, um kompliziert darzustellende Situationen einfacher zu erfassen. Mit dem sogenannten "Front Loading" wird die Bemühung bezeichnet, Funktion, Betriebsverhalten, technologische und sonstige Eigenschaften eines Produktes o. ä. so früh wie möglich in der Entwicklung mit Hilfe von digitalen Modellen zu überprüfen. Wie im Laufe dieser Arbeit noch vertieft bestätigt wird, fehlt insbesondere die Systemunterstützung in der Konzept- und Entwurfsphase, vgl. Abbildung 2-5.

Durch die Forschungsaktivitäten der letzten Jahrzehnte im Bereich des methodischen Konstruierens sind umfangreiche Arbeitsanweisungen entstanden, um eine weitestgehend zielgerichtete und strukturierte Lösungssuche zu betreiben. In der Praxis ist zu beobachten, dass die wissenschaftlich entwickelten Konstruktionsmethoden auch heute noch nicht breit durchgesetzt bzw. eingesetzt werden. Methoden müssen auf die unternehmensspezifischen Strukturen abgestimmt werden, was zunächst Mehraufwand bedeutet, der häufig gescheut wird. Die Akzeptanz und Verfügbarkeit der Konstruktionsmethoden ist daher sicherlich von vielen Faktoren abhängig. Dies könnten beispielsweise sein: Branche und

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Produktbereiche, Unternehmensgröße, persönliche Einstellung des Konstrukteurs oder die Möglichkeit, die Methoden rechnerunterstützt einsetzen zu können.

2.4 Informationstechnische Hilfsmittel

Für nahezu alle auftretenden Teilprobleme während des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses werden bereits unterstützende Softwarewerkzeuge angeboten. Hierunter fallen folgende, im Konstruktionsumfeld eingesetzte, Basiswerkzeuge:

- CAD-Systeme zur parametrischen und/oder direkten Produktmodellierung
- Berechnungs-, Simulations- und Optimierungssysteme
- Daten- und Informationssysteme: PLM-Systeme, ERP-Systeme etc.
- Sonstige EDV-Systeme: E-Mail und Textverarbeitungssoftware etc.

Die ganzheitliche Betrachtung der zu lösenden Aufgaben verlangt nach einer Vernetzung aller im Konstruktionsprozess eingesetzten Softwaresysteme. Seit Jahren besteht die Zielsetzung, möglichst ohne Benutzereingriffe und möglichst automatisiert, programmübergreifend Informationen und Abhängigkeiten auszutauschen. In den letzten Jahrzehnten sind durch viele unabhängige Softwareanbieter sog. Insellösungen entstanden. Das Bestreben, eine durchgängige Vernetzung und Integration der Softwarewerkzeuge zu erreichen, zeigt sich bei den von nahezu allen CAD-System Herstellern angebotenen Softwarepaketen. Das CAD-System fügt sich zentral in die Gesamtheit der konstruktionsbegleitenden Softwarewerkzeuge ein. Stammen die verwendeten Applikationen aus demselben Softwarehaus, ist eine bessere Abstimmung und verbesserter Informationsaustausch untereinander festzustellen als es bei Applikationen verschiedener Hersteller der Fall ist.

Fallbeispiel: Mathcad ist ein leistungsstarkes Mathematikprogramm, mit dem umfangreiche Konstruktionsberechnungen durchgeführt werden können. *ProEngineer* ist ein leistungsstarkes parametrisches CAD-System. Ursprünglich waren *Mathcad(Mathsoft)* und *ProEngineer(PTC)* vollständig getrennte Produkte. Berechnungsmodell und CAD-Modell waren vollständig voneinander getrennt. Nachdem *PTC* im Jahr 2006 das Unternehmen *Mathsoft* kaufte, wurde ab *ProEngineer Wildfire 4.0* eine Schnittstelle zu *Mathcad 14* angeboten. Seitdem können die CAD-Modelle über Parameterkopplung direkt an komplexere Berechnungen angebunden werden, sodass manuelle Übertragungsarbeit teilweise eliminiert werden konnte. Nachteil war, dass die Parameter vergleichsweise umständlich manuell einander zugeordnet werden mussten. Die derzeit neueste Version *Mathcad Prime 3.0* unterstützt nun vereinfachtes Zuweisen durch erweiterte Funktionen. Eine Schnittstelle zur ebenfalls leistungsstarken Mathematiksoftware *Matlab(Mathworks),* die eine analoge Vorgehensweise anbietet (es existiert nur eine Schnittstelle für MKS-Modelle), wird bis heute nicht angeboten.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Beispiel deutet direkt auf die noch nicht ausreichenden Standardisierungsmaßnahmen hin. Der Grund für die bessere Abstimmung zwischen den beiden Systemen liegt darin, dass die internen Datenstrukturen beider Systeme vollständig offenliegen, wenn die Systeme von einem Softwarehersteller angeboten werden. Softwareanbieter, die ihr System an die CAD-Systeme koppeln möchten, binden sich an die nicht genormte und damit herstellerspezifische Schnittstellenbeschreibung des CAD-Systems und sind bei Änderungen gezwungen, die Schnittstelle nachzuführen. Dies ist beispielsweise bei den MEBP (Maschinenelementeberechnungsprogramm) häufig der Fall. Wenn keine Kopplungsmöglichkeiten vorhanden sind, ist der Konstrukteur der Leidtragende, da er für die modellübergreifende Konsistenzherstellung verantwortlich ist.

2.4.1 Das integrierte Produktmodell

Unter einem Modell wird die abstrahierte Abbildung oder Repräsentation eines realen Objektes, Systems oder Vorgangs verstanden. Modelle helfen bei der Veranschaulichung komplexer Zusammenhänge und sind Voraussetzung für die Definition von Datenstrukturen und damit für die Verarbeitung im Rechner [VDI09b].

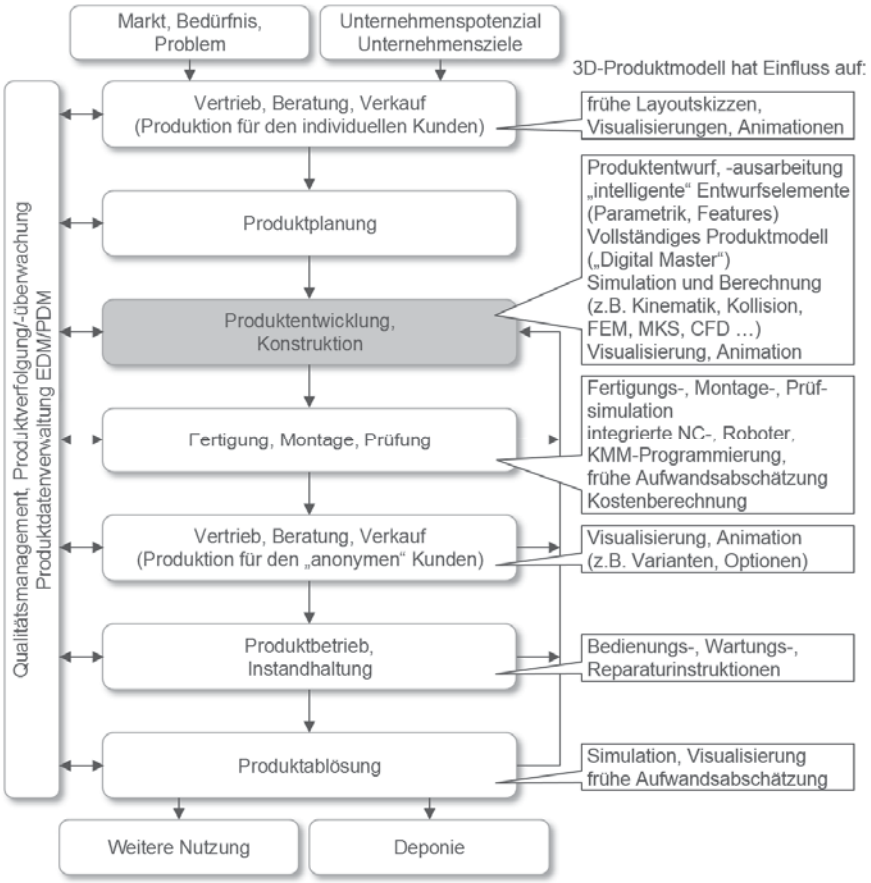


Abbildung 2-6: Lebensphasen eines technischen Produktes [VDI03b]

Modelle können im Allgemeinen virtueller oder physikalischer (z. B. maßstabstreuer Prototyp) Natur sein. Mit Hilfe von virtuellen Produktmodellen wird versucht, das Verhal-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ten eines realen Produktes über seine gesamte Lebensphase hinweg abzubilden. Die aus der VDI-Richtlinie 2209 [VDI09b] entnommene Abbildung 2-6 zeigt die „Lebensabschnitte“ eines technischen Produktes. Im Zeitabschnitt der Produktentwicklung und Konstruktion werden dem Produktmodell zwar viele elementare Informationen eingeprägt, dennoch fallen auch in vor- und nachgelagerten Zeitabschnitten Produktinformation an.

Das alle Zeitabschnitte umfassende Produktmodell wird integriertes, totales oder vollständiges Produktmodell genannt. KRAUSE [Kr97] prognostizierte 1997 eine erhebliche Verkürzung der Produktentwicklungszeit bei gleichzeitiger Steigerung der Produktqualität, wenn ganzheitliche Ansätze und Methoden eingesetzt werden. Insbesondere die Aktivitäten der STEP-Vereinigung zielen darauf ab, Möglichkeiten für eine derartige komplexe Produktbeschreibung herbeizuführen. Auch heute können Beispiele dafür gefunden werden, dass beim Austausch von einem System zum anderen Informationen verloren gehen. Häufig beschränkt sich das prinzipiell vorhandene Potential auf die Übertragung von geometrischen Informationen.

Da das integrierte Produktmodell aufgrund der Informationsanreicherung stetig an Komplexität gewinnt und nur schwer zu handhaben ist, wird es in Partialmodelle zerlegt, vgl. [PaSu91], [WeMu99]. Dies ist auch heute noch notwendig. Grundlage nahezu aller virtuellen Untersuchungen (z. B. Mehrkörpersimulation, Finite-Elemente-Methoden, Fertigungssimulation, Digital Mock-Ups oder auch physikalisch erzeugte Modelle des Rapid-Prototypings) ist das im 3D-CAD-System vom Konstrukteur erzeugte digitale Mastermodell. 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 [DaLu08] [KöDu06]. Hier ist der Konstrukteur wiederholt in der Verantwortung, da er bei der Modellierung die spätere Verwendung berücksichtigen muss. An dieser Stelle sei angemerkt, dass als Mastermodelle auch die Modelle bezeichnet werden, aus denen sich im Rahmen der Variantenkonstruktion auftragsspezifische Instanzen ableiten lassen, vgl. diesbezüglich LUTZ [Lu12] und [VDI09b].

Die Definition und Entwicklung des integrierten, ganzheitlichen und damit entsprechend komplexen Produktmodells ist aus dem Ansatz entstanden, dass die Daten abteilungs- bzw. standortübergreifend, national und international, zu und von Zulieferfirmen, software- und pattformunabhängig ausgetauscht und bearbeitet werden müssen. Der Anwendungsbereich ist primär auf ausgedehnte Unternehmensstrukturen zugeschnitten, in denen spezialisierte Abteilungen (Vorauslegung, Konstruktion, Berechnung, strukturmechanische Simulation, Strömungssimulation, Qualitätssicherung, Fertigungssimulation etc.) Probleme der einzelnen Teilbereiche lösen. Ein Beispiel für eine entsprechende Produkt- und Prozess-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

komplexität ist die Entwicklung von Automobilen. Der Konstrukteur aus dem KMU profitiert erst langsam von diesen Entwicklungen.

Gestalt- und Berechnungsmodell: Die Gestalt- und Berechnungsmodelle nehmen in dieser Arbeit eine zentrale Rolle ein und werden in Bezug auf diese Arbeit als die zwei primären Partialmodelle angesehen. KOLLER [Ko98] versteht unter der „Gestalt" den Zusammenschluss aus Geometrie und Material. Im Rahmen dieser Arbeit soll unter dem Gestaltmodell, ein Zusammenschluss aus dem 3D-Geometriemodell mit Werkstoffgrößen, allen auf einer technischen Zeichnung enthaltenen Informationen (Rauheit, Toleranz, Hinweistexte etc.) und der Konstruktionsabsicht verstanden werden. Dieses Modell entspricht daher dem Modell, wie es heute im parametrischen CAD-System abgebildet wird. Das Berechnungsmodell beinhaltet alle berechnungsrelevanten Größen und die Berechnungsvorschrift, die sie miteinander in Beziehung stellt. Wie insbesondere in Kapitel 3.3.1 im Zusammenhang mit Konfigurationssystemen für Zahnradgetriebe noch weiterführend ergänzt wird, kann heute auf die Modellbildung in getrennten Softwaresystemen aufgrund der jeweils begrenzt verfügbaren Möglichkeiten nicht verzichtet werden. Entsprechende Datenstrukturen innerhalb des jeweiligen Softwaresystems definieren die Modelle.

Viele Konstruktionen im maschinenbaulichen Umfeld können auf das Zusammenwirken der vier wesentlichen Bestandteile vereinheitlicht werden: Normteile (beinhalten für diese Betrachtung die Maschinenelemente), Zukaufteile, Wiederholteile (d. h. innerbetrieblich häufig verwendete Standardteile oder Vorzugsteile) und Neuteile. Diese Bestandteile sollen als Konstruktionskomponenten bezeichnet werden. Um die Gesamtfunktion virtuell prüfen zu können, müssen die Konstruktionskomponenten zunächst virtuell vorliegen. Das gilt sowohl für die Gestalt- als auch die Berechnungsmodelle (Abbildung 2-7). Norm- und Wiederholteile, können unternehmensintern über entsprechende Datenbanken dem Konstrukteur zugänglich gemacht werden. Das PDM-System hilft durch verschiedene Suchfunktionen vorhandene Modelle unternehmensweit aufzufinden. LEIDICH und KRETSCHER [LeKe97] stellen einen web-basierten Ansatz vor, der es dem Konstrukteur ermöglicht, direkt von seinem Arbeitsplatz auf die zur Auslegung von Zukaufteilen notwendigen Berechnungsroutinen zuzugreifen. Als Ergebnis erhält der Konstrukteur das nach seinen Wünschen und Anforderungen berechnete und gestaltete 3D-Modell. Ändern sich die Anforderungen zu einem späteren Zeitpunkt, muss der Auslegungsablauf erneut initiiert werden. Für viele Zukaufteile gilt auch heute noch, dass die Berechnung getrennt vom CAD-System bei den Zulieferunternehmen erfolgt. Bei Zukaufteilen, die nicht spezifisch ausgelegt werden, erfolgt die Auswahl i. d. R. über eine belastungsbezogene Auswahl aus Baureihen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

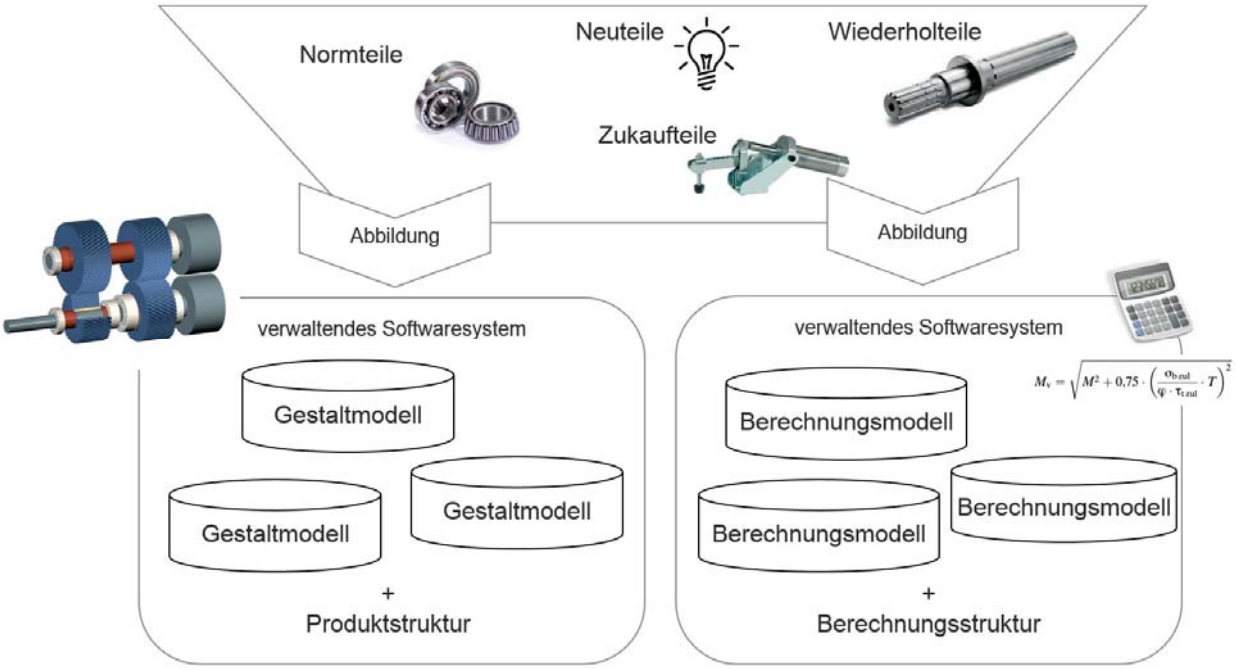


Abbildung 2-7: Abbildung der realen Konstruktionsobjekte über Modelle

Neuteile müssen fallabhängig gestaltet und berechnet werden. In diesem Fall ist also der Konstrukteur in der vollen Verantwortung die Modelle digital aufzustellen, wobei er hier sicherlich häufig bereits vorhandene Berechnungen nutzen und abändern kann. Vergleichbar mit der Produktstruktur ist es notwendig, eine Berechnungsstruktur zu erzeugen, die definiert, wie die Eingaben und Ergebnisse der einzelnen Berechnungen miteinander in Beziehung zu setzen sind.

2.4.2 Gestaltmodellierung in CAD-Systemen

Der Ursprung der CAD-Systeme lag in der computerunterstützen Erfassung von geometrischen Gebilden und deren Darstellung am Bildschirm. Um den Konstrukteur in Bezug auf Änderungsvorgänge und bei der Erzeugung von Varianten zu unterstützen, entstanden die heutigen parametrischen CAD-Systeme [Kö02]. Sie sind in den letzten Jahren zu komplexen Produktentwicklungswerkzeugen herangereift, die neben den geometrischen Modellierungsfunktionen vielzählige integrierte Zusatzfunktionen anbieten vgl. Abbildung 2-8.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

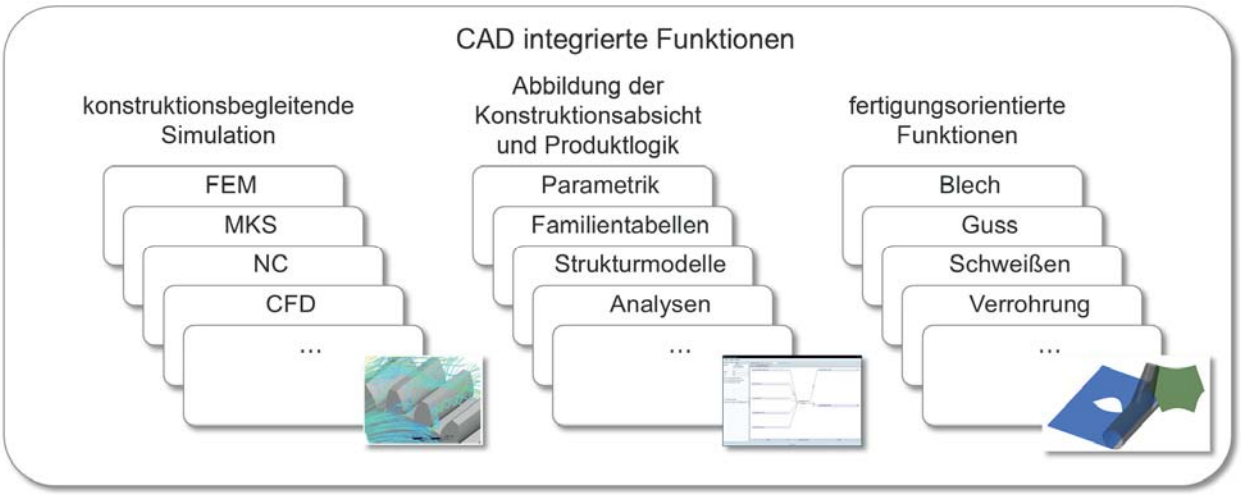


Abbildung 2-8: CAD-System als Produktentwicklungswerkzeug

Die CAD-Systemhersteller müssen ein breites Kundenspektrum bedienen, das von der Mikro- und Feinwerkstechnik (Uhren, Medizintechnik, Mobiltelefone, Unterhaltungselektronik, Optik etc.) über die Konsumgüterindustrie (z. B. Freizeitschuhe, Sportgräte, elektrische Rasierapparate etc.) bis zum Großanlagenbau (Flugzeuge, Verfahrenstechnische Anlagen, Braunkohlebagger etc.) reicht. Der klassische Maschinenbau, wie er häufig in mittelständischen Unternehmen betrieben wird, stellt also nur einen Ausschnitt dar.

2.4.2.1 Feature-Technologie

Die Definition des Produktmodells im maschinenbaulichen Umfeld erfolgt zumeist mit parametrischen CAD-Systemen über die Feature-Technologie. Viele Autoren haben bereits versucht, für den Begriff „Feature“ eine präzise einheitliche Definition zu formulieren. Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass der Feature-Begriff großen Interpretationsspielraum bietet. In der *VDI-Richlinie 2218* [VDI03b] wird die Feature-Technologie beschrieben. Zusammengefasst besteht der Nutzen von Features aus den folgenden Punkten:

- Aggregation von (Form-) Elementen (Flächen- oder Volumenverbänden) mit der Möglichkeit des Hinzufügens einer Semantik
- Abbildung und Wiederverwendung von Expertenwissen (Bindeglied zur Wissensverarbeitung)
- Integration rechnerunterstützter Prozessketten (CAD-CAM Kette), d. h. nicht nur Modellierungselemente zur Abbildung von Produkten, sondern auch von Prozessen

Der Feature-Begriff bildet demnach eine wichtige informationstechnische Grundlage in der durchgängigen Abbildung des Produktlebenszyklus. Unter Semantik wird die für die jeweilige Phase des Produktlebenszyklus interpretierbare Bedeutung des Features mit den jeweils damit verknüpften Informationen und Daten verstanden. Im Gegensatz dazu stehen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

die reinen Formfeatures, die geringen Informationsgehalt aufweisen und nur zur Geometrieerzeugung dienen. Im Kontext dieser Arbeit und bezogen auf die vier Konstruktionsphasen kann unter der Semantik die Ansammlung technischer, funktionaler und logischer Informationen verstanden werden, mit denen es möglich wird, auch den funktionalen Zusammenhang in der Baugruppe zu beschreiben. Das können z. B. Oberflächenbeschaffenheit, Behandlungsverfahren, Toleranzen, Belastungsgrößen, zulässige Festigkeitsgrenzwerte, Sicherheiten, etc. sein.

Der Grundgedanke der Feature-Technologie wurde insbesondere in den Jahren um 1990 stark geprägt (vgl. [SpKr97]). Seitdem wird sie immer wieder als Ausgangsprunkt für verschiedene Forschungsaktivitäten herangezogen. Häufig wird unter einem Feature in CAD-System lediglich eine einzelne Funktion, z. B. Extrusion verstanden, dabei ist die Definition im Forschungskontext wesentlich breiter aufzufassen. Zielsetzung vieler Forschungsaktivitäten ist die Bereitstellung der (firmenspezifischen) Feature in Bibliotheken, sodass der Konstrukteur die Modelle aus technologie- und funktionsvorgeprägten Elementen aufbauen kann [KrCi94]. Insbesondere in der Konzeptphase besteht noch mangelnde Feature-Unterstützung. BRUNETTI et al. stellen einen Ansatz vor, der dem entgegenwirkt [BrGo00]. Das System SYNFONIA verknüpft über Zuordnungsstrategien Funktions-Feature mit Prinzip-Modellen, um ein „Mensch“- zentriertes System bereitzustellen, das die kreativen Schritte des Konstrukteurs unterstützt.

HOFFMANN [Ho01] zeigt, wie durch die Feature-Technologie neben den geometrischen Informationen auch Berechnungswissen (sowohl numerisch als auch analytisch) und experimentell ermittelte Daten in das Konstruktionsunterstützungssystem „KoBo“ implementiert werden können. Je nach Hierarchiestufe der Features werden, ausgehend von elementaren Geometrie- und Belastungsdaten (niedrigste Stufe), einzelne Funktionsträger (Nabe, Welle) definiert, die zu Verbindungeinheiten (Passfederverbindung, Flanschverbindung) zusammengefügt werden können. Der Zusammenschluss der Verbindungseinheiten führt zu einer Kupplung der (in diesem Fall) höchsten Feature-Hierarchiestufe.

Für modularisierte Konstruktionen können die Features mit Datenbanken verknüpft werden. In Verbindung mit einem zu hinterlegenden Regelwerk können die im Konstruktionsprozess notwendigen Parameter aus der Datenbank entnommen werden. Hierzu notwendige Voraussetzungen, die Features bedarfsgerecht zu definieren, bestehen in allen leistungsfähigen CAD-Systemen [KöDa08].

2.4.2.2 Unterstützung methodischer und kreativer Schritte

Um dem Konstrukteur die zielgerichtete Arbeitsweise und ebenso eine schnelle Einarbeitung in verschiedene CAD-Systeme zu ermöglichen, versucht d*ie VDI-Richlinie 2249* [VDI03a] eine herstellerunabhängige Definition der Funktionen von CAD-Systemen bereitzustellen. Es werden u.a. Funktionsicons vorgeschlagen, damit CAD-Systeme bediener-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

freundlicher und einheitlicher werden. In der Praxis kann festgestellt werden, dass sich die Softwarehäuser nur bedingt an derartige Richtlinien halten und sich keine einheitlichen Regelungen abzeichnen. Auf der Benutzeroberfläche der CAD-Systeme dominieren in erster Linie die Formfeatures zur Geometrieerzeugung (Rotation, Extrusion, Zugkörper, Rundungen etc.), Bezugsfeatures (Koordinatensystem, Bezugsfläche etc.), Analysefeatures (Abstand, Krümmung, Flächeninhalt etc.) und fertigungsorientierte Features (Bohrungen, Rippe etc.). Die vielseitigen Anwendungsgebiete von CAD-Systemen haben dazu geführt, dass viele Funktionen für unterschiedlichste Teilprobleme integriert wurden. In *Creo2.0(PTC)* stehen knapp fünfhundert Funktionen in Form von Icons zur Verfügung, die in Symbolleisten und Werkzeugkästen eingebettet werden können. Es ist davon auszugehen, dass der Konstrukteur, der z. B. eine Sondermaschine zu entwickeln hat, die aus vielen Norm- und Zukaufteilen besteht, nur einen Bruchteil davon benötigt, zumal in vielen derartigen Konstruktionen bereits aufgrund der stets einzuhaltenden Fertigungsgerechtheit oftmals vergleichsweise einfache Formen angestrebt werden.

Die *VDI-Richtlinie 2249* sieht zur Integration einer funktionsorientierteren Denkweise bereits die Modellierungsmethode „Wirkkomplexe“ vor. Wirkkomplexe sehen vor, funktionale Einheiten z. B. ein Wälzlager mit Sicherungsring als Einheit zu platzieren. Zur Implementierung derartiger Methoden sind häufig Systemanpassungen notwendig. Ein Blick in viele Industrieunternehmen zeigt, dass derartige Methoden längst nicht durchgängig etabliert sind.

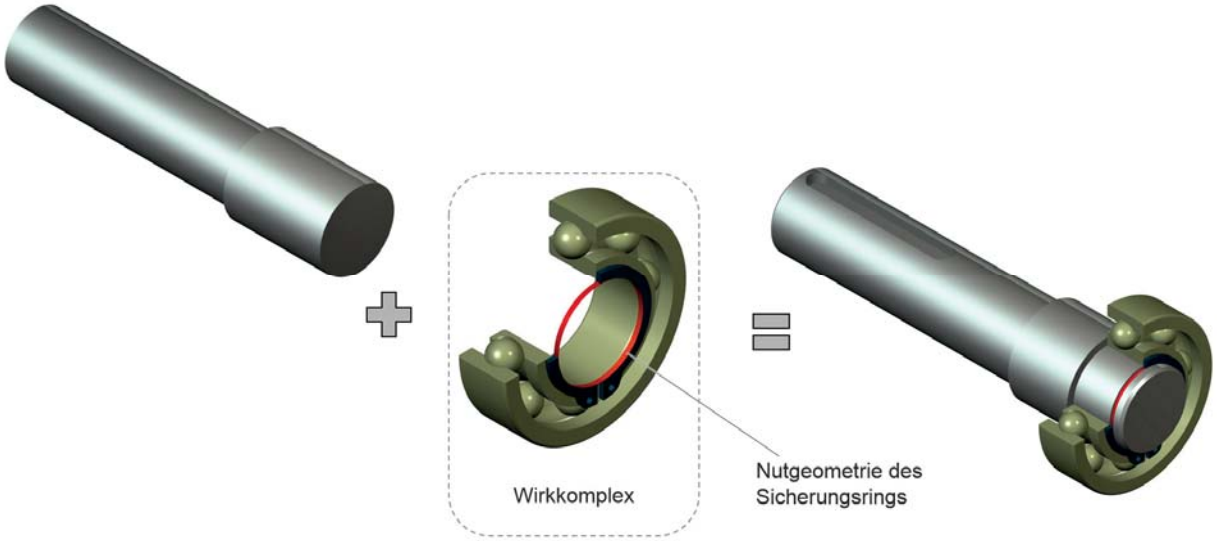


Abbildung 2-9: Modellieren mit Wirkkomplexen

Die vielschichtigen Restriktionen, die bedingt durch die in Kapitel 2.1 aufgezeigten „Gerechtheiten“ ohnehin zu berücksichtigen sind, werden ergänzt durch die Anforderung, die virtuellen Produktmodelle „modellierungsgerecht“ zu erstellen. Das soll heißen, dass wenn nicht schon in der frühen Phase damit begonnen wird, Klarheit über die Abbildung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

der Produktstruktur und Produktlogik zu gewinnen und eine geeignete und geordnete Modellierungs- und Referenzierungsmethodik gewählt wird, man Gefahr läuft, bei komplexeren Produkten unbrauchbare Modelle zu erzeugen. Insbesondere bei völlig neu zu entwerfenden Produkten oder Teilbereichen kann eine falsche Methodik schlussendlich mit der Konsequenz enden, die Modelle erneut von Grund auf neu erzeugen zu müssen. Daraus folgt, dass der Konstrukteur gezwungen wird, sich neben der eigentlichen Konstruktionsaufgabe auch mit Problemstellungen einer geeigneten rechnerinternen Abbildung zu beschäftigen, wodurch die kreativen gedanklichen Prozesse negativ beeinflusst werden können.

PACHE et al. [PaLi01] begründen durch psychologische Gesichtspunkte die Einschränkung der Kreativität beim Konzipieren im CAD-System. Sie bemängeln, dass die CAD-Systeme den Konstrukteur zu konkreten Festlegungen zwingen, die nicht seiner abstrakten, unscharfen und unvollständigen Lösungsidee im Kopf entsprechen. STABEROH et al. [StHü01] zeigen auf, welche Anforderungen aus der Industrie an CAD-Systeme bezüglich der Implementierung kreativerer Skizziermethoden bestehen. Einige der genannten Problemfelder bzw. erkannte Potentiale sind: Ersatz der Handskizzen durch elektr. Bleistift; Skizziermöglichkeiten in der Gesamtbaugruppe; schnelle Änderungsmöglichkeiten sind aufgrund der Referenzierungsabhängigkeiten problematisch; einfachere Gegenüberstellung verschiedener technischer Lösungsalternativen.

Um beim Skizzieren direkt dreidimensional agieren zu können, stehen 3D-Skizzierer im Blick der Forschungen, vgl. [Mü06]. Sie ermöglichen es, direkt die Handbewegung des Konstrukteurs aufzunehmen. Entscheidender Vorteil digitaler Skizzen ist die Möglichkeit, sie direkt als Grundlage für den späteren Entwurf zu nutzen.

ULLMANN [Ul02] analysiert die Anforderungen an zukünftige Konstruktionsunterstützungssysteme. Er leitet dabei Ansprüche bzw. Kategorien ab und vergleicht sie mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten im CAD-System. Er stellt fest, dass die CAD-Systeme hinsichtlich der informationstechnischen Möglichkeiten entwickelt worden sind und fordert, dass in Zukunft mehr auf die Ansprüche des Konstrukteurs eingegangen werden muss: „Previously CAD systems were developed to meet the computer‘s capability; (…) future CAD development needs to be driven form the “D“ and not from the “C“ in CAD where the “D“ is for design, or even more appropriately, “D“ stands for desinger.“

Die CAD-Systemhersteller sind in den letzten Jahren verstärkt gegen die genannten Problemfelder angegangen. Um dies weiter auszuführen, sollen zunächst kurz zwei grundlegende Modellierungsstrategien erläutert werden. Einerseits existiert das sog. direkte Modellieren, dem ein „schlankerer“ Ansatz zugrunde liegt, der die schnelle Geometrieerzeugung und Geometriemanipulationen zulässt; andererseits das parametrische Modellieren, das mit Feature und Parametrik viele Möglichkeiten zur Abbildung der Konstruktions-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

absicht und Produktlogik bereithält. Daraus lässt sich ableiten, dass für die kreative Phase des Konzipierens in einer Neukonstruktion das direkte Modellieren Vorteile mit sich bringt. Das parametrische Modellieren hingegen bietet Vorteile im Bereich der Automatisierung von Konstruktionsprozessen, wie sie bei der Variantenkonstruktion und in Teilbereichen der Anpassungskonstruktion vorkommen. Es zeichnet sich ein Trend ab, diese Ansätze zu integrieren und so eine Kopplung des direkten und parametrischen Modellierens zu erzielen. Durch Feature-Erkennung ist es heute möglich, die unparametrisierte Geometrie in parametrische Geometrie zu überführen. Ein beliebiger Wechsel der Modellierungsstrategien soll in Zukunft möglich sein. Beispiele dafür sind: *„Flexible Modeling Extension“* von *Creo(PTC)* oder *„Synchrounous Technology“* von *NX(Siemens)*. Bei detaillierter Prüfung zeigt sich jedoch, dass die Technologien bei komplexeren Geometrien an ihre Grenzen stoßen. Dennoch kann in Zukunft mit forcierteren Aktivitäten gerechnet werden, um dieses Potential weiter auszuschöpfen.

Die Erfassung eines Gedankens, der zu einer kreativen Idee für eine Teillösung werden kann, wird nicht zwangsläufig im Konstruktionsbüro aufkommen. Es wird in vielen Fällen sogar eher unwahrscheinlich sein. Auch hierfür werden bereits kommerzielle Lösungen angeboten. Mit den sog. *Autodesk Apps* stehen verschiedenste Handyapplikationen bereit, um auch entfernt vom Konstruktionsbüro jederzeit produktiv zu werden. Die Apps ermöglichen es beispielsweise, CAD-Modelle zu betrachten und ggf. mit Notizen zu versehen oder kinematische Zusammenhänge in Konzeptskizzen zu untersuchen, vgl. [Au14].

2.4.2.3 Parametrik, Konstruktionsabsicht und Produktlogik

Grundlage des parametrischen Modellierens ist die so genannte dimensionsgetriebene Geometrie. Dies bedeutet für den Konstrukteur, dass er den Entwurf skizzenhaft anlegen und später konkrete Werte festlegen kann. Die Festlegung einer Bemaßung entspricht der Vorgabe einer Randbedingung der Geometrie. Parameter und Geometrie stehen in direkter Verbindung zueinander [SpKr97]. Die rechnerinterne Beschreibung der Geometrie erfolgt analog zur mathematischen Beschreibung durch Punktmengen in der parametrisierten Form. Für eine Kurve gilt beispielsweise: $x=f(u)$, $y=f(u)$ und $z=f(u)$, wobei „u“ der freie Parameter ist. Abbildung 2-10 verdeutlicht den Vorteil der Parametrik bei der Abbildung technisch relevanter Kurven am Beispiel der Evolvente (α als freier Parameter).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

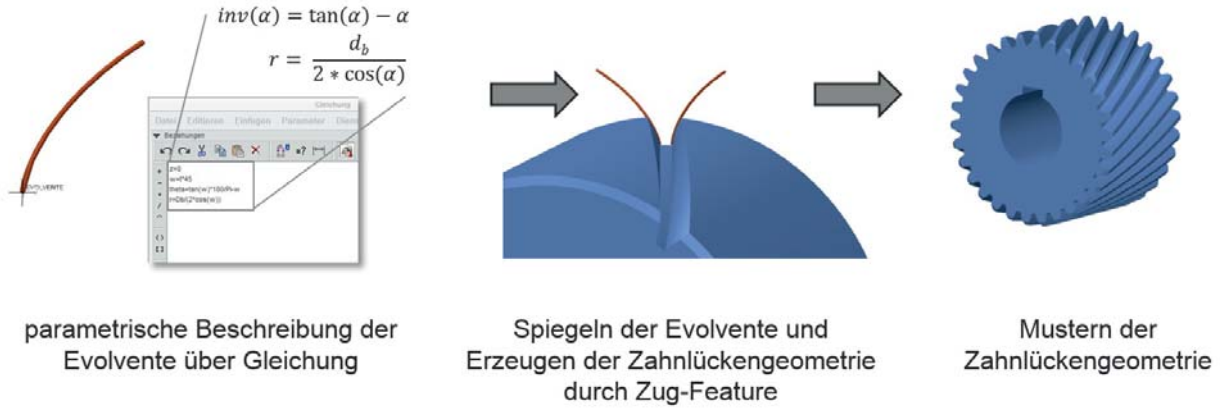


Abbildung 2-10: Anwendungsbeispiel für die Abbildung einer Kurve über die Parametrik

Die Festlegung der Form und Lage von geometrischen Objekten erfolgt über geometrische Randbedingungen, die auch Constraints genannt werden. Beispiele hierfür sind Punkt auf Linie, Parallelität oder Symmetrie. Die geometrischen Randbedingungen können ebenfalls in die Gleichungsform überführt werden. Die Berücksichtigung von funktionalen, technologischen und physikalischen Aspekten erfordert zusätzlich die Möglichkeit, funktionale Randbedingungen vorzugeben, um die Konstruktionsabsicht weitestgehend ganzheitlich erfassen zu können. Daher besteht in parametrischen CAD-Systemen die Möglichkeit, neben den geometrischen, auch funktionale Parameter und Randbedingungen anzulegen [SpKr97]. Abbildung 2-11 fasst diese Grundfunktionalität übersichtlich zusammen.

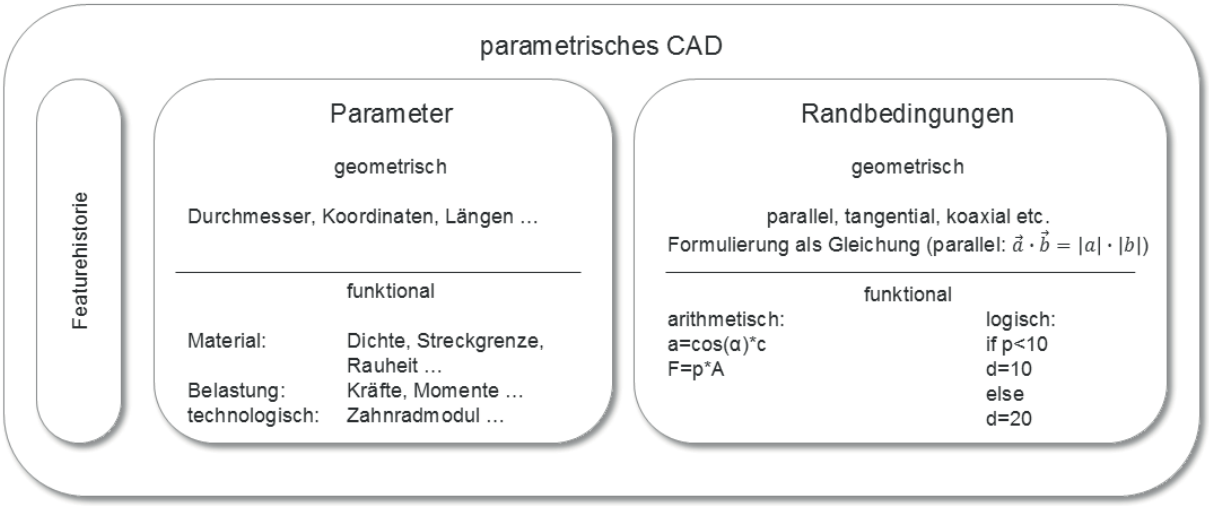


Abbildung 2-11: Grundfunktionalität parametrischer CAD-Systeme

Aus den Randbedingungen und Parametern ergibt sich ein Gleichungs- bzw. Ungleichungssystem, das folgende Eigenschaften annehmen kann [SpKr97]:

- überbestimmt – es wurden zu viele Constraints angegeben; Constraints sind von anderen Constraints abhängig

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- wohlbestimmt – es existiert eine endliche Anzahl von Lösungen bzw. genau eine Lösung
- unterbestimmt – es existiert keine eindeutige Lösung bzw. eine unendliche Anzahl von Lösungen

Der Begriff des parametrischen Modellierens wird häufig als Oberbegriff für die zwei grundsätzlichen Ansätze *„Parametric Design“* und des *„Variational Design“* verwendet. Die beiden Ansätze unterscheiden sich durch die Art der eingesetzten Algorithmen (sequentiell oder simultan) zur Lösung der entstehenden Gleichungssysteme bzw. Ungleichungssysteme. In modernen CAD-Systemen sind beide Ansätze systemtechnisch derart integriert, dass sich der Unterschied für den Konstrukteur nicht mehr erschließt [Fo03].

Die heutigen CAD-Systeme bieten nicht nur die Möglichkeit, die Konstruktionsabsicht innerhalb einer Komponente abzubilden, sondern lassen auch die Übertragbarkeit auf die gesamte Baugruppe zu. In den Systemen stehen dabei unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, um die Strukturmodelle (z. B. Skelettmodelle oder Layout-Technik) in einer Baugruppe zu definieren und so die gesamte Produktlogik zu erfassen. Die Produktlogik umfasst neben der reinen Produktstruktur auch die Mechanismen, die sicherstellen, dass beispielsweise Austauschvorgänge in einer Baugruppe regelbasiert ausgeführt werden können.

Als Endergebnis erhält der Konstrukteur ein Gestaltmodell, das seiner Ansicht nach den Anforderungen weitestgehend gerecht wird. Durch die Festlegung von Parametern und Randbedingungen konnte er die geforderten Funktionen in Gestalt überführen. Was dem Endergebnis im Nachhinein nicht entnommen werden kann, ist der Grund, warum diese Gestaltungsschritte so gewählt worden sind. Für den Fachkollegen, der dieses Modell ggf. weiterverwenden, ergänzen oder hinsichtlich neuer Anforderungen verändern möchte, fehlen Informationen, die den Zusammenhang zwischen Funktion und Gestalt herstellen, sodass die Nachvollziehbarkeit erschwert wird. Die einzige Möglichkeit, diesem Problem heute zu begegnen, ist die Möglichkeit, die Gleichungen und Feature mit Kommentaren zu dokumentieren.

2.4.2.4 Neutrale Datenformate

Neutrale Datenformate müssen heute nicht nur den Datenaustausch zwischen zwei CAD-Systemen sicherstellen, sondern auch andere Bereiche bedienen. Dies können sein: Viewing (z. B. Visualisierung der CAD-Daten in nicht technischen Abteilungen), Weiterverwendung der CAD-Daten (z. B. Digital Mock-Up, FEM etc.), Integration in PLM-Konzepte oder die Archivierungsmöglichkeiten (Sicherstellung, dass die Daten auch nach vielen Jahren noch verwendbar sind). „Neutrale 3D-Formate sind unverzichtbar für die Verteilung und den Austausch von 3D-Modellen im Engineering und in benachbarten Bereichen, wenn

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

das Originalsystem nicht zur Verfügung steht (...). Welches neutrale 3D-Format für ein Unternehmen das Richtige ist, wird von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt." [Pr11]. Generell erfolgt die Speicherung der in Softwaresystemen eingegebenen und ausgewerteten oder berechneten Daten über Dateien. Ein Dateiformat definiert dabei die Syntax und Semantik der in der Datei enthaltenen Daten. Eine grundsätzliche Unterscheidung kann in Binär- und Textformate erfolgen[2]. Textdateien repräsentieren im Klartext lesbare ASCII-Zeichenfolgen. Binärdateien enthalten Bit-Muster und bieten im Vergleich verbesserte Speicherungsmethoden. Native CAD-Daten werden i. d. R. über Binärdateien abgelegt; die verwendeten Datenformate zur Speicherung der Modelle orientieren sich an den verwendeten Geometriekernen. Aufgrund der fehlenden Codierschemata (aus Sicht anderer Softwarehersteller) können diese Daten zunächst nur vom Autorensystem interpretiert werden. Nur über Standardisierungsvorgänge kann erreicht werden, dass sich diese Daten auch von anderen Softwaresystemen nutzen lassen [GrAn90]. Man spricht von neutralen Formaten oder Austauschformaten. Verbreitete Austauschformate, die auf Textdateien basieren, sind z. B.: IGES, STEP, 3D-XML und STL. Es existieren aber auch Austauschformate im binären Format, z. B.: JT und U3D. Der Einsatz von Austauschformaten unterstützt gemeinschaftliche Entwicklungsprozesse zwar grundsätzlich, der irreversible, verlustbehaftete Umwandlungsprozess vom nativen Format in das Austauschformat wirkt dem jedoch aufgrund des Informationsverlustes (Feature, Modellhistorie und insbesondere die Produktlogik und Konstruktionsabsicht) in gewisser Weise entgegen. Aus den vielen vorhandenen und unterschiedlichen neutralen Formaten sind die STEP-Daten hervorzuheben. Die sog. Anwendungsprotokolle (AP) definieren einen Standard, der auf Anwendungsbereiche abgestimmt ist, z. B.: AP212 für die elektrotechnischen Bereiche oder AP214 für den Automotive-Bereich und die mechanische Konstruktion. STEP wird laufend weiterentwickelt. Derzeit läuft die Zusammenfassung der AP 203 und AP 214 zum AP 242, um einen gemeinsamen Standard für die Branchen Luftfahrt und Automotive zu schaffen [Pr14b].

Die Bereitstellung von Zulieferteilen bzw. deren Produktmodelle erfolgt heute in verschiedenen neutralen Datenformaten über die Hersteller bzw. deren Internetseiten (dies gilt z. B. für Standardgetriebe, Pneumatikzylinder, E-Motoren, Kupplungen etc.). Da Zulieferfirmen ihre Modelle für Kunden mit verschiedenen Softwarewerkzeugen anbieten müssen, wird i. d. R. mit neutralen Austauschformaten gearbeitet. Selbst wenn native Daten angeboten werden, beinhalten diese häufig nur importierte Geometrie, die auf nativen Daten beruht. Die Modelle beinhalten häufig nur das geometrische Modell in Nennmaßausprägung, obwohl selbst die Austauschformate mit zusätzlichen Informationen angereichert werden könnten. Funktionale Informationen wie Leistungsdaten, Maximallasten, Toleranzen, Oberflächenbeschaffenheiten oder Anforderungen an andere Komponenten oder die

[2] Die Unterscheidung in binär- und Textdatei wird für Kapitel 4 noch mal von Bedeutung sein

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Konstruktionsabsicht werden im Modell gewöhnlich nicht abgebildet. Dies ist zwar zum Teil aus Datenschutzgründen gewollt, als Nachteil für den Konstrukteur ergibt sich jedoch, dass er sich die notwendigen Informationen separat beschaffen muss. Daher sind hier in Zukunft neue Methoden zu entwickeln, um dieser Problematik zu begegnen, vgl. [KiMu10]. Defizite bestehen also darin, wie die notwendigen teilespezifischen Informationen dem Konstrukteur angeboten werden und wie sie auf den konkreten Baugruppenzusammenhang übertragen bzw. zwischen den Komponenten ausgetauscht werden können.

STRAßMANN [St11] stellt fest, dass trotz Weiterentwicklung der neutralen Datenformate die übergreifende Nutzung von Daten in unterschiedlichen CAD-Systemen immer noch unbefriedigend gelöst ist. Die Praxis zeigt, dass viele Konstrukteure einen großen Problembereich im Konstruktionsalltag darin sehen, sich in die bestehenden CAD-Konstruktionen von Kollegen hineinzudenken und diese ändern zu müssen. Auch hier setzen die CAD-Systemhersteller mit der bereits erwähnten Kopplung der direkten und parametrischen Modelliertechnik an, um den Konstrukteur zu unterstützen.

DYLA [Dy02] und JAROŠ [Ja07] führen die Möglichkeiten von STEP bezogen auf den allgemeinen Produktentwicklungsprozess auf und validieren die Anwendbarkeit am Beispiel der Zahnradgetriebeentwicklung. Sie leiten aus ihren Arbeiten im Zusammenschluss mit weiteren Forschungsstellen und Ausschüssen das VDMA-Einheitsblatt 23900 [VD09] ab, das ein zentrales Produktmodell für Getriebe bereitstellt. Es können z. B. auch funktionale Beziehungen zwischen den Getriebekomponenten und sämtliche belastungsrelevante Größen abgebildet werden. Aus diesen Aktivitäten soll in Zukunft ein einheitliches neutrales Format für ein vollständig determiniertes Getriebeproduktmodell resultieren, das zum Informationsaustausch zwischen sämtlichen in der Getriebeentwicklung eingesetzten Softwaresystemen verwendet werden kann.

KLOSE et al. halten 1997 fest, dass der Austausch der reinen Geometriedaten mit Austauschformaten wie IGES oder STEP, sowie im Bereich der FEM-Berechnungen zumindest teilweise befriedigend gelöst ist, im Bereich der produktspezifischen Berechnungsverfahren die Schnittstellendefinitionen aufgrund der Vielfalt und Spezifik der Berechnungsmodelle jedoch fehlen [KlRo97]. Bis heute muss dieser Missstand angemerkt werden, wie in Kapitel 4 noch weiter herausgearbeitet wird.

2.4.3 Berechnungsmodelle und -software

Generell wird ein Berechnungsmodell aus dem Zusammenwirken der folgenden drei grundsätzlichen Größen bestimmt:

- Geometriegrößen (Durchmesser, Längen, Lastangriffsstellen, Oberflächengeometrie, Kerbformen etc.)
- Werkstoffgrößen (Festigkeitswerte, Kerbempfindlichkeit etc.)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Belastungsgrößen (Kräfte, Momente und deren zeitliche Abhängigkeit etc.)

Da die genannten Größen nicht exakt für die gesamte Produktlebenszeit vorhergesagt werden können, werden i. d. R. zusätzliche Unsicherheitsfaktoren in die Berechnung einbezogen. Dimensionierungsrechnungen dienen der groben Vorauswahl geometrischer Größen, Festigkeitsnachweise dem endgültigen Nachweis der Konstruktionskomponenten. Insbesondere die Geometriegrößen entscheiden darüber, ob es sich um ein Festigkeitsproblem (Zug, Druck, Biegung etc.) oder Stabilitätsproblem (Knicken, Beulen, Kippen etc.) handelt, das zu lösen ist [HoMe12b]. Welches Werkzeug zur Durchführung der Berechnung herangezogen wird, hängt entscheidend von der Berechnungsaufgabe ab. In Anlehnung an VDI-Richtlinie 2211 [VDI03c] können die wichtigsten in der Konstruktion eingesetzten kommerziellen Softwarewerkzeuge grob klassifiziert werden:

- Mathematiksoftware, z. B.: *Mathcad(PTC)*, *Maple(Maplesoft)*, *Matlab(Mathworks) Dymola(Dassault Systèmes)*
- Tabellenkalkulation, z. B.: *Excel(Microsoft)*, *Calc(OpenOffice)*
- Branchen- und produktspezifische Berechnungssoftware: MEPB, z. B. *Mdesign(Tedata)*, *Kisssoft(Kisssoft)*, *Hexagon(Hexagon), APM(APM);* Druckbehälter, z. B.: *Dimy(Tüv)*; Apparate, z. B.: *Microprotol(Bentley)*
- Individualsoftware als firmenspezifisch programmierte Eigenentwicklungen
- Numerische Softwaresysteme zur Struktur- und Strömungsberechnung, z. B.: *Ansys(Ansys)*, *Nastran(MSC)*
- Software zur Produktoptimierung, z. B.: *Optislang(Ansys)*, *Tosca(Dassault Systèmes)*, *Altair(Hyperworks)*

Diese Softwaregruppen haben sich durchgesetzt und bilden den de facto-Standard im Konstruktionsalltag und zumindest einige davon werden nahezu in allen Konstruktionsarbeitsplätzen eingesetzt. Grundsätzlich ist der Berechnungsablauf nach [Kö02] durch folgende Schritte charakterisiert:

- Aufgabe identifizieren
- Berechnungsmethode auswählen
- Berechnungsmodell aufbauen
- Berechnung durchführen
- Berechnung auswerten

Generell ist abzuwägen, ob Vorteile einer hochgenauen und damit zeitintensiven und kostenintensiven Analyse nicht durch die häufig nur ungenau mögliche Vorhersage der tatsächlich auftretenden Belastung kompensiert werden. Hier ist also der Konstrukteur

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wieder in der Verantwortung. MEERKAMM et al. [MeHe99] weisen explizit darauf hin, wie wichtig der Einsatz von Berechnungswerkzeugen in möglichst frühen Stadien der Konstruktion ist, um frühzeitig die Zusammenhänge zwischen gestalterischen Ausprägung der Beanspruchung bestimmen bzw. abschätzen zu können.

Es können aber auch gegenteilige Tendenzen angeführt werden. „Angesichts der massiven Maker-Subkultur, die auf der Idee basiert, dass jeder ein Produkt erfinden und bauen kann (…) Makers setzen auf Kreativität, Iteration und Glück, um funktionierende Entwürfe zu erhalten. Ingenieure halten es genauso, verlassen sich bei ihren Entscheidungen aber eher auf ein hervorsehbares Verhalten (…) Kernstück dieser wichtigen Unterscheidung bilden die Konstruktionsberechnungen.“ [Li13]. Bemerkenswert ist, dass sich hierzu Parallelen im Bereich der Konstruktionsmethodik ziehen lassen. Laut FELDHUSEN kann Opportunismus als Trend beobachtet werden: „Was weiterbringt wird gemacht“ [Fe13]. Demzufolge sind heute auch sehr pragmatische Arbeitsweisen vertreten. AMFT [Am02] hat über eine Umfrage innerhalb verschiedener Industrieunternehmen bestätigt, dass der Großteil der eingesetzten Konstruktionsberechnungen auf relativ einfachen Grundrechenarten basiert. Komplexe Berechnungen (z. B. das Lösen von Integralen oder Differentialgleichungen) sind vergleichsweise selten nötig. Dies könnte auch darauf zurückzuführen sein, dass komplexe Berechnungen bereits in Softwarewerkzeugen implementiert sind und sich dem Konstrukteur somit in einer gewissen Weise verbergen.

Die speziell für Maschinenelemente entwickelte Berechnungssoftware *Mdesign*(*Tedata)* wird nach ihren eigenen Firmenangaben von derzeit mehr als 30.000 Konstrukteuren weltweit verwendet [MD13]. Mathematiksoftware hingegen stellt die elementarste Form der Berechnungswerkzeuge dar. Mit ihnen ist es ebenso möglich, z. B. mechanische Festigkeitsberechnungen umzusetzen oder auch die auf Normen und Fachliteratur basierenden Maschinenelementeberechnungen durchzuführen. *Tedata* bietet neben *Mdesign* auch fertige Bibliotheken zur Maschinenelementeberechnung auf Basis der Mathematiksoftware *Mathcad(PTC)* an [Ko13]. NAHRSTEDT [Na11] zeigt an vielen Beispielen, welches Potential *Excel(Microsoft)* in Verbindung mit Makroprogrammierung bietet, technische und physikalische Problemstellungen zu lösen. Berechnungswerkzeuge für analytische Konstruktionsberechnungen stehen daher genügend zur Verfügung. Welche Berechnung mit welcher Software umgesetzt werden kann und welche Vorteile und Nachteile sich in Bezug auf Leistungsfähigkeit, Bedienbarkeit und insbesondere der Automatisierbarkeit (in Variantenkonstruktionen) ergeben, ist von vielen Faktoren abhängig. In der Praxis ist der Konstrukteur gezwungen, die Verwendbarkeit einzuschätzen oder verwendet direkt die Software, über die er das meiste Wissen besitzt.

Analytische versus numerische Berechnungen: Die numerischen Berechnungswerkzeuge (insbesondere die FEM) dringen heute verstärkt in die Konstruktionsabteilungen ein. Nahezu jedes leistungsfähige CAD-System bietet entsprechend integrierte Applikationen (vgl.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abbildung 2-8) an. Es könnte sogar der Eindruck entstehen, als wären die früher üblichen analytischen Berechnungsverfahren verdrängt worden. Und dies, obwohl die analytischen Berechnungen, deren Ablauf in Normen festgelegt ist, nach wie vor das juristisch belastbare Verfahren sicherheitsrelevanter Bauteile darstellt. Nur sukzessiv erfolgt die Anerkennung der numerischen Berechnungsverfahren als belastbares Nachweisverfahren. Ein Beispiel dafür ist die *VDI-Richtlinie 2230* [VDI11], die sich auf die numerische Berechnung hochfester Schraubenverbindungen konzentriert und sicherstellt, dass das Pre- und Postprocessing nach vordefinierten Standards ausgeführt werden. Das „Problem" der numerischen Methode resultiert derzeit aus der hohen Anzahl subjektiver Einflussfaktoren, die während der Durchführung der Analysen getroffen werden müssen. Auch wenn allgemeingültige Methoden zur Bewertung und Durchführung der Analysen bestehen, müssen vom Konstrukteur u.a. folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie sind die Randbedingungen festzulegen?
- Welches Materialmodell ist zu wählen und inwiefern entspricht es der Realität?
- Wie detailliert ist das Geometriemodell zu erstellen?
- Berücksichtigung linearer oder nichtlinearer Eigenschaften?
- Ist die Diskretisierung „fein" genug?
- Welche Spannungen sollen zur Bewertung herangezogen werden?

Als Ergebnis ist also aufgrund des Ansatzes und der Personenabhängigkeit stets eine Näherungslösung zu erwarten. Auch die „reinen" analytischen Ansätze[3] liefern aufgrund idealisierter Annahmen ebenfalls stets nur eine Annäherung des realen Verhaltens. Hinzu kommt die Abweichung durch unscharfes Ermitteln von z. B. Korrekturfaktoren (Kerbwirkungszahlen, Stützziffern, Größeneinflussfaktoren etc.), was durch Ablesen aus Diagrammen erfolgt.

Sowohl von der Durchführung als auch vom Ergebnis her stehen numerische und analytische Methoden in keiner direkten Beziehung. Die analytischen Rechenwege liefern in der Regel wenige Kennwerte und somit klare Aussagen, die zur Bewertung herangezogen werden können. FEM-Analysen hingegen liefern breite Lösungsfelder. Im Allgemeinen sind dies Spannungsverteilungen, die zunächst einmal geeignet zu interpretieren sind [Pr13]. Anschließend ist es gewöhnlich notwendig, mit Hilfe der ermittelten Spannungen einen Betriebsfestigkeitsnachweis, z. B. nach der FKM-Richtlinie zu führen.

[3] Damit sind Berechnungen nach DIN, ISO, VDI oder Fachliteratur gemeint.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Bezug auf Problemstellungen, die sich über beide Methoden lösen lassen, bringen die analytischen Methoden ohne Anspruch auf Vollständigkeit folgende Vorteile gegenüber den numerischen Methoden mit sich:

- vor dem Hintergrund der Produkthaftung sicherheitsrelevanter Bauteile uneingeschränkt belastbar,
- die analytischen Ansätze bieten verhältnismäßig leichten Zugriff auf die Ergebnisse jahrzehntelanger experimentell validierter Forschungsergebnisse,
- strukturierte, reproduzierbare, personenunabhängige Ergebnisse sowie
- Berechnungsaufwand in der Regel geringer als die umfangreiche FEM-Modellbildung.

Da numerische Methoden aber den Zugang zu Problemen eröffnen, die analytisch nicht erfassbar sind, bieten sie in Abhängigkeit der Problemstellung dennoch ein hohes Potential, das nicht ungenutzt bleiben darf. Zuverlässige FE-Analysen werden jedoch nach wie vor einen hohen Anteil an Expertenwissen fordern und damit die Notwendigkeit eines spezialisierten Berechnungsingenieurs.

MEBP, die an dieser Stelle als Beispiel für Programmsysteme dienen sollen, in denen die analytischen Berechnungen aus Normen digitalisiert wurden, stellen heute einen hohen Leistungsumfang bereit. Die früheren, rudimentären und bedienerunfreundlichen Programme sind zu komplexen bedienerfreundlichen Systemen herangereift. Sie bieten interaktive Unterstützung bei der Dimensionierung und Nachrechnung von grundlegenden Maschinenelementen. Sie beinhalten umfangreiche Datenbanken (z. B. für Wälzlager oder Materialparameter), Hilfestellung bei der Festlegung von Konstruktionsparametern, integrierte Nachschlagewerke, Entscheidungshilfen und weitere interaktive Systemunterstützung. Dem Konstrukteur wird mit dieser Software also eine breite Wissensbasis zur Verfügung gestellt.

Bei den MEBP zeichnen sich zwei Trends ab: Zum einen wird angestrebt, FEM und klassische Maschinenelementeberechnung zu integrieren, zum anderen wird versucht, ein Maschinenelement nicht mehr für sich zu betrachten, sondern im Kontext des Gesamtsystems zu sehen, vgl. [BeKi01], [Be12].

Integration von FEM und MEBP: Mit Hilfe der FEM werden die Spannungen ermittelt; auf Basis der Spannungen wird dann der Festigkeitsnachweis nach FKM-Norm geführt. So wird die Stärke des jeweiligen Ansatzes ausgenutzt, um die jeweiligen Defizite zu eliminieren. Für den Benutzer sind die im Hintergrund laufenden FE-Analysen nicht wahrnehmbar [Be12]. Das Projekt „ParaFEM“ widmet sich ebenfalls dem Angleichen von Auslegungsrichtlinien und den FEM-Berechnungen, um eine Basis für die parameterbasierte algorithmische Umsetzung der Auswertungen von FE-Analysen zu realisieren [NiBe11]. Auch diese Aktivi-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

täten verdeutlichen die Zielsetzung, die Ergebnisauswertung numerischer Analysen auf wenige, eindeutig identifizierbare Kennzahlen zu beschränken. In Zukunft ist es daher wahrscheinlich, dass der Konstrukteur FE-Berechnungen für bestimmte Konstruktionskomponenten wie analytische Berechnungen behandeln kann.

Ganzheitlicher Systemgedanke: Der Nachteil der üblichen MEBP ist die isolierte Betrachtung einzelner Komponenten. Daher zeichnet sich der Trend ab, die einzelnen Module innerhalb einer Systemumgebung miteinander zu koppeln. Für den Bereich der Getriebe gelingt dies bereits und es werden kommerzielle Lösungen angeboten, wie: *Kisssys(Kisssoft)*, *Gearbox(Tedata)* oder *TBK(GWJ)*. Bei Programmen dieser Art kann die Berechnungsstruktur der Getriebe mit abgebildet werden. Bemerkenswert ist, dass versucht wird, eigenständig „Modellierungsumgebungen“ zu definieren. Über Funktionen, die stark an die Feature-Technologie im CAD-System erinnern, wird das Getriebemodell aus Belastungs-, Werkstoff- und Geometriedaten definiert. Vergleichbare Tendenzen können auch bei den branchenspezifischen Behälter- und Apparateberechnungssystemen beobachtet werden. Im Kontext aktueller Entwicklungen ist jedoch ein Produktmodellansatz zu favorisieren, bei dem CAD-Datenmodelle eine zentrale Stellung einnehmen. Aufgrund des hohen Aufwandes ist es aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend, die Auslegungsprogramme zu vollwertigen CAD-Systemen auszubauen. Also bleibt nur der Datentransfer, der die bereits erwähnten Informationsverluste zur Folge hat.

Zwischenfazit: Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass heutige CAD-Systeme sehr umfangreiche Möglichkeiten bereitstellen, Gestaltmodelle zu erzeugen und zu manipulieren. Um den Konstruktionserfolg sicherzustellen, bleibt es von zentraler Bedeutung, die Konstruktionsabsicht frühzeitig digital zu erfassen und über die Konstruktionsphasen hinweg zu erhalten. Die zur Sicherung der Konstruktionsabsicht notwendige Semantik kann in CAD-Systemen abgebildet werden. Auch auf der Berechnungsseite stehen dem Konstrukteur zahlreiche Werkzeuge zur Verfügung. Welches Softwarewerkzeug zu nutzen ist, muss im Kontext der aktuellen Konstruktionsprozessanforderungen gesehen werden. Derzeitiger Forschungsbedarf besteht in der Berücksichtigung funktionaler, logischer und berechnungsrelevanter Aspekte direkt im CAD-System.

2.4.4 Verknüpfung von Gestalt- und Berechnungsmodellen

Bereits die allgemeingültigen Interpretationen der Begriffe lassen darauf schließen, dass sich diese beiden „Welten“ nicht ohne weiteres in Einklang bringen lassen.

- „Gestaltung“ – impliziert freies, künstlerisches Festlegen von Formen und
- „Berechnung“ – impliziert die klare mathematische Beschreibung von Zusammenhängen durch Gleichungen und Formalismen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Jahr 1994 wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ein Schwerpunktprogramm zum Thema „Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung“ beschlossen, um Ansätze zur Verbesserung des Zusammenwirkens von Gestaltungs- und Berechnungsprogrammen zu finden. Eine Übersicht der Teilprojekte und der insgesamt 29 Forschungsstellen findet sich u.a. in [Me99]. Grundsätzlich zielt die Kopplung von Gestaltung und Berechnung darauf ab, Möglichkeiten bereitzustellen, die es erlauben, sowohl im Gestaltmodell als auch im Berechnungsmodell Variationen durchzuführen, sodass die Auswirkungen automatisiert in das jeweils andere Teilmodell übertragen werden. Die Herstellung der Konsistenz zwischen den beiden Modellen soll also nicht in der Verantwortung des Konstrukteurs liegen, sondern vom Softwaresystem übernommen werden.

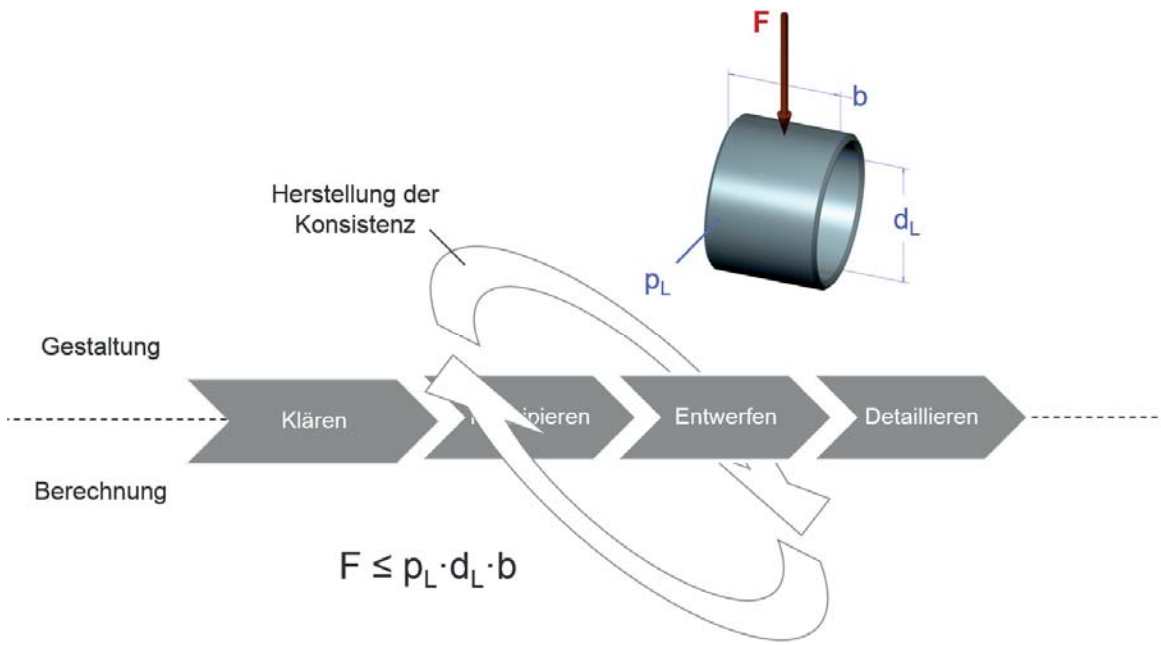


Abbildung 2-12: Integration von Gestaltung und Berechnung in Anlehnung an [LiAm00]

AMFT [Am02] hat einen entscheidenden Beitrag zur Analyse der Zusammenhänge und Problemfelder einer bidirektionalen Kopplung geliefert. Unter Berücksichtigung der Konstruktionsphasen geht er ausführlich auf bestehende Problemfelder ein. Die Arbeit verdeutlicht, dass die durchgängige bidirektionale Kopplung von Gestaltung und Berechnung in ihren Anfängen steht. Als grundlegenden Ansatz schlägt er vor (S.87), alle Parameter einer Konstruktion (geometrisch als auch nicht geometrisch) sowie deren Berechnungsvorschriften in einem ganzheitlichen Gleichungssystem abzubilden. Er fordert einen leistungsstarken mathematischen Gleichungslöser, der die Möglichkeit bereitstellt, nach allen Parametern auflösen zu können. Aufgrund der hohen Anzahl der zu berücksichtigenden Parameter kann von einer entsprechend hohen Komplexität des Gleichungssystems

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

und einer eher mathematisch abstrakten Behandlung der Konstruktionsaufgabe ausgegangen werden.

Die Vorstellung und Qualifizierung von heutigen Methoden und Möglichkeiten zur Kopplung von analytischen Berechnungen mit dem CAD-System ist Bestandteil dieser Arbeit und wird daher in den folgenden Kapiteln aufgegriffen und vertieft. An dieser Stelle sollen dennoch einige exemplarische Beispiele vorgestellt werden, welche die Dringlichkeit, Praxisrelevanz und die unzureichenden Möglichkeiten im Bereich der Modellkopplung insbesondere mit neutralen Datenformaten unterstreichen.

WECK et al. [WeDa97] widmen sich der Thematik, einen „integrierten Konstruktionsarbeitsplatz“ für den Konstrukteur bereitzustellen. Dazu nutzen sie MKS-, FEM-, CAD- und Regelungstechniksoftware in Kombination Maschinenelementeberechnungen. Sie halten fest: „Zwar steht mit STEP eine standardisierte Möglichkeit zur Verfügung, 3D-Modelle mit verschiedenen Systemen austauschen zu können, eine Integration von Auslegungs- und Berechnungswerkzeugen ist – wenn überhaupt – nur auf Dokumentenbasis möglich.“

WELP et al. [WeBr97] stellen als Lösungsansatz einen sog. objektorientierten Integrationsprozessor vor, der als Kopplungsbaustein zwischen kommerziellen CAD-und Berechnungssystemen agieren soll. „Im Sinne einer effektiven Kopplung ist schlussendlich ein bidirektionaler Datenfluß anzustreben (…). Vor diesem Hintergrund sollte beispielsweise infolge der durchgeführten Nachweisrechnung die Änderung einer Kerbgeometrie innerhalb des Berechnungssystems derart möglich sein, dass die unter Integritäts- und Konsistenzgesichtspunkten notwendigen Anpassungen innerhalb des CAD-Systems automatisch durchgeführt werden.“

CHRIST [Ch99] widmet seine Arbeit der programmtechnischen Verknüpfung der Insellösungen in der Entwicklung von Planetengetrieben. Er kommt zu der Zusammenfassung: „liefert einen Lösungsweg für die Problemstellung, externe Berechnungsprogramme, die in Form von „Insellösungen“ vorliegen, mit dem Erfahrungswissen des Konstrukteurs und einem CAD-System zu verknüpfen. Da mit der ISO 10303 die Parametrik der Bauteile zur Zeit noch nicht konserviert werden kann (…). Durch die Entwicklung von Algorithmen ist es nun möglich, die Geometrie beliebig konstruierter Maschinenteile (…) deren Parameter zu extrahieren und an die Berechnungsprogramme zu übergeben. Erst durch dieses Analysewerkzeug ist ein bidirektionaler Datenaustausch zwischen Berechnungsprogramm und dem CAD-System gewährleistet.“

WORTBERG et al. [WoSa09] stellen ein Konzept zur Kopplung der drei Domänen CAD, Strömungssimulation und Optimierungssoftware zur Formfindung verbesserter Strömungskanäle von Kunststoffextrusionswerkzeugen vor. Hier erfolgt der parameterbasierte Austausch von Daten ausschließlich über Lese- und Schreibvorgänge von ASCII-Textdateien und entsprechenden Systemaufrufen. „Derzeitige Trends in der Softwareent-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wicklung führen zu einer immer stärkeren Integration von Anwendungsprogrammen in das CAD-System (…) Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Vermeidung des Schnittstellenproblems, das sich durch die Nutzung von Insellösungen ergibt. Bei einer integrierten Anwendung basieren alle Daten der unterschiedlichen Anwendungsmodule auf demselben Datenmodell."

BÖHME et al. [BöLi12] koppeln *Inventor(Autodesk)*, *Excel(Microsoft), Creo(PTC)* und *Ansys(Ansys)* zur Auslegung von stationären Wirbelschichtfeuerungsanlagen und bestätigen die Unzulänglichkeiten neutraler Formate und die Bevorzugung von parameterbasierten Konzepten: „Die Verwendung von Austauschformaten bedingt in der Regel immer noch den Verlust der Parametrierung (…). Die vorgestellte Methode verwendet eine gemeinsame Parameterbasis (…) verzichtet dabei auf den Austausch von Geometriemodellen und gibt lediglich Parameter weiter, die von den inhomogenen Anwendungen genutzt werden können".

Ein Trend, der ebenfalls im Bereich der Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung eingeordnet werden kann, verbirgt sich hinter dem sog. RFLP-Ansatz. Wobei RFLP für „Requirements, Functional, Logical and Physical" steht und den ganzheitlichen Systemgedanken unterstützen soll. Speziell der Softwarehersteller *Dassault* Systèmes fokussiert mit dem Modul BDM "Dynamic Behavior Modeling" diesen Ansatz. Hinter BDM verbirgt sich die Integration der Berechnungs- und Simulationsumgebung *Dymola(Dassault Systèmes)* (basiert auf der Modellierungssprache Modelica) direkt in die *CatiaV6(DassaultSystèmes)* Oberfläche[4]. *Dymola(Dassault Systèmes)* erlaubt eine mit *Mathlab/Simulink(Mathsoft)* vergleichbare Modellbildung mittels grafischer Blöcke. KLEINER und KRAMER [KlKr12] gehen auf die Kopplung zwischen dem CAD-Modell und dem Berechnungsmodell ein: „Dazu wird (…) ein 3D-CAD Modell erstellt. Auf Basis der CATIA-Modelica-Integration (…). Änderungen am CAD-Modell haben somit direkten Einfluss auf das Simulationsmodell und sind vollständig mit der logischen Systemverhaltensbeschreibung im integrierten Informationsmodell verknüpft." Gall [Ga11] stellt diesbezüglich Vergleichbares fest: „Mit der Integration von DYMOLA in CATIA wird die direkte Verknüpfung von CAD-Modellen möglich. (…) die aktuelle Kopplung zwischen DBM und CATIA. In DBM besteht Zugriff auf die „Knowledge Parameter" des CATIA-Modells.". Darüber hinaus merkt er an, dass auch bei der integrierten Lösung der Informationsaustausch (z. B. Zustandsgrößen) zwischen den Modellen über einen Parameteraustausch realisiert wird.

Zwischenfazit: In Teilbereichen bzw. speziellen Problemfeldern ergaben sich insbesondere aus dem DFG-Schwerpunktprogramm Lösungsansätze zur Verknüpfung entsprechender Softwarewerkzeuge, die allerdings noch keine breite Durchsetzung fanden. Dies kann

[4] Auch dies ist ein Beispiel dafür, dass die Integration eher gelingt, wenn die Softwaresysteme von einem Hersteller stammen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

auf die fehlende Anpassungsfähigkeit der Datenmodelle, vor allem in den kommerziellen Berechnungssystemen, zurückgeführt werden. Auch die Datenmodelle in einigen CAD-Systemen ließen damals nur beschränkte Anpassungen bzw. Erweiterungen zu. Kritisiert wurden damals wie heute die Schnittstellenproblematik und die fehlenden Möglichkeiten zur Abbildung der Parametrik in neutralen Datenformaten.

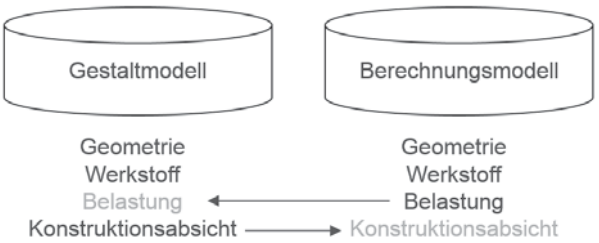


Abbildung 2-13: Gestalt- und Berechnungsmodell mit unterschiedlichem Informationsgehalt

Da die Produktlogik und Konstruktionsabsicht sowohl das Gestalt- als auch das Berechnungsmodell betreffen und beim Export in ein neutrales Datenformat verloren gehen, wird die gewünschte durchgängige Verknüpfung gehemmt. Eine Verbesserung ist dann zu erreichen, wenn die Informationen beider Teilmodelle angeglichen werden (Abbildung 2-13). Nur unter der Voraussetzung, dass CAD-System und Berechnungssystem aus einem Softwarehaus stammen, scheint eine tiefere Integration erreichbar zu sein. Insbesondere in den letzten Jahren sind die Möglichkeiten zur Sicherung und Abbildung der Konstruktionsabsicht im CAD-System stetig ausgeweitet worden. Dieses Potential muss verstärkt in Bezug auf die Kopplung von Gestaltung und Berechnung genutzt werden. Detailliertere Betrachtungen erfolgen in Kapitel 4.

2.4.5 Informationsverarbeitung und Wissensmanagement im Konstruktionsprozess

Eine Konstruktion oder Entwicklung ist immer das Resultat der vom Konstrukteur umgesetzten kontextorientierten Informationsverarbeitung. „Ohne konkrete Daten, Informationen und das Wissen, wie diese angewendet werden müssen, kann ein Produkt nicht entwickelt und konstruiert werden.“ ([FeGr13] (S.782)). Nach North [No12] sind zunächst die Grundbegriffe:

- Zeichen (Buchstaben, Sonderzeichen, Ziffern),
- Daten (syntaktisch geordnete Zeichen) und
- Informationen (in den Bezug gestellte Daten) zu unterscheiden.

Informationen sind jedoch nur für die Betrachter interpretierbar, die in der Lages sind, sie mit anderen aktuellen oder in der Vergangenheit gespeicherten Informationen vernetzen zu können. Somit ist Wissen der Prozess der zweckdienlichen Vernetzung von Informa-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tionen. Wissen entsteht als Ergebnis der Verarbeitung von Informationen durch das Bewusstsein einer Person [No12].

Nach PROBST et al. [PrRa06] lautet die Definition von Wissen: „[Wissen ist] die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden."

Abbildung 2-14 greift einen Auszug der Wissenstreppe nach NORTH [No12] auf und veranschaulicht am Beispiel „Welle" die Zusammenhänge zwischen den Grundbegriffen. Die Abbildung liefert somit die Definition von Wissen in Bezug auf die vorliegende Arbeit. Der Interpretationsspielraumes der Grundbegriffe, kann im Allgemeinen jedoch auch durchaus zu weniger scharfen Trennungen führen.

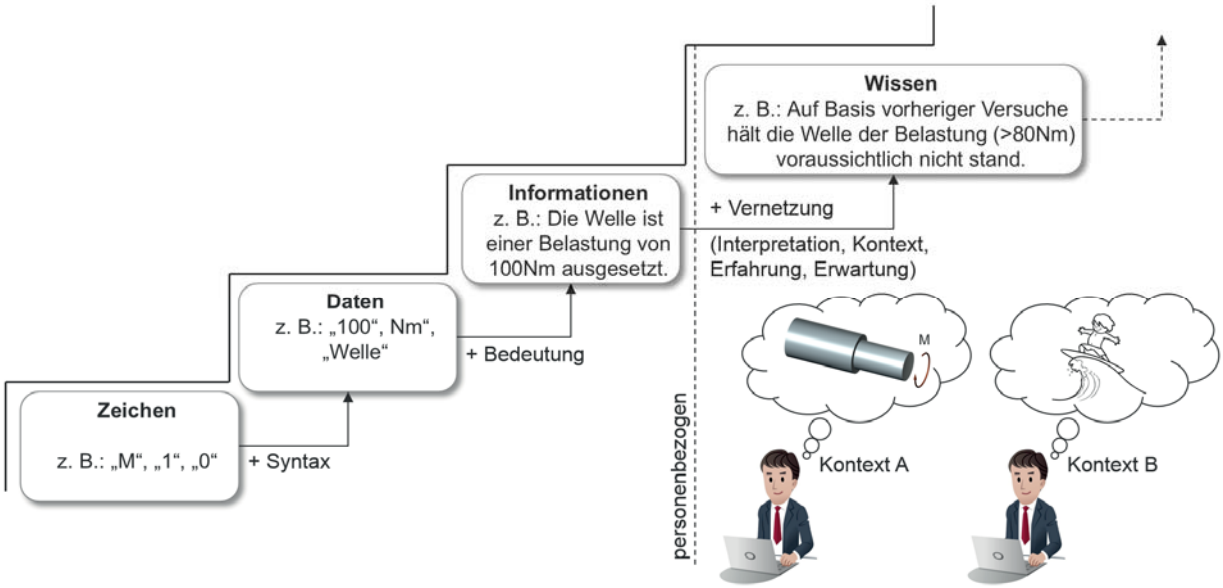


Abbildung 2-14: Wissenstreppe (in Anlehnung an North [No12])

NORTH [No12] sieht analog zu weiteren Autoren die Ressource „Wissen" als einen signifikanten Erfolgsfaktor zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens an. Dazu gehört zum einen ein geeignetes strategisches Wissensmanagement. Zum anderen ein operatives Daten-, Informations- und Wissensmanagement, um nachhaltig und durchgängig aus Informationen Wissen zu generieren und in Wettbewerbsvorteile umzusetzen. SCHNEIDER [Sc97] belegt die Notwendigkeit und die sich einstellenden Wettbewerbsvorteile, wenn Konstruktionswissen allen Konstrukteuren in geeigneter Form zur Verfügung gestellt wird. Um eine einheitliche und weitestgehend allgemeingültige Vorgehensweise zur Einführung und Realisierung eines Wissensmanagement im Ingenieurwesen bereitzustellen, wurde von Praktikern verschiedener ingenieurswissenschaftlicher Disziplinen die VDI-Richtlinie 5610 [VDI09a] erarbeitet.

Zweckmäßiger Weise ist Wissen in explizites (bewusstes, formalisiertes Wissen z.B. Normen, Berechnungsvorschriften) und implizites Wissen (nicht formalisiert und doku-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

mentiert, Know-how einer Person) zu unterscheiden. NONAKA und TAKEUCHI [NoTa97] definieren auf der Basis dieser Unterscheidung das SECI-Modell (Socialisation, Externalization, Combination, Internalization). Über diese vier Formen der Wissensumwandlung erfolgt die kontinuierliche Transformation von impliziten und explizitem Wissen, was zu einer Wissensspirale führt, welche neues Wissen erzeugt und innerhalb der Organisation von unteren Ebenen in höhere Ebenen hebt.

Aus informationstechnischer Sicht, muss Wissen digital dargestellt werde können. LUPA [Lu09] identifiziert folgende, im Bereich der Konstruktion, Planung und Konfiguration eingesetzte Wissenrepräsentationsformen:

- Constraintbasierte Repräsentation
- Regelbasierte Repräsentation
- Objektorientierte Repräsentation.

Bei der constraintbasierten Repräsentation werden Variablen Wertebereichen zugewiesen und über Randbedingungen Einschränkungen bezüglich der erlaubten Zustände geschaffen (im Folgenden wird unter wissensbasierten System auf diesen Zusammenhang weitergehend eingegangen). Die regelbasierte Repräsentation basiert im Wesentlichen auf der Formulierung von Konditionalsätzen (Wenn dann, sonst). Die objektorientierten Repräsentation fasst Informationen und Merkmale über ein Objekt (abstrakter Begriff für beliebig vorstellbare Dinge) in einer Datenstruktur zusammen. Hierzu gehören Objekt-Attribut-Wert Tripel, semantische Netze und Frames. Häufig werden auch Mischformen der verschiedenen Repräsentationsformen eingesetzt. HELMS [He14] (S. 39) ergänzt zu den genannten Formen der Wissensrepräsentation das fallbasierte Schließen. Beim fallbasiertes Schließen werden gelöste Probleme gespeichert (Falldatenbank) und durch Analogieschluss auf neue Probleme übertagen. In Bezug auf wissensbasierte Systeme eröffnet das fallbasierte Schießen Zugang zum maschinellen Lernen auf Basis der Erfahrungen aus der Vergangenheit.

Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung sind tragende Elemente der *Künstlichen Intelligenz (KI)*. Die *Künstliche Intelligenz* beschäftigt sich mit dem Versuch, die kognitiven Leistungen des Menschen zu verstehen und diese mit Hilfe von Computern nachzubilden [SpKr97]. Im Folgenden werden Forschungsaktivitäten vorgestellt, die sich im weitesten Sinne mit der rechnergestützten Abbildung des Konstruktionswissens beschäftigen. Viele Forschungsaktivitäten im Konstruktionsumfeld sind aus den Techniken der Künstlichen Intelligenz abgeleitet oder nutzen diese Techniken. Daher soll an dieser Stelle eine kurze geschichtliche Zusammenfassung erfolgen (die Inhalte der Aufzählung wurden aus RUSSEL und NORVIG [RuNo12] entnommen):

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- 1956: Geburt der KI mit der Vision: Maschinen, die denken, lernen und kreieren
- 1966-1973: „Ein bisschen Realität“, die Vorstellung der „Maschinenevolution“, heute als „Genetische Algorithmen“ bezeichnet
- 1969-1979: „Wissensbasierte Systeme“
- 1980-1988: Industrieboom der wissensbasierten Systeme, KI wird zum Industriezweig
- 1986 bis heute: „Neuronale Netze“
- 1995 bis heute: „intelligente Agenten“ überall
- 2001 bis heute: Verwaltung sehr großer Datenmengen
- Heute: Autonomes Planen, Spracherkennung, autonomes Fahren, Robotik etc.

Wie bereits festgestellt, kann die Unterstützung des Konstrukteurs nur dann erfolgen, wenn Mechanismen bereitgestellt werden, mit denen es gelingt, „Konstruktionswissen“ zu verarbeiten. Eine weitere Problematik beim rechnerunterstützen Umgang mit Konstruktionswissen ist die sogenannte Unschärfe. Insbesondere die Auswertung von Anforderungen die einer Unschärfe unterliegen (z.B. „leicht“, „klein“, „verbessert“) verursacht Schwierigkeiten in der Verarbeitung. Als Ansatz bietet sich hierzu u.a. die Fuzzy-Logik an, die ebenfalls eine Methode der *KI* darstellt. Einen Einblick in den Umgang mit unscharfen Aussagen im Konstruktionsprozess durch die Fuzzy-Logik und Verweise auf weiterführende Literatur bietet [FrKi94].

Die scharfe Abgrenzung zwischen den verschiedenen Begriffen, die sich im Umfeld der Wissensverarbeitung etabliert haben, fällt schwer, da sie von den Autoren teils unterschiedlich interpretiert und aufgefasst werden. In Bezug auf diese Arbeit sollen vier grobe Klassifizierungen vorgenommen werden:

- Wissensbasierte-Systeme / Expertensysteme / Konfigurationssysteme
- Knowledge-Based Engineering (KBE-Systeme)
- Konstruktionsunterstützungssysteme / Konstruktionsassistenzsysteme und
- agentenbasierte Systeme.

Alle Ansätze haben zum Ziel, den Konstrukteur im weitesten Sinne zu unterstützen und werden im Folgenden ausführlicher vorgestellt.

Wissensbasierte-Systeme / Expertensysteme / Konfigurationssysteme: Konstruktive Problemstellungen können häufig auf so genannte Konfigurationsprobleme (als Begriff der KI) zurückgeführt werden, die sich mit wissensbasierten Systemen lösen lassen [Br99] (S.7). Ziel der Wissensverarbeitung ist es dabei, einen gewünschten Zielzustand durch Auswahl

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

und Kombination von Komponenten und Konstruktionsparametern zur erreichen. Wissensbasierte und Expertensysteme werden auch als Synonyme verwendet, vgl. [Lu09] oder [Lu12]. Die Lösung eines Konfigurationsproblems kann u.a. durch die Formulierung eines CSP(Constraint Satisfaction Problem) oder „Problem unter Rand- und Nebenbedingungen" herbeigeführt werden. Ein Problem unter Rand- und Nebenbedingungen besteht nach [RuNo12] aus den drei Komponenten X, D, und C:

- X ist eine Menge von Variablen (X_1, X_2, …, X_n)
- D ist eine Menge von Domänen (D_1, D_2, …, D_n)
- C ist eine Menge von Constraints, die zulässige Wertkombinationen spezifizieren

Ein klassisches CSP-Beispiel ist das „Ländereinfärbungsproblem". Auf einer Landkarte, auf der die einzelnen Länder an mehre Länder angrenzen, soll für jedes Land eine Farbe bestimmt werden, sodass keine identischen Farben aneinander stoßen. Die Länder entsprechen einzelnen Variablen X={NRW, Hessen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz}, jede Variable besitzt eine Domäne (d. h. im Vorfeld festgelegter Farben) D_i={rot, grün, blau}. Es handelt sich also dabei um diskrete und endliche Parameterdomänen. Die Randbedingungen fordern nun, dass angrenzende Länder keine identischen Farben besitzen dürfen C={NRW≠Hessen, NRW≠Niedersachsen, NRW≠Rheinland-Pfalz, Niedersachsen≠Hessen, Rheinland-Pfalz≠Hessen}. Zur besseren Formulierung komplexer Zusammenhänge wird häufig ein Constraint-Graph angelegt. Zur Lösung des CSP kann z. B. der AC-3 Algorithmus eingesetzt werden, der mögliche Kombinationen liefert [RuNo12] (S. 255). Hier zeichnet sich direkt die Übertragbarkeit auf Schraffuren in Baugruppenzeichnungen ab. BRINKOP stellt die Zusammenhänge zwischen dem Konfigurierungsproblem und der Variantenkonstruktion vor. Aus seiner Sicht wird der Schwierigkeitsgrad durch folgende Faktoren bestimmt [Br99]: Wertemengen der Konstruktionsobjekte, Restriktionen zwischen den Konstruktionsobjekten, Art des Problemlösungswissens, (Nicht-)Monotonie des Lösungsprozesses, Bewertungskriterien für Varianten und Lösungsspezifikation.

In Kapitel 3.3 und 4.4 wird konkreter auf die Probleme bei der Definition von Zusammenhängen im Kontext praxisnaher konstruktiver Problemstellungen eingegangen. Insbesondere Wertebereiche und zu integrierende Berechnungen werden hier eine Rolle spielen.

Auch für den Bereich der computergestützten Produktentwicklung kann der bereits aufgeführte Industrieboom der wissensbasierten Systeme, der sich zwischen 1980 und 1988 ereignete, nachvollzogen werden; vgl. *VDI-Berichte Nr.775 Expertensysteme in Entwicklung und Konstruktion* [VDI89]. Dennoch gilt auch in der Hochphase laut SCHNEIDER [Sc89]: „Die Zahl der in der Praxis laufenden Systeme für den Bereich Entwicklung und Konstruktion ist zur Zeit noch relativ gering". Nach PAHL et al. [PaBe07] können unter Expertensystemen auch Systeme verstanden werden, die das Wissen eines Experten in Teilausschnitten re-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

präsentieren. Dies gelingt für vordefinierte Teilbereiche und in vordefinierten Grenzen. Somit können insbesondere die heutigen ganzheitlichen Getriebeberechnungsprogramme[5] aufgrund des implementierten (Getriebe-) Expertenwissens ebenfalls zu den Expertensystemen gezählt werden, vgl. [KI13].

Knowledge-Based Engineering (KBE-Systeme): Nach LUPA [Lu09] ist ein wesentliches Merkmal von KBE- Systemen die starke Verknüpfung zur geometrischen Ausprägung des Produktes und damit zum CAD-System. Aus diesem Grund sieht er KBE-Systeme als einen Sonderfall der wissensbasierten Systeme an. LUTZ [Lu12] grenzt Expertensysteme von KBE-Systemen ebenfalls durch die Integrationstiefe im Zusammenhang mit dem CAD-System ab. Vergleichbar mit den vorherigen Einordnungen platziert LA ROCCA [La12] KBE-Systeme zwischen „Künstlicher Intelligenz“ und herkömmlichem CAD. DANJOU et al. [DaLu08] prognostizieren den stetigen Nutzen der KBE-Methoden, insbesondere wenn es gelingt, den Wissensaustausch mit anderen IT-Systemen zu ermöglichen (Wissensvernetzung): „An interesting and already in other disciplines (...) established approach is the setup of an ontology (formal form of knowledge representation (...)) which enables the exchange of knowledge between different IT systems respectively systems and users and therefore different contexts. As a result, the ontology based product development will upgrade the knowledge based design with context-dependent knowledge management (...).“ Aus diesen Feststellungen leiten sie die zukünftigen Entwicklungstendenzen der Wissensverarbeitung ab, die die in Abbildung 2-15 dargestellt sind.

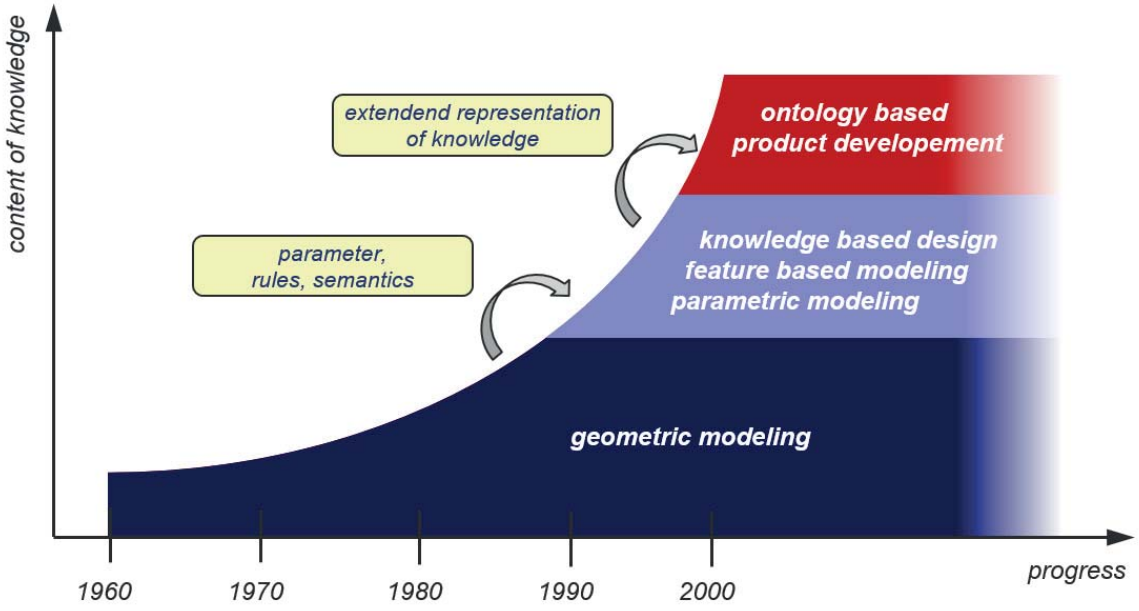


Abbildung 2-15: Entwicklung des computergestützten Konstruktionsprozesses nach [DaLu08]

[5] Unter ganzheitlichen Getriebeberechnungsprogramme werden Softwaresysteme verstanden, mit denen sämtliche für eine Getriebeauslegung notwendigen Maschinenelemente-Berechnungen in einer Oberfläche ausgeführt werden können, Beispiel hierfür ist *Gearbox(Tedata)*.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Derzeit kann auch im industriellen Umfeld eine stetige Verbreitung und der verstärkte Einsatz von KBE-Systemen beobachtet werden. Abbildung 2-16 zeigt die Entwicklung der KBE-Systeme innerhalb der letzten Jahre im Zusammenhang mit den CAD-Systemen. Insbesondere die CAD-Systeme: *CatiaV5(DassaultSystèmes)* "Knowledgeware", *Inventor(Autodesk)* „Intent" *und NX(Siemens/UGS)* „KnowlegeFusion" ermöglichen die starke Integration eines KBE-Systems. Sie bieten integrierte Entwicklungsumgebungen an, die es erlauben, direkt im CAD-System Wissensintegration zu betreiben. *ProEngineer(PTC)* bzw. *Creo(PTC)* sieht zwar mit dem „BehavioralModelling" Möglichkeiten vor, verschiedenste Analysen und Bauteilstudien zu integrieren, es ist darunter aber keine integrierte Entwicklungsumgebung, wie sie die zuvor genannten CAD-Systeme beinhalten, zu verstehen. In *Creo(PTC)* muss zur Erstellung umfangreicherer KBE-Applikation auf die Programmierschnittstellen ausgewichen werden (z. B.: ObjectToolkit, J-Link oder VB.API).

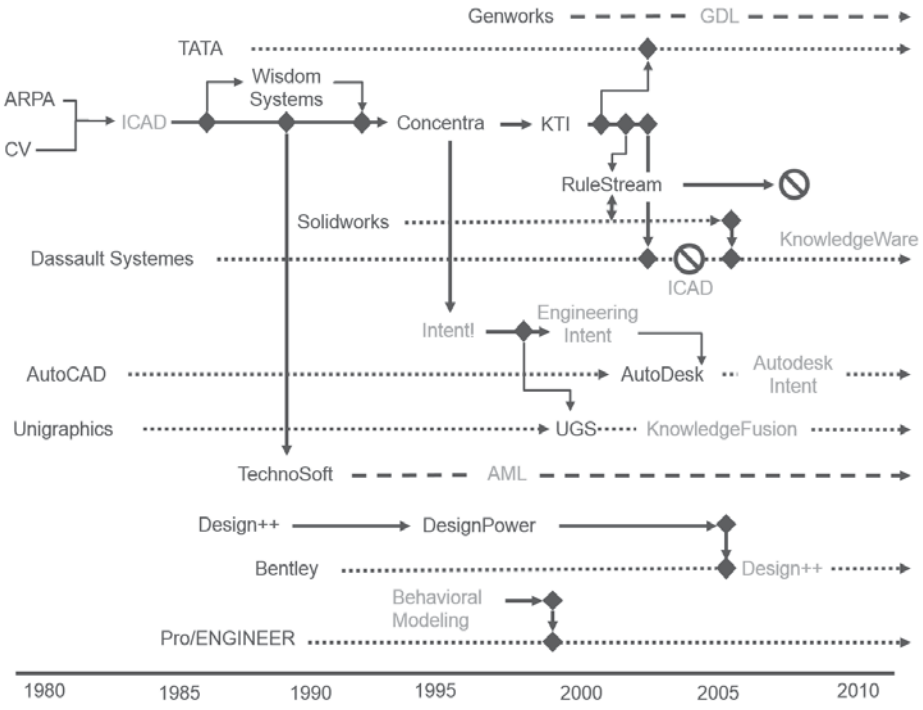


Abbildung 2-16: Entwicklung der KBE-Systeme verschiedener CAD-Systeme [La12]

Konstruktionsunterstützungssysteme / Konstruktionsassistenzsysteme: Einen ganzheitlicheren Ansatz und speziell die phasenübergreifende Unterstützung für verschiedenste Teilbereiche des Konstruktionsprozesses sollen Konstruktionsunterstützungssysteme oder Konstruktionsassistenzsysteme wie z. B. mfk bieten. Das Konstruktionsunterstützungssystem mfk ist modular aufgebaut (z. B. Blechkonstruktion, Gußkonstruktion etc.), sodass es stetig mit neuen Modulen, z. B. zur Toleranzanalyse, erweitert werden kann [Ho02]. Der Ansatz des Konstruktionssystems mfk basiert auf einem zentral verwalteten Produktmodell und sieht vor, leistungsfähige CAD-Systeme lediglich zur Benutzerführung und zur Visualisierung der im Produktmodell beschriebenen Geometrie einzusetzen. Bei komplexeren Formen, die wesentlich effizienter über das CAD-System definiert werden können,

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

erfolgt eine Zuordnung zwischen dem Produktmodell und dem CAD-Modell über Attribute [KoMe01]. Weitere vergleichbare Konstruktionsunterstützungssysteme die einen Zusammenschluss verschiedener Subsysteme darstellen, sind nach DYLA [Dy02]: INKA*:* Integrierter Ingenieursarbeitsplatz; MOSAIK: Modulare Systemarchitektur zur Integration von Konstruktionswerkzeugen; CORSICA: Integriertes Ingenieurssystem.

Im Grunde zeigt sich hier, dass die Intentionen der Forschungsansätze von heutigen CAD-Systemherstellern stückweise umgesetzt wurden. Das breite Spektrum der heute verfügbaren integrierten Zusatzapplikationen (vgl. Abbildung 2-8) belegt diese Feststellung.

Agentenbasierte Systeme: Konstruktionssysteme basieren in der Regel auf einem Systemansatz, der Methoden bereitstellt, um Aufgaben zu übernehmen, die der Konstrukteur sonst manuell durchführen müsste. Agentenbasierte Systeme hingegen sollen den Konstrukteur und seine Tätigkeiten innerhalb des CAD-Systems überwachen und unterstützen. Agentenbasierte Systeme haben somit zunächst einen eher prüfenden Charakter. Von den Grundzügen her ist ein Agent ein (Software-) System, das die Umgebung über Sensoren wahrnimmt und Aktuatoren, durch die er die Umgebung beeinflussen kann.

Ein aktuelles Beispiel für ein agentenbasiertes System ist ProKon (Proaktive Unterstützung von Konstruktionsprozessen durch Softwareagentensysteme), das zurzeit am IKDT der Universität Stuttgart entwickelt wird ([Kr11], [IK13]). ProKon basiert auf folgenden Agenten:

- Aspektagent – betreut jeweils eine Gestaltungsrichtlinie (z. B. korrosionsgerecht)
- Fachagent – beinhaltet Wissen über jeweils eine Domäne der Konstruktionstechnik (z. B. Welle)
- Objektagent – betreut jeweils ein Objekt in der Umgebung des Basissystems und kapselt Objektinformationen (z. B. Agent für die Anforderungsliste) und führt die Lösungsumsetzung durch
- Managementagent – initiiert und koordiniert die Konsistenzprüfung, Lösungsfindung und –umsetzung

Am Beispiel eines Querpressverbandes lässt sich die Funktionsweise anschaulicher erläutern. Ändert der Konstrukteur die Fugenlänge, wird das nun übertragbare Moment berechnet und mit dem vorgegebenen Wert aus der Anforderungsliste verglichen. Ist das nun übertragbare Moment kleiner als der Mindestwert aus der Anforderungsliste, wird nach möglichen Anpassungen gesucht. Der Konstrukteur erhält Vorschläge oder kann selbstständig Anpassungen vornehmen. Ändert er z. B. das Material der Welle in einen nicht rostfreien Stahl, wird er auf diese nicht zulässige Änderung hingewiesen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Eine ähnliche Zielsetzung wurde im DFG-Projekt WAM (Wissensbasierte agentengestützte Modellierung in parametrischen 3D-CAD-Systemen, 2002-2005) vereinbart. Den Ausgangspunkt stellen wissensbasierte CAD-Modelle dar, die einen höchstmöglichen Gehalt an integriertem Produktwissen aufweisen. Diese Modelle werden als Lösungsbausteine entwickelt, die flexibel, adaptiv und wiederverwendbar dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden. Mit Hilfe der Agententechnologie werden die Methoden und Funktionalitäten gesteuert, verwaltet und überwacht. Als einfaches verständliches Beispiel wird das Modell einer Saftpresse angeführt. Über die eingebettete Konstruktionsabsicht erfolgt eine Prüfung (in Abhängigkeit der Spezifikation der Saftpresse), ob die enthaltenen Bohrungen ein Durchfallen der Kerne verhindern [AnLi03].

Ein agentenbasiertes System zur Unterstützung des Wissensaustauschs in gemeinschaftlichen Entwicklungsprojekten sowie ein Vorschlag für die Architektur der nötigen Agenten wird in [ChZh10] vorgestellt. Agentensysteme können heute mit dedizierten Software Frameworks programmiert werden z. B.: *JADE (Java Agent DEvelopment Framework)* [RzSk10].

Im Bereich der agentenbasierten Systeme zeichnet sich hohes Potential ab. Dennoch muss kritisch hinterfragt werden, welche Zuverlässigkeit agentenbasierte Systeme in Zukunft erreichen können. Am Beispiel der Korrosion dargestellt: Auch prinzipiell nicht rostende Stähle können unter bestimmten Bedingungen (z. B. Spaltkorrosion) korrodieren. Es muss demnach vermieden werden, dass sich der Konstrukteur vollständig auf eine Systemaussage verlässt, wenn die Zuverlässigkeit fraglich ist. Auch der Umgang mit unscharfen Anforderungen wie „Es sollte möglichst korrosionsgerecht sein“, wird vermutlich Probleme hervorrufen. Aus diesem Beispiel lässt sich erneut die hohe Komplexität des Konstruktionsprozesses, bedingt durch die Einhaltung der Gerechtheiten, ableiten.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3 Analyse ausgewählter Konstruktionsprozesse

Ziel dieses Kapitels ist es, aktuelle Problemfelder im Konstruktionsumfeld aufzuzeigen, die verschiedenen Einflüsse und Aspekte in Bezug auf den rechnergestützten Konstruktionsprozess darzustellen und daraus den Bedarf weiterführender Methoden und Ansätze abzuleiten. Im Vordergrund stehen die Phasen Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten. Die Phase der Aufgabenklärung wird in diesem Kapitel über die Darstellung von Ausgangspunkten für Konstruktionsprozesse berücksichtig. Analog zu vielfältiger Literatur auf dem Gebiet der Konstruktionslehre erfolgt die detaillierte Betrachtung von Problemfeldern an ausgewählten Beispielen. Die gezeigten Beispiele lassen sich auf andere Produktbereiche übertragen.

3.1 Differenzierung der Konstruktionsprozesse hinsichtlich des Neuheitsgrades

Zunächst soll in Anlehnung an KOLLER [Ko91] in primäre und sekundäre Konstruktionsprozesse unterschieden werden, die sich hinsichtlich ihres Neuheitsgrades unterscheiden. Primäre Konstruktionsprozesse sind Konstruktionsprozesse, die erstmalig zu einer Teil- oder Gesamtlösung eines Problems führen. Sie erfordern durch „echte“ Konstruktionsleistung die Intelligenz des Konstrukteurs. Die sekundären (oder nachvollzogenen) Konstruktionsprozesse umfassen Konstruktionstätigkeiten, die aus einer vordefinierten Lösung neue Typ- oder Größenvarianten erzeugen. Sekundäre Konstruktionsprozesse lassen sich über die Erstellung von Konstruktionsvorschriften, die dann als Regelwerk einem Konfigurationssystem[6] hinterlegt werden, automatisieren. Die eigentliche (primäre) Konstruktionsarbeit in der Variantenkonstruktion liegt in der ursprünglichen Ausgangskonstruktion sowie in der Erfassung und Formulierung der Varianz. Das Erstellen der Konstruktionsvorschrift zur Überführung bisher manuell ausgeführter Konstruktionsprozesse in automatisierte Konstruktionsprozesse kann somit ebenfalls als primärer Konstruktionsprozess verstanden werden. Die Zusammenhänge in den Produkten müssen neu überdacht und i. d. R. auch entsprechend angepasst werden. Die spätere Ableitung neuer Varianteninstanzen aus der Konstruktionsvorschrift heraus ist per Definition sekundäres Konstruieren. Die primären Konstruktionsanteile stehen im Zusammenhang mit den Konstruktionsarten. Die Variantenkonstruktion ist vollständig als sekundärer Konstruktionsprozess aufzufassen.

[6] Alternativ könnte auch von einem KBE-System gesprochen werden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Neukonstruktion beinhaltet den höchsten Neuheitsgrad und damit die größten primären Konstruktionsanteile, dennoch sind auch hier sekundäre Teilprozesse zu erwarten, wie sich im Verlauf dieses Kapitels zeigen wird.

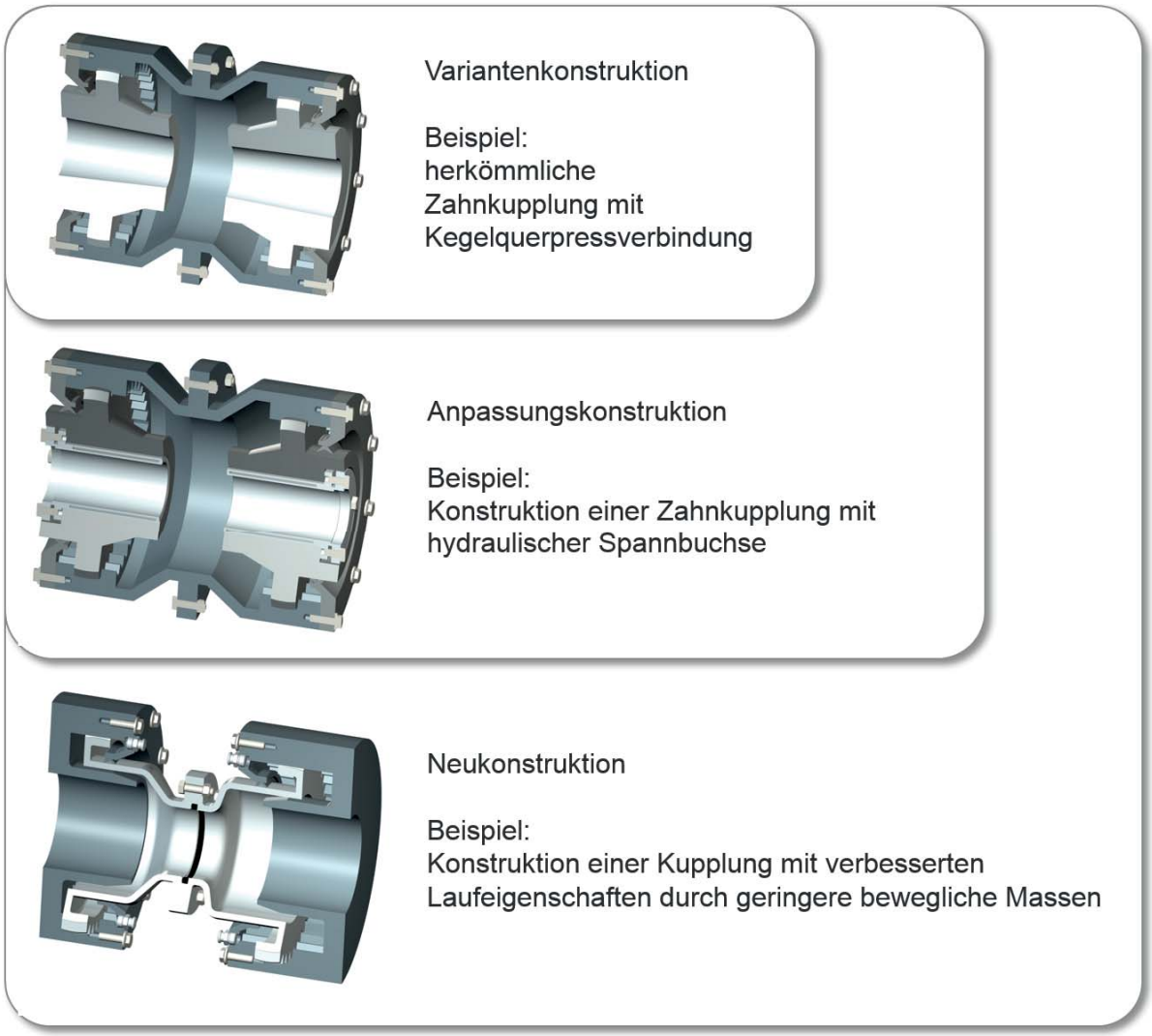


Abbildung 3-1: Vergleich der Konstruktionsarten am Beispiel Zahnkupplung

Abbildung 3-1 zeigt am Beispiel einer Zahnkupplung, in welcher Form im weiteren Verlauf Bezug auf die Konstruktionsarten genommen wird. Die im Vorfeld bekannte Varianz der Kupplung bildet die Prämisse für die Variantenkonstruktion. Mit Hilfe entsprechender Berechnungssoftware und deren Kombination mit einem parametrischen CAD-System kann diese Varianz abgebildet werden. Kommt es (z. B. durch eine Kundenanfrage initiiert) zu einer Anpassung der Welle-Nabe-Verbindung, hat dies abgrenzbare konstruktive Änderungen zur Folge, die über einen primären Konstruktionsprozess umzusetzen sind. Diese Anpassungskonstruktion verletzt zwar die zuvor in der Konstruktionsvorschrift hinterlegte Varianz, sodass manuelle Anpassungen nötig werden, dennoch kann eine Zahnkupplung ausgelegt werden, die dann vom Konstrukteur in Teilbereichen (Kegelquerpressverbindung gegen hydraulische Spannbuchse ersetzen) angepasst wird.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Gemäß dem gewählten Beispiel grenzt sich die Neukonstruktion von der Anpassungskonstruktion durch die Umsetzung neuer Randbedingungen ab, die deutlich tiefere Eingriffe in die Struktur voraussetzen und nicht mehr vom Konfigurationssystem unterstützt werden. Nachteil der herkömmlichen Bauart ist das hohe Trägheitsmoment, bedingt durch den großen Trägheitsradius des beweglichen Teils der Kupplung. Durch eine umfassende Veränderung der Kupplung können die Kupplungsteile mit hohen Massen bzw. Massenträgheitsmomenten (Seitenteile mit der Innenverzahnung) direkt mit der Motor- bzw. der Getriebewelle verbunden werden. Der bewegliche Innenteil der „neuen" Kupplung verursacht durch das geringere Trägheitsmoment deutlich kleinere Unwuchtkräfte als der „frühere" bewegliche Außenteil. Daraus resultiert das gewünschte, verbesserte Laufverhalten, indem lediglich eine andere Anordnung der Komponenten gewählt wurde. Die Verzahnung sowie die Kegelquerpressverbindung (und insbesondere deren Berechnungen) sind dabei analog zur ursprünglichen Variantenkonstruktion auszuführen und können daher als sekundärer Teilaspekt aufgefasst werden. Die gesamte Umgestaltung setzt dennoch „primäres" Konstruieren voraus und damit einhergehend auch das erneute Durchlaufen aller Konstruktionsphasen. Die Erkenntnis, dass dieser „Anordnungswechsel" der Komponenten die Lösung des Konstruktionsproblems darstellt, kann nur vom Konstrukteur erbracht werden, die Verzahnungsauslegung bzw. die Auslegung der Kegelquerpressverbindung hingegen sollte systemunterstützt (wie im Konfigurationssystem automatisiert) ausgeführt werden.

3.2 Ausgangspunkte für Konstruktionsprozesse

In Bezug auf diese Arbeit lässt sich eine grobe Zuordnung der Gründe hinsichtlich der primären und sekundären Konstruktionsprozesse feststellen:

Gründe für primäre Konstruktionsprozesse: Sie werden häufiger von außen auferlegt und können zwischen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit bis hin zu politischen Auslösern eingegliedert werden, z. B. Anpassung an den technischen Fortschritt, gezielte Kundenanfragen bzw. kundenindividuelle Wünsche, Impulse aus Marktstudien, Bewältigung höherer Leistungsdurchsätze, verbesserte Herstellungsprozesse durch neue Technologien, Identifizierung von Schwachstellen am eigenen Produkt im Vergleich zum Konkurrenzprodukt etc.

Gründe für sekundäre Konstruktionsprozesse: Sie stehen häufiger im Zusammenhang mit internen Wirtschaftlichkeitsaspekten, wie z. B. der zeiteffizienteren Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen bzw. der Angebotserstellung, dem Einsatz von weniger qualifiziertem Personal für anspruchsvollere Aufgaben, der Sicherung der Prozessqualität, der Entlastung der Konstrukteure von Routinetätigkeiten, der Vermeidung redundanter Dateneingaben etc.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.2.1 Beispiel für primäre Konstruktionsprozesse

Neben der Zahnkupplung soll am Beispiel eines Getriebeverdichters der primäre Konstruktionsprozess weiterführend diskutiert werden. Der Getriebeverdichter wird in den folgenden Kapiteln erneut aufgegriffen, dazu folgen zunächst einige Vorbemerkungen als Ausgangspunkt.

Getriebeverdichter: Die aktuellen Bestrebungen, begrenzt verfügbare Ressourcen zu schonen und eine Energiewende herbeizuführen zielen u.a. darauf ab, den Energieverbrauch von Maschinen und Anlagen weitestgehend zu reduzieren. Es besteht demnach ein stetiger Bedarf nach energieeffizienteren Systemen. Nur über entsprechende konstruktive Anpassungen (primärer Konstruktionsprozess) kann dieses Ziel verfolgt werden. Der Konstrukteur wird daher in naher und mittelfristiger Zukunft verstärkt mit der Aufgabe konfrontiert werden, Potentiale der vorhandenen Konstruktionen zu identifizieren, Lösungsalternativen zu generieren und deren (energetischen) Nutzen zu bewerten.

Betrachtet wird ein Getriebeverdichter der Siemens AG (Segment Turbo Equipment) nach (Abbildung 3-2), der u.a. zur Luftzerlegung und Prozessgasförderung eingesetzt wird. Diese Getriebeverdichter werden in einem Leistungsbereich von ca. 10 bis ca. 45MW bei Ritzelwellendrehzahlen bis 20.000 min^{-1} betrieben. Signifikantes Konstruktionsmerkmal eines Getriebeverdichters ist das von einem Elektromotor oder einer Turbine angetriebene, zentral angeordnete Großrad. Die Verzahnung des Großrades kämmt mit der Verzahnung der Ritzelwellen, an deren Enden die Laufräder angeordnet sind. Die Laufräder rotieren in den Spiralgehäusen und sorgen für die Verdichtung des Prozessgases. Mittels dieser Anordnung können zwischen zwei und zehn Verdichterstufen zu einem Gesamtsystem zusammengeschlossen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

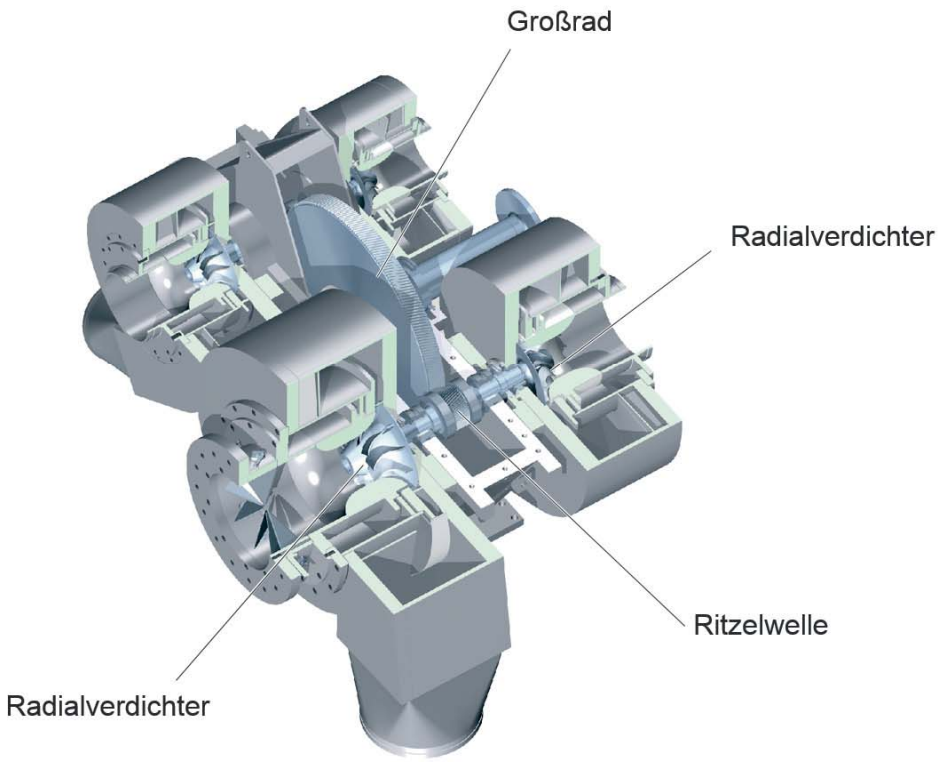


Abbildung 3-2: Getriebeverdichter (Bildquelle: Siemens AG)

Bei überschlägiger Betrachtung zeigt sich, dass die Einsparung von einem Prozent der Antriebsleistung (45MW) durch Wirkungsgradsteigerung, die eingesparte Verlustleistung (ca. 3,2 Mio. kWh/Jahr unter Berücksichtigung von Wartung etc. 20h/Tag) zur Versorgung von ca. 900 Haushalten ausreichen würde (3500kWh Haushalt/Jahr). Ein viel versprechendes Ziel. Doch wie identifiziert man die signifikanten Einsparpotentiale in der Gesamtkonstruktion? Und wie kann eine objektive, vergleichende Bewertung verschiedener Lösungskonzepte erfolgen?

3.2.2 Beispiel für sekundäre Konstruktionsprozesse

Zahnradgetriebe und Zahnkupplungen können als klassische Vertreter der Variantenkonstruktion angesehen werden und eignen sich daher als Beispiele für sekundäre Konstruktionsprozesse. Auf die im Folgenden vorgestellten Beispiele wird im weiteren Verlauf der Arbeit durchgängig zurückgegriffen.

Zahnradgetriebe: Sie dienen der gleichförmigen Übersetzung von Drehbewegungen und bestehen aus einem oder mehreren Zahnradpaaren und weiteren Maschinenelementen. Ausgangspunkt ist üblicherweise die Festlegung der Anforderungen an die Struktur des Getriebes (Lage der Antriebs- und Abtriebswelle, Bauraum etc.) und die Leistungsdaten (zu übertragende Leistung, Drehzahlen, Lebensdauer etc.). Mit Hilfe dieser Vorgaben sind Getriebekomponenten zu bestimmen und Dimensionierungsberechnungen durchzuführen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Auf dieser Basis entsteht ein Grobentwurf, der schrittweise vom Konstrukteur feingestaltet werden muss. Obligatorisch ist ein anschließender Festigkeitsnachweis der Komponenten gemäß anerkannter Richtlinien (z. B. DIN 3990 für die Verzahnung). Eine Festigkeitsberechnung kann wiederum eine Änderung der zuvor grob ermittelten Abmaße oder Annahmen nach sich ziehen.

Als exemplarisches Beispiel werden in diesem Abschnitt Zahnradgetriebe der Fa. SMS-Meer betrachtet, die als Antrieb eines Walzenpaares innerhalb einer gesamten Walzstraße zur Kupferdrahtherstellung dienen. Die sog. Stiche (i. d. R. zwölf) bestehen aus jeweils zwei Walzenpaaren (ein Walzenpaar senkrecht und ein Walzenpaar waagerecht). Über Verformungsanalysen wird die nötige schrittweise Verformung und damit die am jeweiligen Stich notwendige Walzenumfangsgeschwindigkeit sowie das nötige Walzmoment bestimmt. Diese Ergebnisse sind Ausgangspunkt zur Auslegung der Getriebe.

Die Getriebe lassen sich grundsätzlich in reine Stirnrad-, reine Kegelrad und Kombinationen aus beiden unterteilen, wobei die Gesamtübersetzung auf bis zu drei Stufen aufgeteilt wird. Jedes Getriebe besitzt zwei Abtriebswellen. Der Antrieb der Walzen erfolgt über die an den Enden der Abtriebswellen angeordneten Hohlräder. Um die geforderte gegensinnige Rotationsbewegung der Walzen zu erreichen, muss jedes Getriebe mit einem zusätzlichen Zahnradpaar ausgestattet werden. Das Übersetzungsverhältnis dieses Paares ist i=1. Auch diese Stufe muss bei der Getriebeauslegung berücksichtigt werden

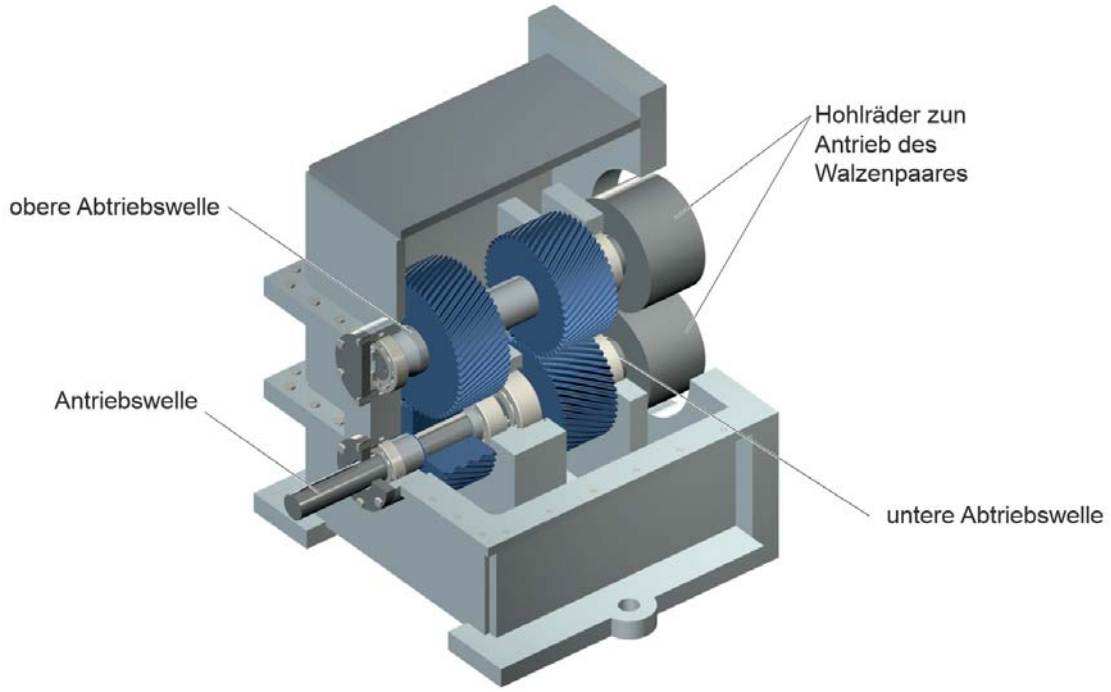


Abbildung 3-3: Gestaltmodell eines Walzwerkgetriebes

Obwohl ein hohes Standardisierungspotential gegeben ist, wurde bisher auf das Aufstellen einer ausführlichen Konstruktionsvorschrift (und deren Abbildung in einem Konfigurationssystem) verzichtet, sodass die Getriebe mit relativ hohem Aufwand manuell konstru-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

iert wurden. Anzumerken ist, dass die Auslegung mit Hilfe der vergleichsweise geringen Informationen aus der Verformungsanalyse erfolgte und dass die unterschiedlichen Baugrößen viele ähnliche Funktionseinheiten beinhalten.

Zahnkupplungen: Sie dienen primär der Übertragung von Drehmomenten zwischen zwei sich drehenden Wellen. Neben der Hauptfunktion, die darin besteht, die „mechanische Leistung zu leiten", übernehmen sie eine Ausgleichsfunktion, sodass Fluchtungs- und Lagefehler der Wellen zueinander ausgeglichen, bzw. Stöße und Schwingungen gedämpft werden. Zahnkupplungen gehören den nicht schaltbaren Kupplungen an und besitzen die Möglichkeit, radiale-, axiale, und Winkelverlagerungen bzw. eine Kombination der genannten Verlagerungen auszugleichen (Abbildung 3-4).

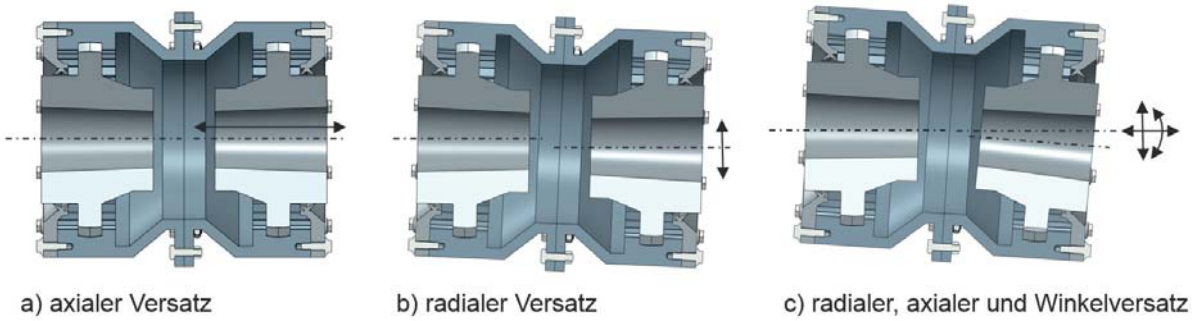


Abbildung 3-4: Verlagerungsarten von Zahnkupplungen, herkömmliche Bauweise

Die formschlüssige Übertragung des Drehmomentes erfolgt durch das Ineinandergreifen der innenverzahnten Kupplungsteile mit den außenverzahnten Kupplungsteilen. Ferner gibt es Ausführungen, die lediglich über eine Verzahnungspaarung verfügen. Im Hinblick auf die Art der eigentlichen Verzahnung kann zwischen Geradverzahnung und ballig ausgeführten Verzahnungen unterschieden werden [Sc07], [De11]. Nachteil der Geradverzahnung ist das Auftreten von Kantenpressung bei Winkel- und Radialverlagerung. Wird die Zahnform ballig ausgeführt, verschiebt sich die Pressung auf die Zahnflanke. Häufig wird für die ballig verzahnte Form der Begriff auch Bogenzahnkupplung verwendet, obwohl es sich hierbei um einen geschützten Begriff handelt [De11]. In allgemeiner Fachliteratur zur Auslegung von Maschinenelementen verzichten die Autoren auf die Angabe detaillierter Informationen zur Auslegung und Gestaltung von Zahnkupplungen und verweisen aufgrund der hohen Komplexität der Auslegung auf die Hersteller vgl. [De11] (S.529). BECKMANN [Be05] liefert herstellerunabhängige, praxisorientierte und wissenschaftlich fundierte Berechnungsgrundlagen für die Entwicklung und Konstruktion von Balligzahnkupplungen. Hervorzuheben ist, dass seine Auslegungsabläufe auf rein analytischen Berechnungen basieren.

Detaillierter betrachtet wird nun die bereits in Kapitel 3.1 als Beispiel für eine Neukonstruktion vorgestellte Balligzahnkupplung. Es handelt sich dabei um eine Kupplung der SIEMENS AG, die vorwiegend im Bereich der Schienenfahrzeuge (Hochgeschwindigkeits-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

züge, Straßenbahnen oder Metros) eingesetzt wird. Als Übertragungselement zwischen Motor und Getriebe ist sie ein entscheidendes Bauteil des Antriebsstranges. Hieraus resultieren hohe Anforderungen bezüglich der Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit. Die Auslegung erfordert daher die Berücksichtigung vielfältiger Kriterien:

- Einsatz in Umgebungen niedriger Temperaturen als auch hoher Temperaturen
- axiale und radiale Stöße bei Maximaldrehzahl
- wechselnde maximale Anfahr- und Bremsmomente
- Berücksichtigung der Abhängigkeit zwischen Radreifendurchmesser (neu oder abgefahren) und Kupplungsmoment
- Nachweise für verschiedene Beladungszustände der Wagen: Federung in Endanschlägen, leer, teilbeladen, vollbeladen
- Untersuchung der genannten Beladungszustände unter statischen und dynamischen Einflüssen
- Berücksichtigung der Einbautoleranzen von Motor und Getriebe
- …

Abbildung 3-5 zeigt den Aufbau und die einzelnen Komponenten dieser Kupplungsbauart. Über analytische Berechnungen sind die Verzahnung und die Welle-Nabe-Verbindung für verschiedene Belastungszustände nachzuweisen.

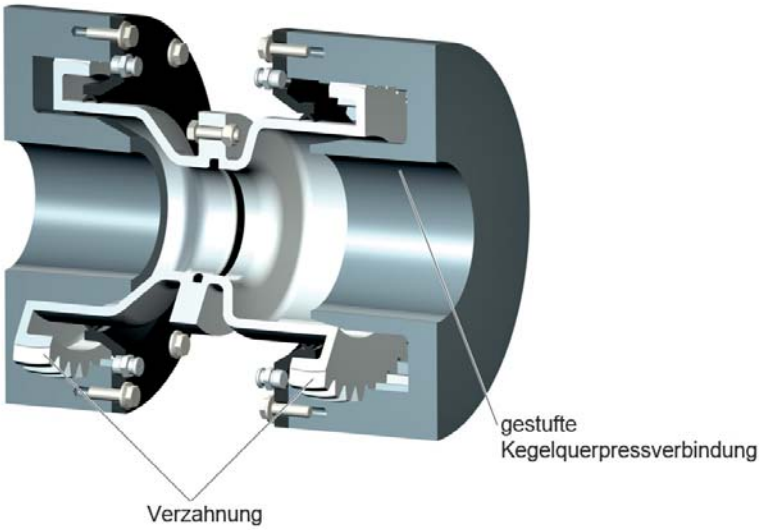


Abbildung 3-5: Balligzahnkupplung, Bauweise Siemens AG

Die Welle-Nabe-Verbindung erfolgt jeweils über eine Kegelquerpressverbindung. Durch das Übermaß zwischen Welle und Nabe entsteht beim Fügen (Nabe wird erwärmt) eine Fugenpressung, welche die Übertragung des Drehmomentes mittels Reibschluss sicherstellt. Wie sich ebenfalls aus Abbildung 3-5 entnehmen lässt, handelt es sich um eine Kegelquerpressverbindung mit gestuften Außendurchmessern. Die Berechnung des über-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tragbaren Gesamtmomentes erfolgt über die Teilmomente, die sich aus den Teillängen mit den jeweils dazugehörigen Außendurchmessern ergeben (Scheibchenmethode). Die nötige Fugenpressung zur Übertragung des Drehmomentes erzeugt Spannungen in Welle und Nabe. Zur detaillierten Berechnung der Kegelquerpressverbindung (bzw. teilweise für jedes einzelne Teilstück) ist die Überprüfung/Berücksichtigung (vgl. auch DIN 7190 [DIN13]) der folgenden Kriterien durch analytische Berechnungen notwendig:

- Fugenpressung ausreichend, um Moment übertragen zu können?
- Durch Fugenpressung hervorgerufene Spannungen (in Welle und Nabe) nicht größer als zulässige Flächenpressung (elastischer Bereich)?
- Fügetemperatur unterhalb zulässiger Werkstoffgrenze?
- Berücksichtigung drehzahlbedingter Fliehkräfte, die das übertragbare Moment reduzieren.

Der Nachweis der Kegelquerpressverbindung(en) ist durchaus komplex, sodass die Festlegung eines definierten Auslegungsablaufs unumgänglich ist. Diese Berechnung erfordert (nach DIN 7190) die Berücksichtigung von ca. siebzig Berechnungsparametern (in Abhängigkeit der Absätze) und ca. dreißig Gleichungen. Vergleichbares gilt für die Verzahnungsberechnung. Die Montage der Kupplung erfolgt, indem die Kupplungsseiten (rechts und links) auf die Wellen geschrumpft werden, die Innenteile und die jeweiligen Deckel montiert und abschließend die beiden Innenteile über die Stirnverzahnung verbunden werden. Es bedarf hier also neben den funktionalen, und fertigungstechnischen Gesichtspunkten auch einer Bewertung der Montagegerechtheit, um sicherzustellen, dass die Verbindungsstellen mit Werkzeugen erreichbar bleiben. Diese Betrachtungen werden in Kapitel 4.4 weiter intensiviert.

Die stetige Verbesserung von technischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten hat dazu geführt, dass umfangreiches spezialisiertes Auslegungswissen zu allen Teilbereichen der Kupplung angesammelt wurde. Es liegt in digitaler Form in Formeln und Auslegungsrichtlinien innerhalb komplexerer Tabellenkalkulationen (Verzahnung und Verlagerung) und in einem firmeninternen Berechnungsprogramm (Kegelquerpressverbindung) vor. Eine Analyse des Konstruktionsablaufs hat ergeben, dass eine hohe Anzahl der Ein- und Ausgabeparameter manuell zwischen dem CAD-Modell und den Berechnungen ausgetauscht werden musste. Auf die Berechnungseinbindung wird in Kapitel 4 verstärkt eingegangen.

An dieser Stelle kann gezeigt werden, wie wichtig die Konsistenz zwischen Gestalt- und Berechnungsmodell ist und dass Berechnungsgrößen auch im CAD-System abgebildet werden müssen. Die Fügetemperatur und der Fügedruck als Berechnungsgröße müssen über das CAD-System bis zum Prüfprotokoll (Montaganleitung), zur Betriebsanleitung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sowie Wartungsanleitung transferiert werden. Vergleichbares gilt für die Belastungsmomente, zulässige Verlagerungen bei verschiedenen Beladungszuständen.

3.3 Entwerfen in sekundären Konstruktionsprozessen

Die Beispiele Zahnradgetriebe und Zahnkupplung aus Kapitel 3.2.2 zeigen, dass Systeme notwendig sind, die mehr leisten müssen als die automatisierte Zusammenstellung vordefinierter Komponenten zu einem Gesamtprodukt, wie es z. B. bei der Definition eines Neuwagens oder einer Einbauküche der Fall (die als klassische Beispiele für Konfigurationssysteme gelten) ist. Zu groß wäre hier der Aufwand, jede erdenkliche Ausprägung der Konstruktionskomponenten und deren Kombinationen vorauszudenken. Es muss also zwischen Konfigurationssystemen unterschieden werden, die vollständig vorausgedachte Varianten lediglich kombinieren, und Systemen, die Berechnungen beinhalten, deren Ergebnisse in den Konfigurationsprozess einfließen und ggf. auszuwerten sind. Grundsätzlich sind folgende Konfigurationssysteme denkbar:

- auf Basis von ERP/PDM-Systemen,
- innerhalb von CAD-Systemen,
- in Form eigenständiger Applikationen (Konfigurationssystem)
- oder auch als Kombinationen der Genannten.

Bei Konfigurationsvorgängen auf Basis von ERP/PDM-Systemen ist die Kopplung zu den Berechnungsmodellen i. d. R. nicht möglich. Innerhalb des CAD-Systems bestehen dazu zwar mehr Möglichkeiten, eine Verzahnungsberechnung (Zahnkupplung oder Zahnradgetriebe) zu implementieren, dies ist aber aufgrund der Komplexität nicht zielführend. Daraus folgt, dass für die gezeigten Fälle eigenständige Applikationen notwendig sind, die zentral die Systeme (Berechnung und CAD) koppeln, vgl. Abbildung 3-9.

3.3.1 Konfigurationssystem Zahnradgetriebe

Aus der Analyse des Auslegungsprozesses und der Konstruktionszeichnungen bereits gebauter Zahnradgetriebe resultierten folgende Feststellungen und Problemfelder:

- Hoher zeitlicher Aufwand beim Aufsuchen ähnlicher Getriebe, die als Kopiervorlage genutzt werden können.
- Es erfolgten lediglich Detailänderungen an den Modellen, die mehr oder weniger intuitiv vorgenommen wurden.
- Durchgängige Abänderung der Berechnungseingaben und Ausgaben war sehr aufwändig und nur schwer im Gesamten zur überblicken.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Die Auslegung war mit Hilfe vergleichsweise weniger Angaben aus der Verformungsanalyse des Kupferstranges möglich.
- Berechnungsmodelle und Gestaltmodelle „alter“ Getriebe waren nicht konsistent.
- Grundsätzlich wurden sehr ähnliche Konstruktionsdetails in verschiedenen Getriebebaugrößen verwendet

Diese Potentiale konnten durch einen automatisierten Konstruktionsprozess ausgenutzt werden. Dazu wurde eine eigenständige Applikation (in der Entwicklungsumgebung *VisualStudio2010(Microsoft)*) entwickelt, die über die Programmierschnittstelle unmittelbar mit dem CAD-System verknüpft wird. Dadurch werden der Datentransfer zwischen den beteiligten Softwaresystemen (*ProEngineer 4.0(PTC)*, *Mdesign(Tedata))* und Benutzerinteraktionen eingerichtet. Das CAD-System stellt den Leistungsumfang zur Abbildung Produktlogik bereit, sieht aber keine Möglichkeit vor, entsprechend komplexe Auslegungsberechnungen zu integrieren. Das MEBP bietet den nötigen Funktionsumfang, um die Berechnungen durchzuführen, kann aber nicht die komplexe Produktlogik abbilden. Festzuhalten ist, dass heute auf keines der beiden Systeme verzichtet werden kann. Ferner wurde eine Kalkulationstabelle (*Excel(Microsoft)*), in der die Logik zur Grobauswahl der Zahngeometrie abgebildet wurde, integriert. Auf dieser Basis werden Eingabedateien für die Berechnungsmodule erzeugt. Nach erfolgreichem Festigkeitsnachweis enthalten diese Dateien aktuelle, geometrierelevante Größen, die ausgelesen werden können. Die so gesammelten Parameter werden verarbeitet und dienen zur Steuerung und Auswahl der Getriebekomponenten sowie deren geometrischer Ausprägung. Der Aufbau einer neuen Getriebevariante erfolgt dann vollautomatisiert. Dazu müssen vordefinierte Strukturmodelle variiert, Teileausprägungen (über Parameter oder Familientabellen) angepasst und in Baugruppen platziert werden. Abbildung 3-6 zeigt schematisch die Organisation der verschiedenen Aufgaben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

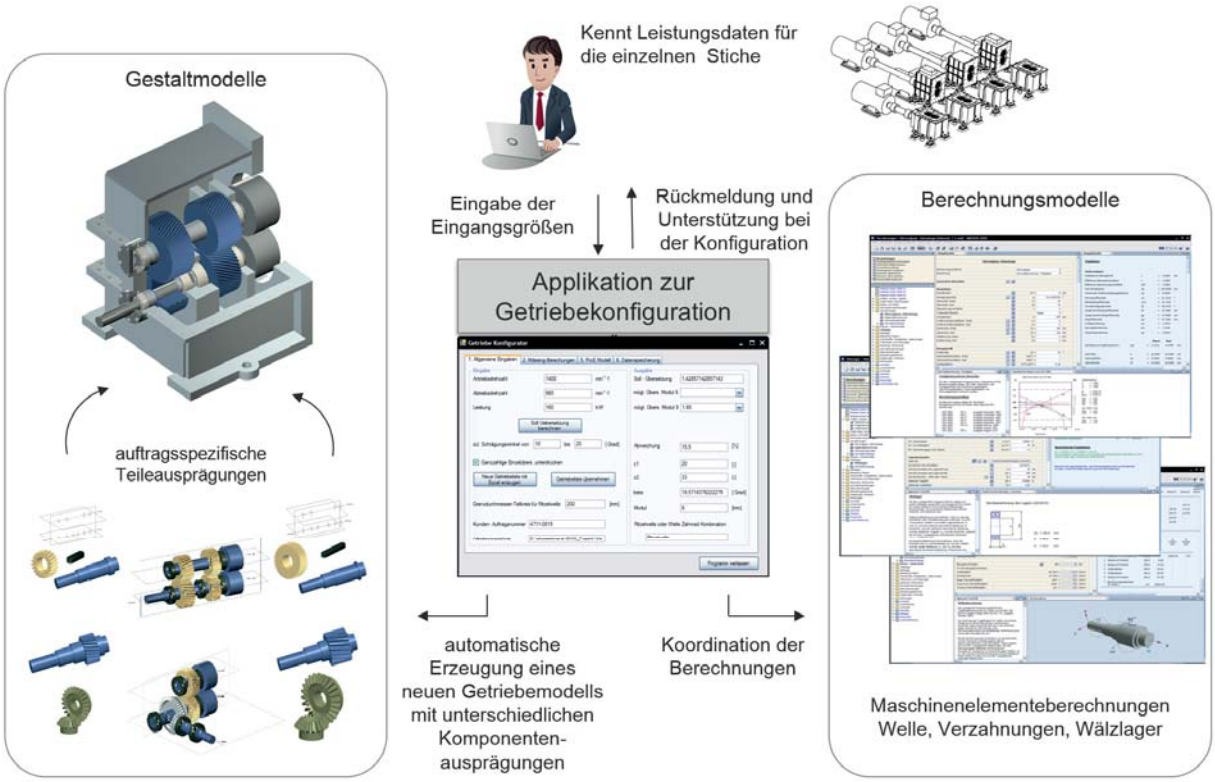


Abbildung 3-6: Konfigurationssystem für Getriebe

Jeder Getriebegröße liegt demnach ein vordimensioniertes Mastermodell (sowohl für Gestalt- als auch für die Berechnung) zugrunde, das mit einem auftragsspezifischen, aus der Vorauslegung bekannten Parametersatz gespeist wird. Die Auswertung des Regelwerks und die weitere interaktive Festlegung von Konstruktionsparametern führen dann zum auftragsspezifischen Getriebe. Die Anbindung zu einem PDM-System hilft dem Benutzer, bereits gebaute Getriebe mit gleicher Übersetzung bzw. gleichen Leistungsdaten zu finden, und verhindert so die unnötige Erstellung von Duplikaten.

3.3.2 Konfigurationssystem Zahnkupplung

Eine sehr ähnliche Vorgehensweise konnte bei der Erstellung des Konfigurationssystems für die Zahnkupplungen angewendet werden. Abbildung 3-7 zeigt die Arbeitsumgebung des Konfigurationssystems für die Balligzahnkupplungen ZBG. Die Ein- und Ausgabe von Daten und deren Koordination übernimmt eine mit *Spyydmaxx(ACATEC)* (dedizierte Software zur Erstellung von Konfigurationssystemen) entwickelte Applikation. Derzeit vergleichbare Konfigurationssoftware ist in [Br13] gegenübergestellt. Von hier aus werden die CAD-Modelle (*ProEngineer 3.0 (PTC)*) manipuliert und die Berechnungen *(Excel(Microsoft))* ausgelöst. Je nach Auslegungsszenario werden unterschiedliche Pflichtfelder aktiviert und deren Eingabe mittels Plausibilitätskontrollen (Prüfung der Wertebereiche) überwacht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

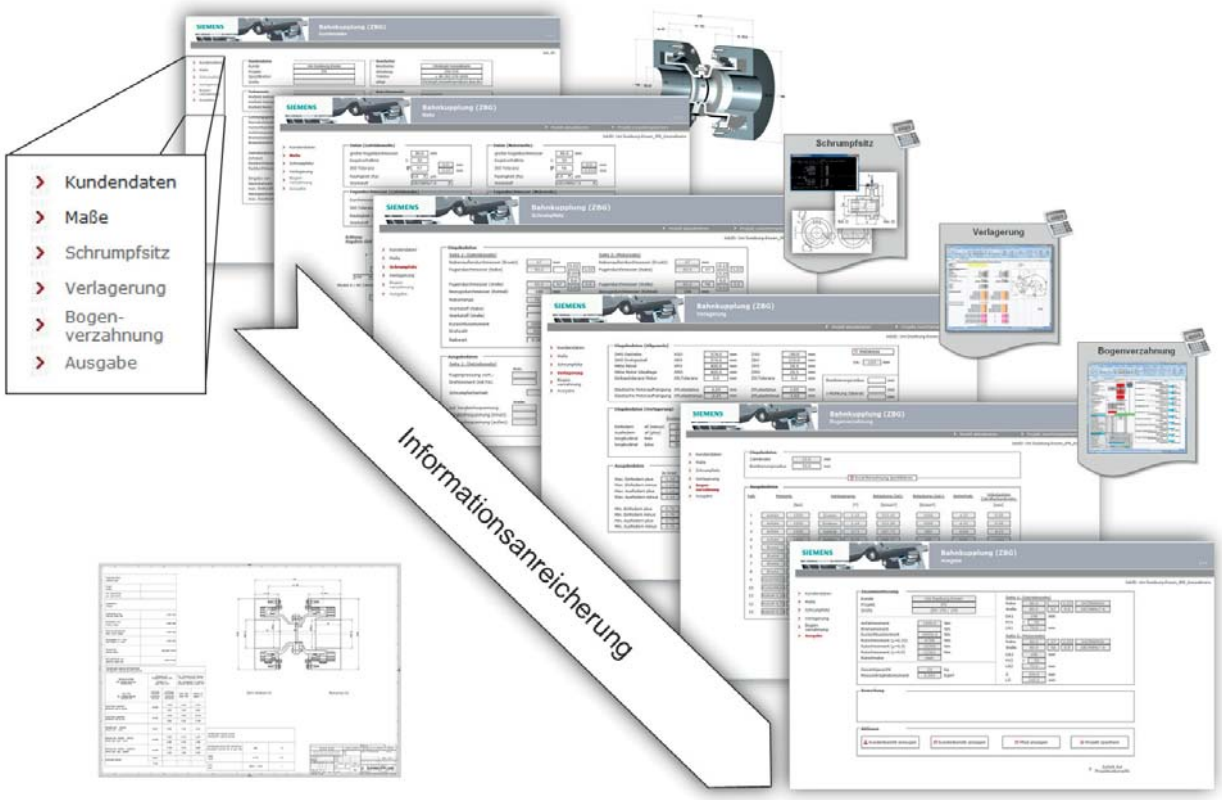


Abbildung 3-7: Informationsanreicherung im Konfigurationssystem Kupplungen

Der Auslegungsprozess beginnt mit der Kundenanfrage (Konstrukteur beim Hersteller von Schienenfahrzeugen). Zusammen mit dem Kunden legt der Konstrukteur interaktiv gestützt die gewünschten Konstruktionsparameter fest. Nach dem Konfigurationsvorgang erhält der Kunde eine sprachenabhängige Dokumentation über den Berechnungsgang, eine 2D-Zeichnung der Kupplung mit den wichtigsten Konstruktionsmerkmalen und ein 3D-Modell im STEP Format. Das gesamte Projekt wird in einer Datenbank gespeichert, sodass die weitere Nutzung und Anpassung bzw. wiederholte Zugriffe gewährleistet werden. Der genaue Aufbau der Dialoge kann dem Anhang entnommen werden. Der Nachteil derartiger Lösungen ist, dass der Kunde spätere Änderungswünsche nur über einen vergleichsweise aufwendigen erneuten Kontakt prüfen kann. Das STEP-Modell beinhaltet nur die aktuelle geometrische Ausprägung. Wünschenswert wäre ein Modell, das die Konstruktionsabsicht und Produktlogik kapselt, sodass sie für den Kunden verborgen bleibt, aber dennoch das Verhalten und die mögliche Varianz der Kupplung wiedergibt.

3.3.3 Modellkonfiguration und Automatisierung des Konstruktionsprozesses

Sowohl die Getriebe als auch die Kupplungen veranschaulichen, dass heute Systeme notwendig sind, die folgende Zwecke erfüllen:

- die Konstruktionsvorschrift in einem Regelwerk abbilden,
- den Informationsaustausch mit anderen Softwaresystemen ermöglichen, um Berechnungen einzubinden (weiteres dazu folgt in Kapitel 4),

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- zentrale Eingaben vom Benutzer erfassen und Ergebnisse anzeigen (Dialoge) sowie
- Eingaben und Ergebnisse speichern und diese für weitere Auslegungen bereitstellen, um zu vermeiden, dass identische Konfigurationen erneut erzeugt werden.

Aus den Beispielen abgeleitet, bietet sich zur Automatisierung eines Konstruktionsprozesses die in Abbildung 3-8 dargestellte Schrittfolge an. Dabei ist die Rollenverteilung verschiedener Personen zu beachten. Der Konstrukteur taucht auffallend oft auf, woraus sich erneut seine hohe Verantwortung ableiten lässt.

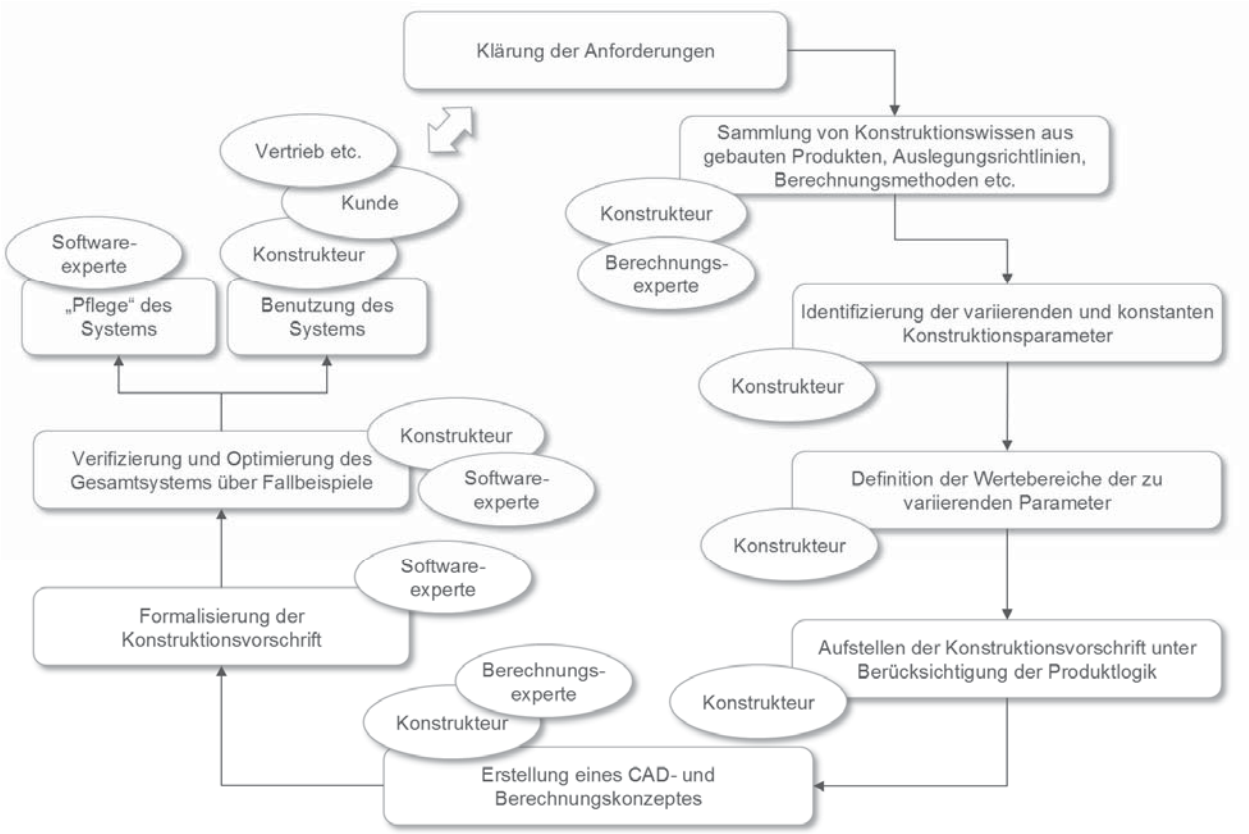


Abbildung 3-8: Schritte zur Automatisierung eines Konstruktionsprozesses

Klärung der Anforderungen: Vergleichbar mit der Entwicklung eines Produktes muss zunächst eine Klärung der Anforderungen stattfinden. Dazu kann die aus der Konstruktionsmethodik bekannte Anforderungsliste herangezogen werden, um z. B. zwischen Wunsch und Forderung zu unterscheiden. Ein weiterer Punkt ist die Klärung, wer das System später bedienen soll. Möglich sind z. B.: Kunde, Konstrukteur, Konstrukteur einer anderen Abteilung, Vertrieb oder auch eine Kombination dieser Personen. Die Festlegung, wer das System später bedient, entscheidet signifikant über die nötige Genauigkeit und den Detaillierungsgrad der Konstruktionsprozessabbildung. Für ein System, das der Konstrukteur selber nutzt, ist es ggf. möglich, auf die automatisierte Verarbeitung von Berechnungser-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gebnissen zu verzichten, da er diese selbst interpretieren kann. Bei einem System für den Kunden hingegen ist eine derartige Vereinfachung nicht akzeptabel. Weiterhin kann ein Konfigurationssystem bis hin zur Auslösung von Fertigungsprozessen reichen, sodass eine zusätzliche Verarbeitung von fertigungsrelevanten Informationen erfolgen muss.

Sammlung von Konstruktionswissen: Eng verzahnt mit der Anforderungsklärung ist die Analyse des Produktes. Hierzu ist es zweckmäßig, möglichst viele bereits gebaute Produkte zu analysieren, sowie vorhandene Auslegungsrichtlinien und Berechnungsmethoden auszuwerten.

Identifizierung variierender und konstanter Parameter: Es muss eine Unterscheidung getroffen werden, welche Konstruktionsparameter als konstant und welche als variabel definiert werden sollen. Oftmals werden in dieser Phase weitere Standardisierungspotentiale aufgedeckt, da die Konstruktionen neu überdacht werden.

Definition der Wertebereiche variierender Parameter: Im Bereich der Konfiguration von klassischen maschinenbaulichen Produkten ist es schwierig, den Spagat zwischen einer hoch standardisierten Produktausprägung (viele Konstruktionsparameter und deren Wertebereiche werden festgelegt) und einem dennoch anpassungsfähigen Prozess zu finden, um begrenzt auf unvorhergesehene Kundenwünsche bzw. Anpassungen reagieren zu können. Das bedeutet, dass Konfigurationssysteme auch bedingt im Bereich der Anpassungskonstruktion einsetzbar sind. Sie können in diesem Zusammenhang zur Grobdimensionierung genutzt werden, vgl. [Bi10]. Bei Auftragseingang muss dann ein zusätzliches Detailengineering vorgenommen werden, vgl. Beispiel aus Abbildung 3-1. So kann es zielführend sein, „leere“ oder nur „grob“ vorbereitete Komponenten über das Konfigurationssystem zu erzeugen, die vom Konstrukteur weiter ausdetailliert werden. Die Festlegung der Wertebereiche ist dennoch eine besondere Herausforderung, wie in Kapitel 4.4 weiter konkretisiert wird.

Aufstellen der Konstruktionsvorschrift: Der Konstrukteur ist maßgeblich für die Definition der Konstruktionsvorschrift verantwortlich. Da er den tiefsten Einblick in seine Konstruktion hat, kann er die Abläufe im nötigen Detaillierungsgrad beschreiben. Es ist hilfreich, die zu entwickelnden Ablaufpläne dabei durch schematische bzw. skizzenhafte Darstellungen oder Hinweise in Textform zu ergänzen. Es entsteht eine Art Pseudo-Code, der später in die systemspezifische Sprache des Konfigurationssystems zu übersetzen ist.

Erstellung des CAD- und Berechnungskonzeptes: Sowohl auf der Gestalt- als auch auf der Berechnungsseite müssen anpassungsfähige Mastermodelle bereitgestellt werden, welche die in der zuvor definierten Konstruktionsvorschrift vereinbarten Variationen zulassen. Auf der Berechnungsseite muss neben der Festlegung des Berechnungsablaufs die Werkzeugauswahl entsprechend funktionaler Anforderungen festgelegt werden. Auf der Gestaltungsseite muss die im CAD-System zur Verfügung stehende Funktionalität zur Abbildung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

der Produktlogik genutzt werden, was i. d. R. tiefgreifende Kenntnis der Möglichkeiten des CAD-Systems voraussetzt. Darüber hinaus ist zu definieren, wie der Informationsabgleich zwischen Gestalt- und Berechnungsmodell erfolgt. Dies wird ebenfalls in Kapitel 4 weiter ausgeführt.

Formalisierung der Konstruktionsvorschrift: Die Konstruktionsvorschrift muss für die Softwareverarbeitung aufbereitet werden. Hierzu wird softwarespezifisches Wissen benötigt. In dieser Phase wird definiert, wie Datenbanken, Regelwerk, Entscheidungstabellen, Ein- und Ausgabefunktionen etc. aufzubereiten sind, um die geforderte Funktionalität bereitzustellen. Da i. d. R. mehrere Möglichkeiten bestehen, Wissen abzulegen, ist kritisch zu prüfen, wo es geeignet verwaltet und (vom Konstrukteur ohne Programmierkenntnisse) ergänzt werden kann. Neben den technischen Anforderungen sind insbesondere Sprachbarrieren zwischen dem Konstrukteur und dem Softwareexperten zu überwinden.

Verifizierung und Optimierung des Systems: Wenn ein erster funktionsfähiger Prototyp des Gesamtsystems bereitsteht, müssen Testläufe durchgeführt werden. Hierzu sind neben alten Konstruktionen, die als Fallbeispiele genutzt werden können, auch die Grenzbereiche der Parameter und deren Kombinationsmöglichkeiten zu untersuchen. Dies führt zu Extrembetrachtungen, die ggf. Fehler in der Konstruktionsvorschrift aufdecken. An dieser Stelle setzt dann ein iteratives Vorgehen ein, um Fehler sukzessiv auszugleichen.

3.3.4 Fazit

Der Aufbau eines Konfigurationssystems erfordert zunächst einen hohen Arbeitsaufwand. Alle nötigen Prozesse müssen in den entsprechenden Softwarewerkzeugen umgesetzt und für die Automatisierung aufbereitet werden. Darüber hinaus ist der Auslegungsablauf als Logik zu implementieren. Ist diese Arbeit geleistet, resultiert der Vorteil einer deutlich effektiveren Zusammenstellung der Produkte, da der Bediener durch die Produktauslegung geführt wird. Wie groß die zeitliche Ersparnis durch Eliminierung der Routineaufgaben ist, hängt stark vom Produkt ab und lässt sich nicht zuverlässig allgemein quantifizieren. Die aufgeführten Beispiele und weitere vergleichbare Umsetzungen ([Po12], [Po13], [Ma13], [KöDa08]) zeigen eine Streubreite der Zeitersparnisfaktoren zwischen ca. 1,5 und 50. Das bedeutet, dass die Auslegung bis zu 50-mal schneller abgewickelt werden kann als über den „herkömmlichen“ Weg. Neben der zeitlichen Ersparnis resultiert aus derartigen Umsetzungen eine Steigerung der Konstruktionsprozessqualität u.a. durch Vermeidung der Nichtberücksichtigung relevanter Vorschriften.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

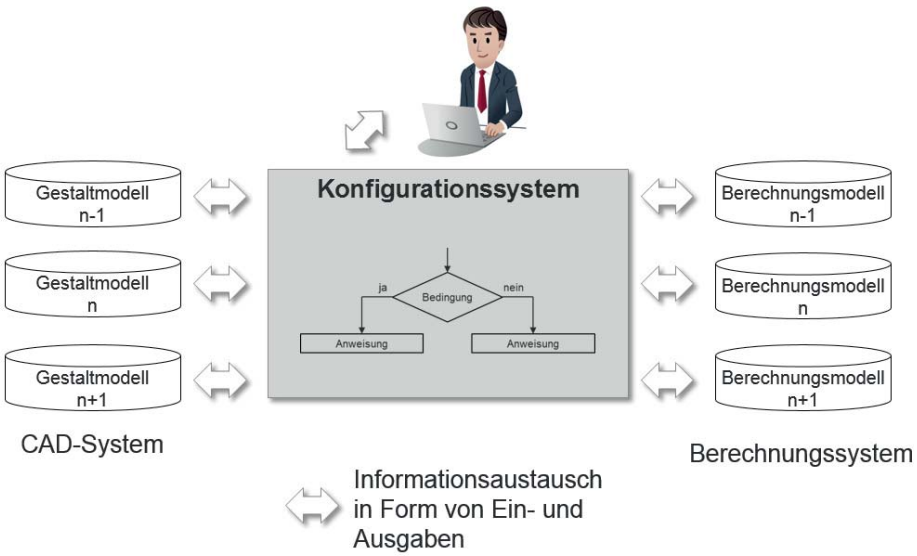


Abbildung 3-9: Verteilung der Informationen über das Konfigurationssystem

Die Beispiele haben gezeigt, dass die notwendige Informationsübertragung zwischen dem Gestalt- und Berechnungsmodell vom Konfigurationssystem übernommen werden kann (Abbildung 3-9). Im Rahmen der Variantenkonstruktion sichert das zentral angeordnete Konfigurationssystem die Modellkonsistenz. Auf begrenzte Änderungen beschränkt, kann mit einem Konfigurationssystem auch auf notwendige konstruktive Anpassungen der Variantenkonstruktion (Redesign) reagiert werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn bereits bei der Definition des Konfigurationssystems Maßnahmen hinsichtlich der Erweiterbarkeit und Variabilität getroffen wurden. Dennoch sinkt mit steigendem Neuheitsgrad einer Konstruktion die Einsatztauglichkeit eines Konfigurationssystems. Die heute verfügbaren Möglichkeiten, Gestaltungs- und Berechnungsprozesse effizient zu koppeln, können daher in Korrelation zum Neuheitsgrad der Konstruktion gestellt werden.

3.4 Konzipieren und Entwerfen in primären Konstruktionsprozessen

Am Beispiel des Getriebeverdichters werden in diesem Kapitel Konstruktionsprozesse mit großem Neuheitsgrad betrachtet. Kapitel 3.3.3 bewertet die Erkenntnisse und die betrachteten Probleme zusammenfassend.

3.4.1 Konzipieren in einer Anpassungskonstruktion

Das Getriebe des Getriebeverdichters kann als eine Sonderbauform eines Stirnradgetriebes betrachtet werden. Somit kann die entstehende Gesamtverlustleistung äquivalent zur Verlustleistung in Zahnradgetrieben untergliedert werden: Verzahnungs-, Lager-, Dichtungs- sowie sonstige Verluste. Diese Verlustleistungen können bei weiterer Untergliederung einerseits den lastabhängigen-, andererseits den lastunabhängigen Teilen zugeordnet werden, vgl. [Sc09]. Aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkeit des Großrades (bis zu 170m/s bzw. 612km/h) bilden die Ventilationsverluste (die den Leerlaufverlusten zuzu-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ordnen sind) den größten Teil der Gesamtverlustleistung. Ventilationsverluste können auf die Reibung zwischen den Zahnrädern bzw. deren Geometrie (Zähne an den Stirnseiten sowie den Radseiten) und des umgebenden Mediums zurückgeführt werden. Die Ventilationsverluste können nach GAESE [Ga02] u.a. durch Variation der folgenden Parameter, beeinflusst werden: Modul, Schrägungswinkel, Zähnezahl, Zahnradbreite, Gehäuseinnengeometrie (u.a. Abstände zu den Radseiten) und der dynamischen Viskosität des umgebenden Mediums. Die Variation dieser Parameter beeinflusst einerseits die Ventilationsverluste, andererseits die Zuverlässigkeit (Festigkeit, Wärmebilanz etc.) und das dynamische Laufverhalten des gesamten Systems. GAESE liefert zudem analytische Gleichungen zur Bestimmung der Ventilationsverluste. Diese beruhen auf experimentellen Ergebnissen. Aufgrund der besonderen Getriebestruktur und der Baugröße ist jedoch keine Übertragbarkeit gegeben.

Aus der Beobachtung heraus, dass durch verhältnismäßig kleine geometrische Änderungen große Auswirkungen auf die Strömungseffekte erzielt werden können, ist zu ermitteln, welche Anpassungen an der Ist-Situation eine möglichst große Reduzierung der Ventilationsverluste bewirken könnte. Im Folgenden wird daher ein Auszug der Ansätze vorgestellt, die u.a. über die klassischen konstruktionsmethodischen Ideenfindungsmethoden (vgl. Literatur zur Konstruktionsmethodik aus Kapitel 2.3) ermittelt wurden.

Lösungsansatz 1 – Asymmetrische Verzahnung: Neben der „ventilationsgerechten" Gestaltung der Verzahnungsgeometrie (z. B. kleinste/r mögliche/r Zahnradbreite, Zahnhöhe, Modul) verspricht die Verwendung einer asymmetrischen Verzahnung positive Effekte. Asymmetrische Verzahnungen werden in Getrieben mit Vorzugslastrichtung verwendet (z. B. Hebezeuggetriebe, Windkraftanlagengetriebe). Durch unterschiedliche Eingriffswinkel von Arbeitsflanke (z. B. α=40) und Rückflanke (α=10°) entstehen asymmetrische Zähne, die eine hohe Flankentragfähigkeit und Fußfestigkeit aufweisen, vgl. [BrGo12]. Zähne mit kleinerem Modul, kleinere Zahnhöhe etc. (im Vergleich zur Standardverzahnung) wären die Folge. Die Verwendung einer asymmetrischen Verzahnung könnte sich somit reduzierend auf die Ventilationsverluste auswirken.

Lösungsansatz 2 – Oberfläche der Radkörper: Dieser Ansatz basiert auf der Idee, eine strömungsoptimierte Oberflächenstruktur zu nutzen, wie sie z. B. von den Dimples (Vertiefungen) eines Golfballs bekannt ist. Die durch die Dimples hervorgerufen Verwirbelungseffekte sorgen für einen höheren Auftrieb des Golfballs. Am Deutschen Luft und Raumfahrtzentrum konnten die positiven Effekte der Dimples an der Außenhaut eines Modells von einem Hochgeschwindigkeitszug nachgewiesen werden [Wü04]. Abhängig von der Geschwindigkeit des Zuges konnten bis zu 16% geringere Reibungsverluste nachgewiesen werden. Im Bereich der Getriebeverdichter scheint insbesondere die Anpassung der Radseiten des Großrades von Interesse, da das Ventilationsverlustmoment mit dem Radradius zunimmt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Lösungsansatz 3 – Strömungsoptimierte Einhausungen: Zusätzliche, im Gehäuseinneren angeordnete Einhausungen der Zahnräder mit geringen Spaltweiten zum Kopfkreis und zu den Radseiten können positive Strömungseffekte in Getrieben erzeugen, vgl. [HaHu11]. Als weitere Steigerung kann in den Einhausungen ein Vakuum erzeugt werden oder es kann ein Gas mit niedriger dynamischer Viskosität eingeleitet werden.

Lösungsansatz 4 – Eliminierung der Zähne: Der letzte hier vorgestellte Ansatz resultiert aus der Idee heraus, auf die Verlust verursachenden Zähne zu verzichten. Magnetgetriebe nutzen die abstoßende Wirkung der Pole von Permanentmagneten. Die Kraftübertragung erfolgt nicht mehr über kämmende Zähne, sondern über magnetische Kräfte, die zwischen den Rädern wirken. Der Aufbau und die Analyse eines magnetischen Planetengetriebes wird z. B. in [XuZh09] vorgestellt, ein magnetisches Cyclogetriebe in [JøAn08]. Industriellen Einsatz finden magnetische Getriebe heute in Pumpen, Ventilantrieben, Schleifspindelantrieben oder Aufzügen. Grundsätzlich können unter Verwendung eines Magnetgetriebes die Ventilationsverluste reduziert und darüber hinaus die lastabhängige Zahnflankenreibung eliminiert werden.

3.4.2 Konzipieren in einer Neukonstruktion mit disziplinübergreifenden Aspekten

An dieser Stelle soll am Beispiel des Getriebeverdichters aufgezeigt werden, welche Probleme zu bewältigen sind, wenn das Gesamtkonzept der konstruktiven Lösung in Frage gestellt wird. Der Getriebeverdichter hat den entscheidenden Nachteil, dass alle Verdichterstufen voneinander drehzahlabhängig sind. Dies ergibt sich durch die Abhängigkeit zwischen Ritzelwellen und Großrad. Einerseits ergeben sich hierdurch thermodynamische Nachteile (die nicht weiter ausgeführt werden sollen), andererseits getriebetechnische Nachteile. Diverse Verzahnungsparameter müssen für alle Ritzelwellen identisch ausgeführt werden (z. B. Modul, Schrägungswinkel). Die Auswahl geeigneter Verzahnungsparameter für jede einzelne Ritzelwelle ist daher als Kompromisslösung anzusehen. Des Weiteren bestehen geometrische Abhängigkeiten zwischen den Außendurchmessern der Spiralgehäuse, dem Durchmesser des Großrades und damit dem Teilungsdurchmesser, auf dem die Ritzelwellen angeordnet sind. Insgesamt resultieren hieraus gegenseitige Beeinflussungen, die bei der Auslegung ganzheitlich zu betrachten sind.

Das Getriebe eines Getriebeverdichters erfüllt zwei Hauptfunktionen. Zum einen die Erhöhung der Drehzahl (Funktion: „Vergrößern“), zum anderen die Verteilung (Funktion: „Teilen“) der Antriebsleistung auf die verschiedenen Stufen.

Die Funktionsstruktur ist ein abstraktes Abbild der Gesamtfunktion. Sie lässt eine besondere Sichtweise auf ein Produkt zu, die helfen kann, neue Lösungen zu entwickeln. Die Aufstellung einer Funktionsstruktur zu einem bestehenden System kann also ein methodisches Hilfsmittel sein, neue Lösungsansätze für Probleme zu finden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

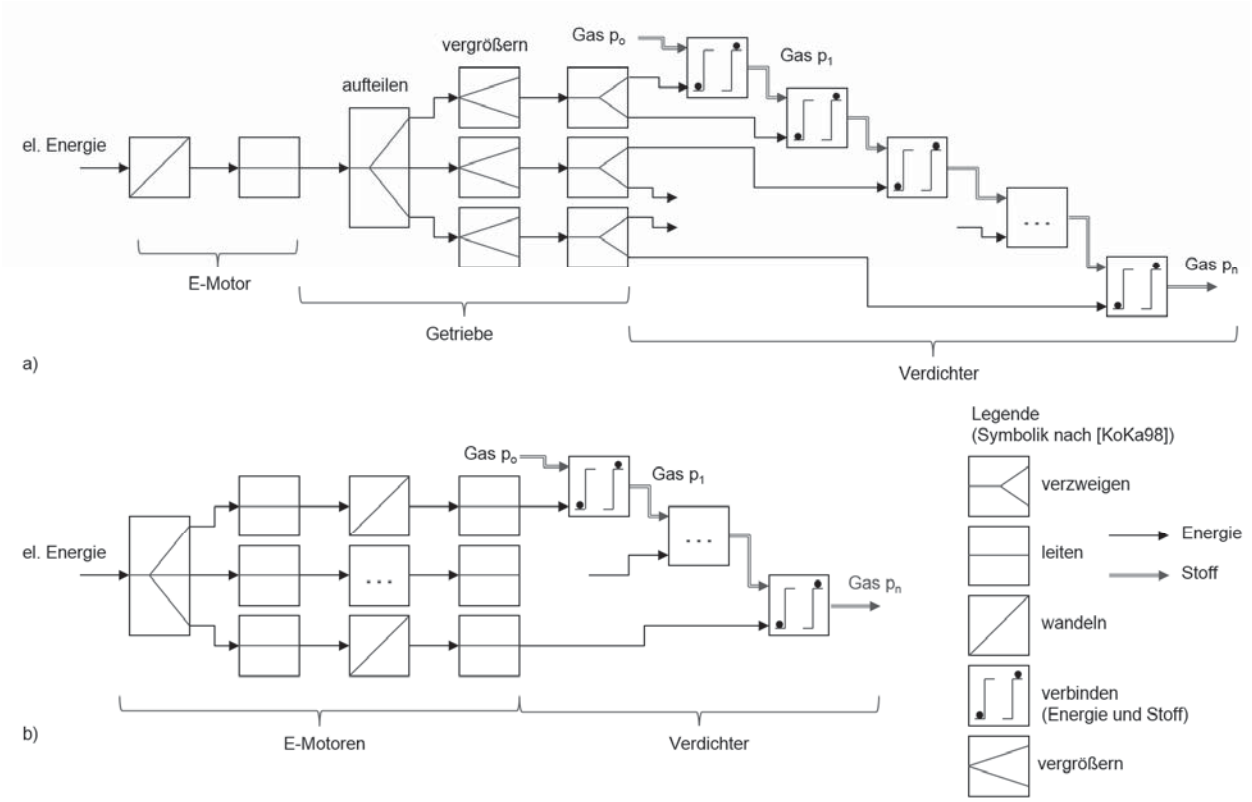


Abbildung 3-10: Variation der Funktionsstruktur

Separiert man auf diesem abstrakten Niveau die Funktionen „Teilen“ und „Vergrößern“ derart, dass keine Teilung der mechanischen Energie notwendig wird, entsteht eine Lösung, die für jede Verdichterstufe einen eigenen elektrischen Antrieb vorsieht (Abbildung 3-10). Die Ideallösung würde sich somit durch den Direktantrieb der einzelnen Laufräder darstellen, sodass auf das Getriebe vollständig verzichtet werden kann. Daraus leiten sich direkt verschiedene Fragestellungen ab:

- Existieren elektrische Antriebe, die entsprechend hohe Momente bei den geforderten Drehzahlen liefern?
- Resultiert aus den vielen kleineren Antrieben tatsächlich eine geringere Verlustleistung?
- Wie groß sind die aus der Stufendrehzahlunabhängigkeit gewonnenen thermodynamischen Vorteile?
- …

Die Verfügbarkeit von Antriebsmotoren ist ein entscheidendes Kriterium, ob Direktantriebe realisierbar sind oder nicht. Die Recherche nach geeigneten Antrieben ergab, dass heute Antriebe bis zu einer Größenordnung von ca. 6MW bei ca. 7000 min^{-1} verfügbar sind. Das heißt, die Drehzahlgrenze limitiert den Einsatz auf die langsam laufenden Stufen. Ein Getriebe für die schneller laufenden Stufen ist aus heutiger Sicht unumgänglich. Abbildung 3-11 a) zeigt eine angepasste Funktionsstruktur.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Folgenden soll eine innovative Idee diskutiert werden, die innerhalb der Konzeptfindung unterschiedlicher alternativer Motor-Getriebe Kombinationen entstanden ist. Bei herkömmlichen elektrischen Antrieben steht der Außenteil fest und der innenliegende Teil wird als rotierender Teil ausgeführt. Die systematische Variation (als konstruktionsmethodisches Hilfsmittel) der Bewegungsart oder „kinematische Umkehr“ führt zur bekannten Außenläuferbauweise. Diese Bauweise findet als Nabenmotor u.a. im Bereich der Direktantriebe von Schienenfahrzeugen und elektrischen PWK ihr Einsatzgebiet. Das Planetengetriebe ist ebenfalls eine hinlänglich bekannte Getriebebauform. Betrachtet werden folglich zwei hinlänglich bekannte Funktionsprinzipien.

Der Außenteil des Nabenmotors zeigt eine gewisse Analogie zum Hohlrad eines Planetengetriebes. Daraus lässt sich die Idee ableiten, Nabenmotor und Planetengetriebe in Integralbauweise auszuführen und zum Antrieb der Stufen mit sehr hohen Drehzahlen einzusetzen. Naheliegend scheint es dabei zu sein, direkt zwei Laufräder anzutreiben, um u.a. einen Axialkraftausgleich herbeizuführen, auch wenn dabei die Drehzahlunabhängigkeit der beiden Stufen verloren geht. Abbildung 3-11 b) zeigt diese erste Konzeptidee. Der Nabenmotor versetzt das Hohlrad in Bewegung. Da das Planetengetriebe als Standgetriebe ausgeführt ist, der Planetenträger folglich ortsfest bleibt, kann der Stator des Nabenmotors gleichzeitig zur Befestigung der Planetenräder dienen.

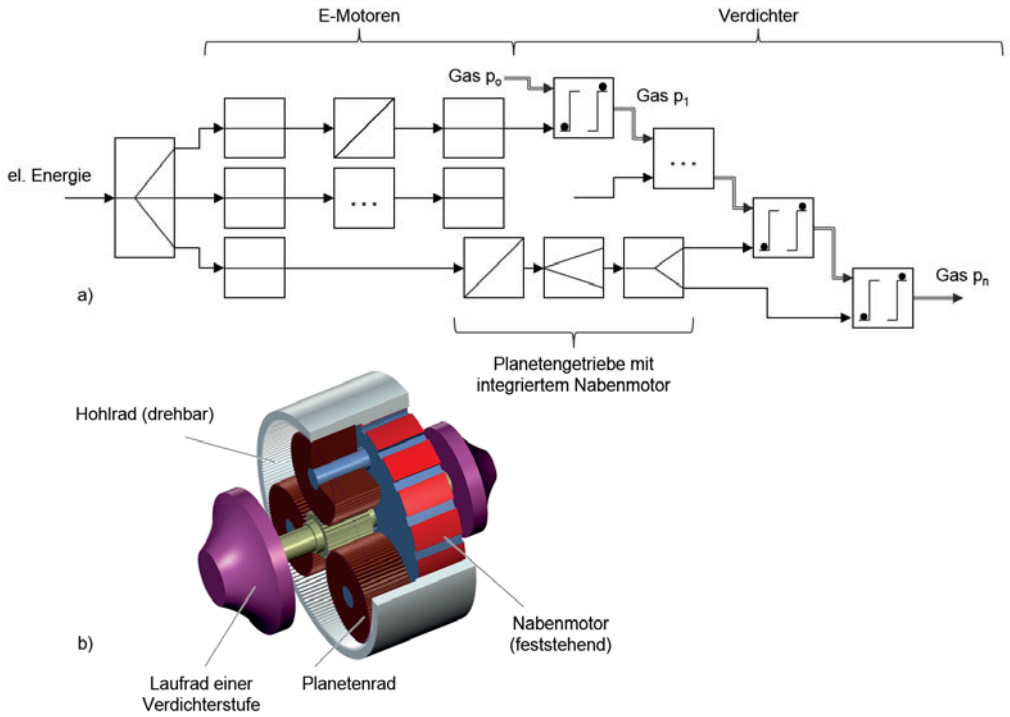


Abbildung 3-11: Erstes Konzept; a) Funktionsstruktur b) Planetengetriebe mit integriertem Nabenmotor

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Bewertung dieses Konzeptes fordert die Beantwortung folgender Fragestellungen:

- Welche Motorkonzepte wären hierzu heute verfügbar?
- Welche Größenordnung, bezogen auf die Motor und Getriebeabmessungen, wäre zu erwarten?
- Welche Verluste des Motors und Getriebes sind zu erwarten?
- Welche Lagerungskonzepte (insbesondere für das Hohlrad) wären möglich?
- Wie sind die Schmierung und die Wärmeabfuhr zu realisieren?
- ...

Bei der überschlägigen Gestaltung von Planetengetriebe und Nabenmotor sind aufgrund der integrierten Bauform gegenseitige Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Abbildung 3-12 zeigt den Auslegungskreislauf, der sich durch die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Gestaltung des Nabenmotors und Gestaltung des Planetengetriebes ergibt.

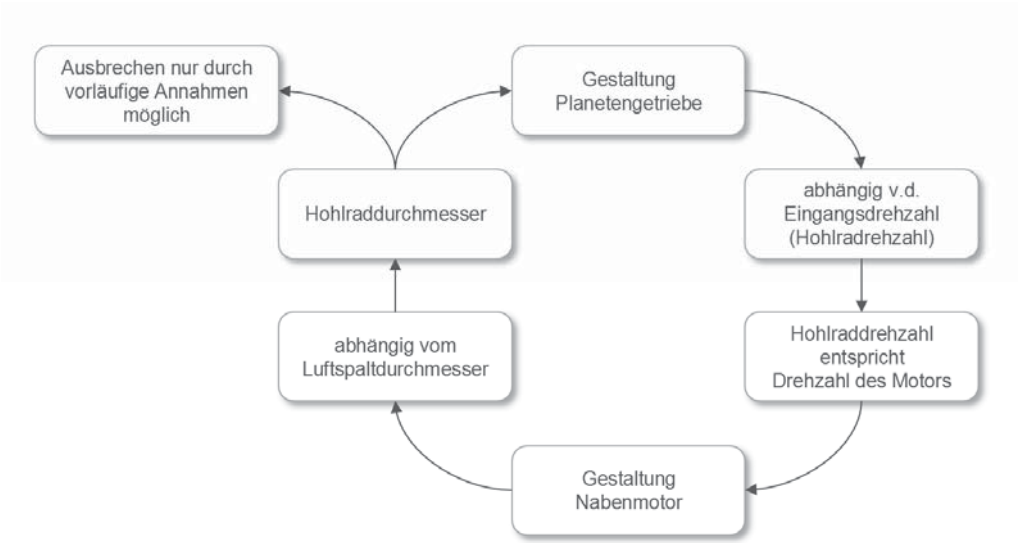


Abbildung 3-12: Auslegungskreislauf, Wechselwirkungen aufgrund der Abhängigkeiten

Zur Gestaltung des Planetengetriebes muss die Übersetzung bekannt sein, diese ergibt sich aus der Eingangs- und Ausgangsdrehzahl. Die Ausgangsdrehzahl kann für exemplarisch gewählte Verdichterstufenparameter festgelegt werden. Die Eingangsdrehzahl ergibt sich aus der möglichen Drehzahl des Nabenmotors, die vorerst nicht bekannt ist. Die Nabenmotordrehzahl hängt von der Netzfrequenz, Polzahl, Länge des Nabenmotors und der Luftspaltgeometrie ab. Wobei der Luftspaltdurchmesser abhängig ist vom Hohlraddurchmesser und dieser wiederum von der Übersetzung und damit von der Drehzahl des Nabenmotors. Ein Ausbruch aus diesem Kreislauf kann nur erfolgen, indem sukzessiv Konstruktionsparameter festgelegt werden, die wohlwissend im Laufe weiterer Iterationen erneut anzupassen sind.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Rahmen der Recherchearbeiten konnten verschiedene Softwaresysteme zur Auslegung der Verzahnung von Planetengetrieben ermittelt werden. Demnach sollte es möglich sein, in verhältnismäßig kurzer Zeit eine Aussage zur Verzahnungsauswahl generieren zu können. Faktisch quittierten die Berechnungsprogramme entsprechende Eingaben mit der Angabe, dass die hinterlegten Berechnungsgrundlagen nicht für diese Größenordnungen gelten, was vermutlich auf die begrenzte Gültigkeit der implementierten Normen und Vorschriften zurückzuführen ist. Dennoch konnte über das MEBP *EAssistant(GWJ),* in Absprache mit einem weiteren Getriebeexperten, eine überschlägige Dimensionierung des Planetengetriebes realisiert werden, die Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen sein sollte. Nebenbei angemerkt, dass die üblichen Berechnungsprogramme für Planetengetriebe zwar die auftretenden lastabhängigen Verluste berechnen, nicht aber die entstehenden Ventilationsverluste. Softwaresysteme, die bei der Lösungsfindung zum elektrischen Antriebskonzept für diese Aufgabenstellung unterstützend wirkten, konnten im Rahmen der Recherche nicht gefunden werden.

Die Gestaltung des Nabenmotors erfolgt in Zusammenarbeit mit Experten[7] aus dem Bereich der elektrischen Antriebstechnik. Der Zugang erfolgte über einen im Rahmen der Recherche ermittelten Fachbeitrag zu den bereits erwähnten permanentmagneterregten Synchronantrieben [KaJö02]. Die Verfasser des Beitrags konnten kontaktiert werden, erkannten die Problemstellung und stellten einen Zusammenhang zu einem vergleichbaren, bis dahin einmalig hergestellten, aber lauffähigen elektrischen Antriebskonzeptes für eine Walzmühle her [KuLa11]. Die Ähnlichkeit der Problemstellung zum Walzmühlenantrieb motivierte sie dazu, überschlägig ein elektrisches Antriebskonzept für das Planetengetriebe zu erarbeiten. Mit Hilfe dieses Expertenwissens ließ sich in vergleichbar kurzer Zeit eine Aussage zur Machbarkeit ableiten. Diese Experten aufzufinden und sie zu einer Aussage zu veranlassen, benötigte ein Vielfaches der Zeit, die zur Hervorbringung der Aussage (die sich in diesem Fall auf überschlägige Berechnungen stützte) benötigt wurde. Auf Basis des ursprünglichen Konzepts gemäß Abbildung 3-11 b) konnte eine weitere Detaillierung erfolgen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-13 dargestellt. Man beachte insbesondere die notwendige Länge des Aktivteils des Nabenmotors im Vergleich zum ersten Konzeptentwurf.

[7] An dieser Stelle sei den Herrn Dr. Andreas Jöckel und Dr. Ekkehard Pittius gedankt (beide SIEMENS AG A&D Large Drives)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

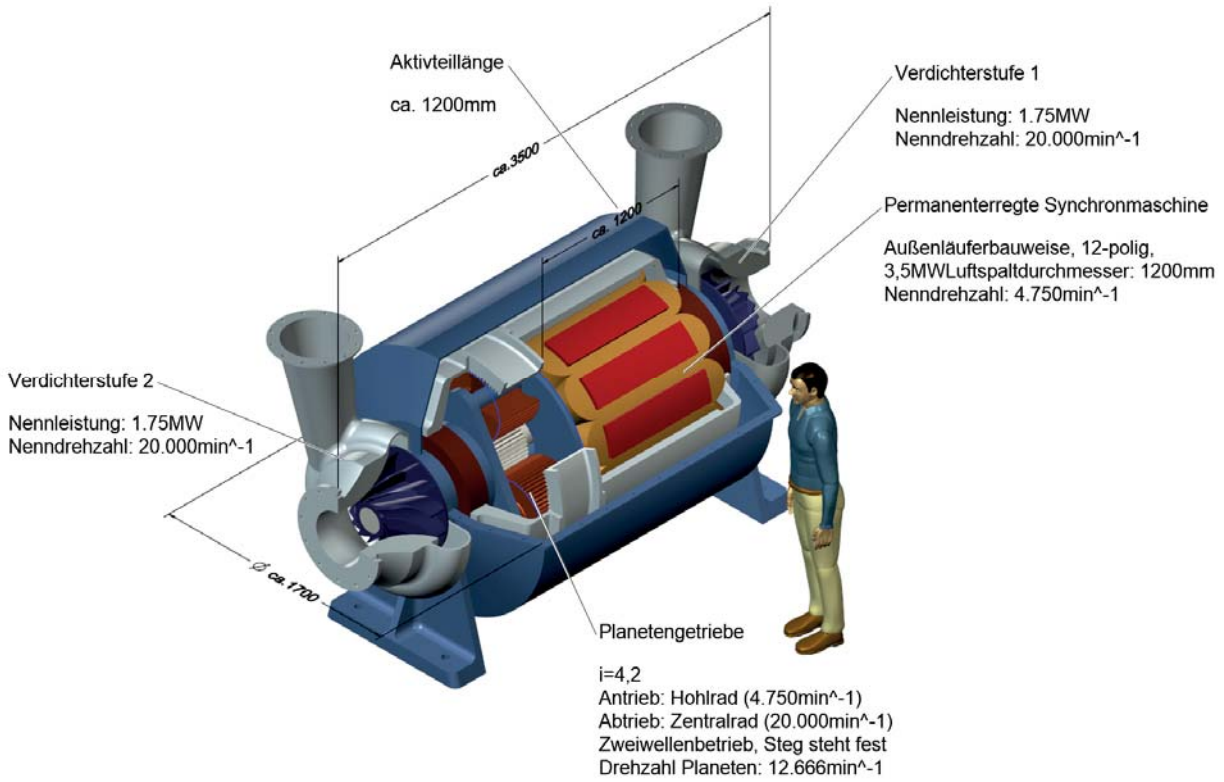


Abbildung 3-13: Detailliertes Konzept, Nabenmotor und Planetengetriebe in Integralbauweise

Aus dieser Ausbaustufe des Konzeptmodells lassen sich erneute Problemfelder und Lösungsansätze ableiten, die entsprechend den Anforderungen weiter zu qualifizieren sind.

Das entwickelte Konzept kann als eine innovative Alternative zum herkömmlichen Getriebeturboverdichter verstanden werden. Mittels der heute verfügbaren Methoden konnte in dem vorgesehenen Zeitfenster zwar der zur Erfindungsmeldung ausreichende Reifegrad erreicht werden, von einer ausreichenden Softwareunterstützung bei der Bewertung kann jedoch nicht gesprochen werden. Dieses Beispiel stellt vertretend für andere Problemstellungen typische Probleme und die vielschichtigen Facetten einer komplexen Konzeptentwicklung im Rahmen einer Neukonstruktion anschaulich dar.

3.4.3 Fazit

Kapitel 3.4.1 und 3.4.2 haben gezeigt, dass sich grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten von bekannten und industriell umgesetzten Teillösungen auf neue Problemstellungen projizieren lassen. Aus heutiger Sicht fällt die Prüfung der Übertragbarkeit zwischen gelösten Problemen und neuen Problemstellungen schwer und wird unzureichend über Softwaresysteme unterstützt. Die Analyse der vorgestellten Fragestellungen ist selbst mit modernen Simulationssystemen sehr kosten- und zeitintensiv. Hinzu kommt, dass ohne experimentell ermitteltes Wissen (das i. d. R. in die Simulationen, in Form von Materialmodellen oder Einflussfaktoren, einfließt) die Aussagegüte kritisch betrachtet werden muss. Die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Entscheidung, welcher/s Lösungsweg/-konzept weiter verfolgt wird, ist also von zentraler Bedeutung, aber auch heute noch größtenteils von Erfahrungswissen des Konstrukteurs beeinflusst. Hinzu kommt, dass der Konstrukteur abwägen muss, wie tief er zur Bewertung des Konzeptes in die Entwurfsphase oder sogar in die Detaillierungsphase vordringen muss, um entsprechende Untersuchungen vorzunehmen und möglichst frühzeitig die Eignung eines Konzeptes bzw. Entwurfs zu bewerten (Abbildung 3-14).

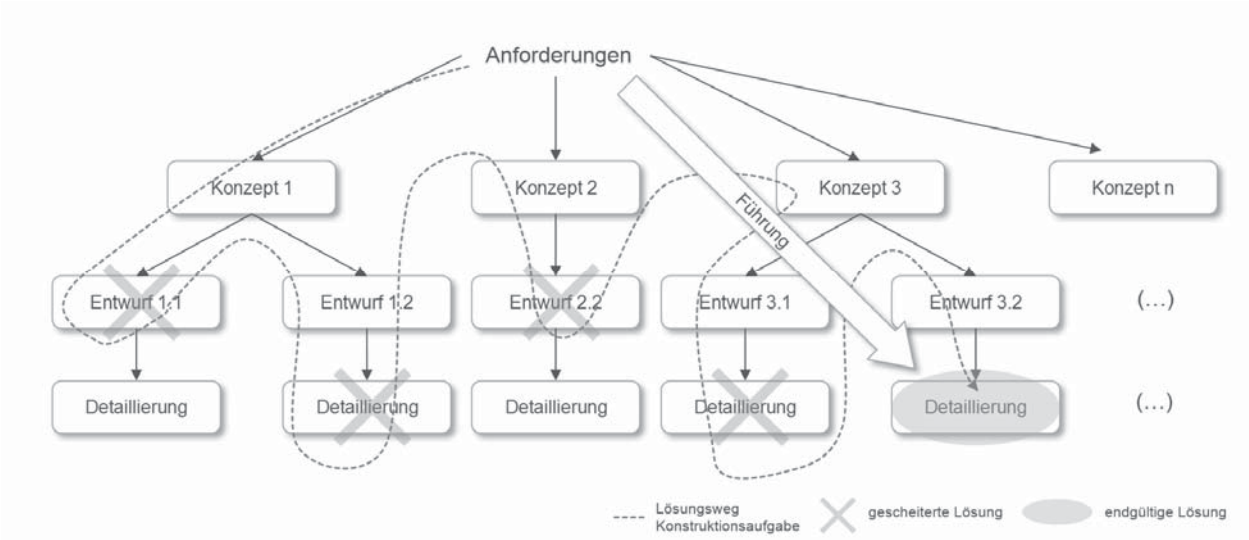


Abbildung 3-14: Frühzeitige Erkennung des „richtigen“ Lösungsweges

In Zukunft müssen entsprechend aufbereitete Unterstützungsbausteine, die mit spezifischem Expertenwissen angereichert sind, vergleichende Betrachtungen und Einschätzungen in frühen Stadien der Konstruktion ermöglichen. Ziel der Systemunterstützung muss es sein, den Konstrukteur bei der Suche nach dem erfolgversprechendsten Lösungsweg zu unterstützen. Förderlich wären bereits einschätzende Beurteilungsverfahren, die auch die Aussage liefern könnten, dass ein erdachtes Konzept oder Entwurf unter keinen Umständen realisiert werden kann. Wünschenswert ist diesbezüglich, nicht nur das Expertenwissen verschiedener Ingenieurdomänen dem Konstrukteur zugänglich zu machen, sondern in aufbereiteter Form direkt im Arbeitsumfeld „interaktiv“ zur Verfügung zu stellen. Bei disziplinübergreifenden Problemstellungen treten zudem Sprachbarrieren auf, die zu überwinden sind, um Funktionsprinzipien einander verständlich zu machen.

3.5 Die iterative Lösungssuche in einem primären Konstruktionsprozess

Die Beispiele aus Kapitel 3.4 tangieren komplexe physikalische Problemstellungen, zu denen die Bewertungsmethoden fehlen bzw. deren Anwendung hoch komplex ist. Als Kontrast beschreibt dieses Kapitel an einem vereinfachten aber repräsentativen Fallbeispiel, in welcher Form Bewertungsverfahren derzeit in primären Konstruktionsprozessen integriert sind und welche Verbesserungspotentiale sich in Bezug auf die iterative Lösungssu-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

che daraus ableiten lassen. Darüber hinaus stellt dieses Kapitel die Hypothese auf, dass die vorgestellte Problematik mit Hilfe der höherwertigen Konstruktionsobjekte im Rahmen dieser Arbeit (in Kapitel 5.3) gelöst werden kann.

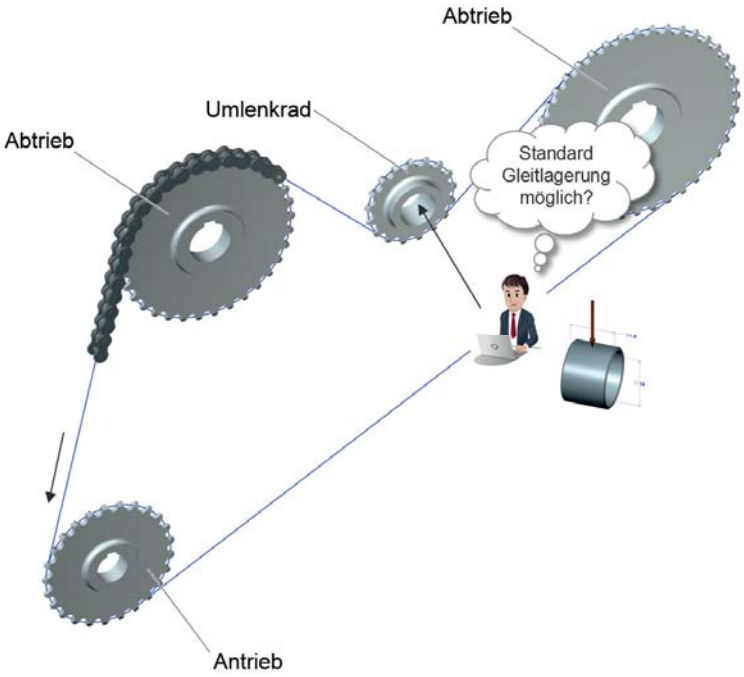


Abbildung 3-15: Entwerfen eines Kettentriebs

Annahmen und Ausgangspunkt: Die Auslegungs- und Berechnungsabläufe der im Folgenden betrachteten Komponenten und deren Zusammenhänge sind grundsätzlich bekannt. Ausgangspunkt sei eine Momentaufnahme während der Konstruktion eines Kettentriebes (ein Antrieb, zwei Abtriebe) gemäß Abbildung 3-15. Zur Sicherstellung der nötigen Umschlingungswinkel der beiden Abtriebe soll ein Umlenkrad eingesetzt werden (d. h. hier erfolgt keine Leistungsabgabe). Fokussiert wird auf die Entwurfs- und Ausarbeitungsphase. Der Kettentrieb ist bereits berechnet. Die resultierende Kraft, die auf das Umlenkrad wirkt, konnte über geometrische Beziehungen direkt im CAD-System (im Strukturmodell) ermittelt werden, gleiches gilt für den Zusammenhang zwischen Kettengeschwindigkeit, Umlenkraddurchmesser und Drehzahl. Eine alternative Ermittlung dieser Größen wäre ebenfalls denkbar. Der Konstrukteur beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob eine Gleitlagerung der Situation gerecht wird. Mit Hilfe der überschlägigen Dimensionierungsrechnung ($p<F/(d*b)$) wurde die Größenordnung bereits grob geprüft. Dem Konstrukteur steht neben dem CAD-System mit Normteildatenbank ein MEBP zur Verfügung. Die Leistungsdaten und die geometrische Situation sollen zunächst als feststehend angesehen werden. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, welche Systemunterstützung zur weiteren Gestaltung zu erwarten ist.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.5.1 Bewertungen im Gestalt- und Berechnungsmodell

Es zeichnen sich zunächst zwei Möglichkeiten zur weiteren Vorgehensweise ab:

- Berechnung einer Gleitlagerung mit dem MEBP, die weitestgehend optimal der Belastung entspricht; anschließende geometrische Bewertung im Baugruppenzusammenhang
- Auswahl einer Gleitlagerung (z. B. als Vorzugsteil), die geometrisch weitestgehend optimal zur Baugruppe passt; anschließende Berechnung der Gleitlagerung

Während im Berechnungsmodell nicht direkt ersichtlich ist, welche geometrische Auswirkung eine Änderung eines Parameterwertes nach sich zieht, kann im Gestaltmodell nicht direkt festgestellt werden, ob die aktuelle Gestalt belastungsrecht ist. Man beachte diesbezüglich, dass der Durchmesser der Gleitlagerung von dem Teilkreisdurchmesser des Umlenkrades und dessen Bund begrenzt wird. Auch die Breite der Gleitlagerung kann nicht beliebig variiert werden, wie noch weiter ausgeführt wird. Um nun eine Lösung herbeizuführen, ergibt sich ein ständiger Wechsel zwischen den beiden Modellen, um jeweils Parameter variieren zu können.

Abbildung 3-16 zeigt ein mögliches Wechselspiel zwischen dem Gestalt- und dem Berechnungsmodell. Man beachte, dass in beiden Modellen Geometrie,- Werkstoff- und Berechnungsparameter enthalten sind.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

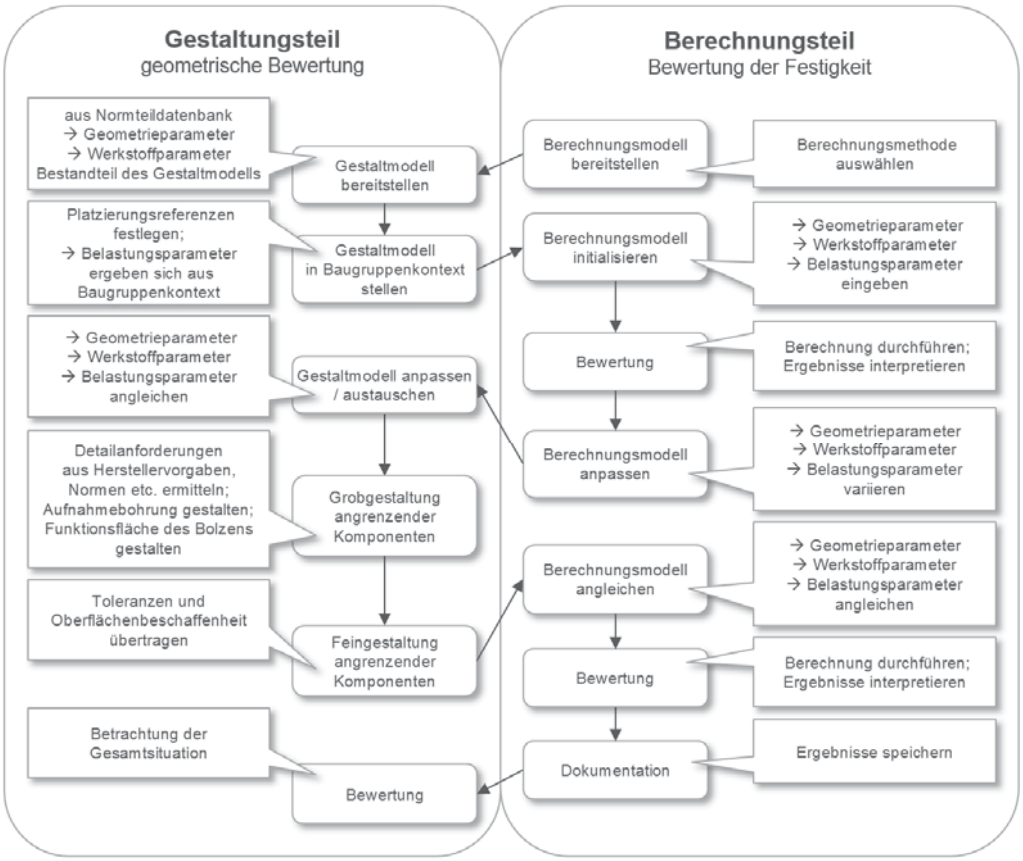


Abbildung 3-16: Wechselspiel zwischen Gestalt- und Berechnungsmodell

Aus diesen Feststellungen lassen sich folgende Potentiale/Eigenschaften für höherwertige Konstruktionsobjekte ableiten:

- Für viele Teile können „Standard"-Berechnungen herangezogen werden. Diese müssen direkt mit dem Gestaltmodell im CAD-System verknüpft werden, d. h. Verknüpfung von Gestalt- und Berechnungsmodell.
- Es kann zwischen baugruppenunabhängigen Parametern und baugruppenabhängigen Parametern, die sich erst im Baugruppenzusammenhang ergeben (z. B. die Drehzahl und Belastung), unterschieden werden.
- Die Platzierung der Komponenten könnte automatisierter erfolgen, indem das System nach geeigneten Einbaustellen „sucht" und entsprechend anbietet. In dieser Beispielbaugruppe existiert nur ein sinnvoller Einbauort für eine Gleitlagerung.
- Da die Belastung im Strukturmodell bereits enthalten ist, ist sie dem System generell bereits bekannt. Über einen „intelligenten" Verknüpfungsmechanismus muss lediglich der Zusammenhang zur Komponente hergestellt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Die funktionalen Abhängigkeiten angrenzender Komponenten (z. B. die in Herstellervorgaben oder in Richtlinien festgelegten Toleranzen oder Oberflächenbeschaffenheiten für angrenzende Komponenten) müssen automatisiert übertragen werden-

3.5.2 Nachführen von Änderungen

Bedingt durch die iterative Vorgehensweise beim Konstruieren ist davon auszugehen, dass bereits festgelegte Konstruktionsparameter im Nachhinein angepasst werden müssen. Es sei angenommen, dass die Gleitlagerung erfolgreich in den Baugruppenkontext integriert werden konnte. In diesem Beispiel soll nun im Nachhinein lediglich die vertikale Position des Umlenkrades (im CAD-System) variiert werden, um den Umschlingungswinkel zu korrigieren. Alternativ könnten auch andere Parameter variiert werden, die in Abhängigkeit zur Gleitlagerung stehen, z. B. die Leistung oder Drehzahlen. Die Veränderung der Position führt zu einer Veränderung der Lagerbelastung, in diesem Fall ruft sie eine Erhöhung hervor. Zwischen Berechnungs- und Geometriemodell muss nun Konsistenz hergestellt werden. Abbildung 3-17 zeigt, dass bei Änderungen stetig alle Abhängigkeiten zur Lagerung geprüft und die Berechnung neu ausgeführt werden muss. Diese Bedingung lässt sich aufgrund der Übertragbarkeit auf viele andere Konstruktionskomponenten im Baugruppenzusammenhang verallgemeinern.

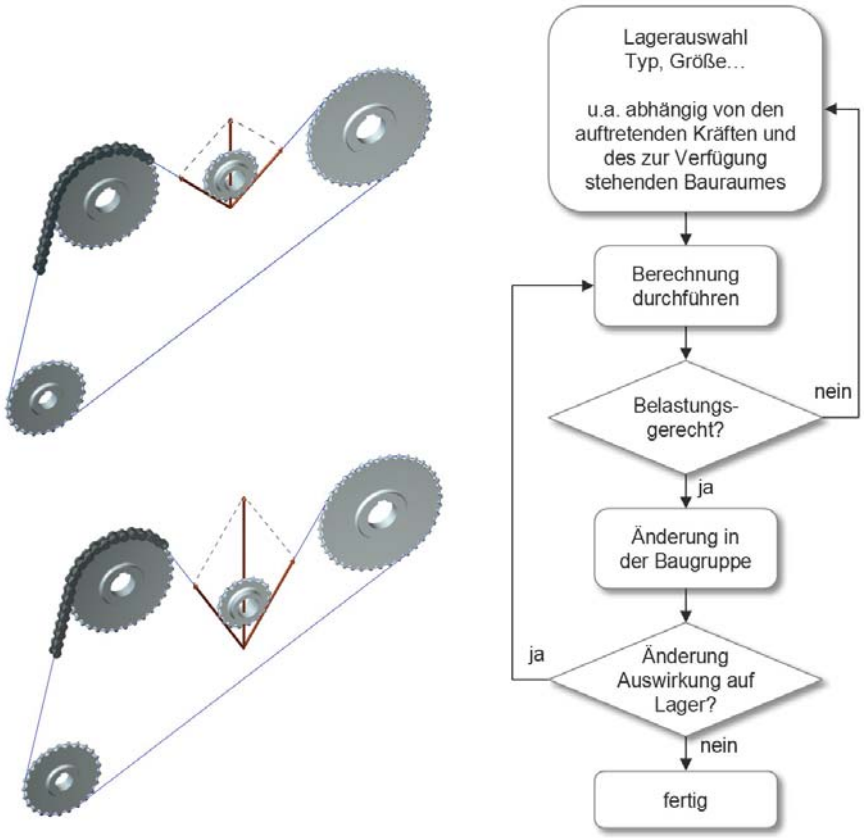


Abbildung 3-17: Nachführen von Änderungen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Wächst die resultierende Kraft über eine Grenze, wird die Gleitlagerung versagen. Die Berechnungszusammenhänge einer Gleitlagerung sind wegen der zu Grunde liegenden hydrodynamischen Schmiertheorie relativ komplex. Sie erfordern die Berücksichtigung der Zusammenhänge aus Lagerspiel, Durchmesser und Lagerbreite, Verkantungsempfindlichkeit, Druckverteilung, Temperatureinfluss. Somit ist die Änderung der Lagerbreite, wenn andere Parameter konstant gehalten werden, nur in einem gewissen Wertebereich zulässig. Nach WITTEL et al. [WiMu13]: „Der größte im Lager auftretende Schmierfilmdruck p_{max} hängt von der Lagergestaltung ab. Die Lagerbreite b muss so groß sein, dass p_{max} ohne schädliche Verformung von der Gleitfläche aufgenommen werden kann; aber nicht größer, weil die Gefahr des Kantentragens bei schmalen Lagern geringer ist.“. Diese Berechnungslogik ist zwar im MEBP Programm integriert (Abbildung 3-18), aber nicht mit dem Gestaltmodell im CAD-System gekoppelt.

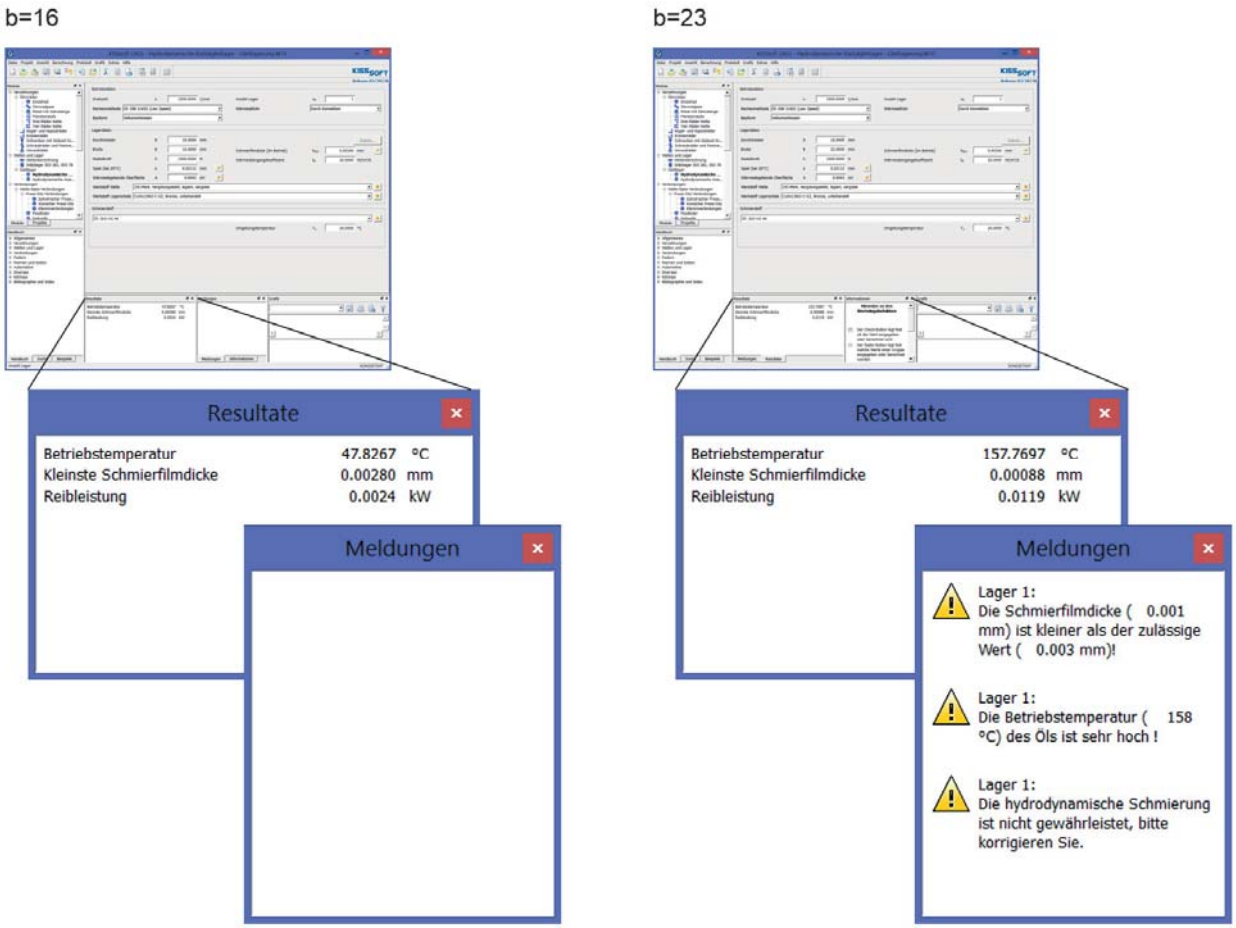


Abbildung 3-18: Gleitlagerberechnung in *Kisssoft(Kisssoft)*

Aus diesen Betrachtungen ergeben sich weitere Potentiale/Eigenschaften für höherwertige Konstruktionsobjekte:

- Die komponentenübergreifenden Abhängigkeiten müssen stetig überprüft und einer automatischen Konsistenzsicherung unterzogen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- (Neu-)Berechnungen müssen automatisiert nach Änderungen im Gestaltmodell ausgelöst werden.
- Der Konstrukteur muss durch entsprechende Ausgaben (innerhalb der CAD-Umgebung) aktiv auf die Verletzung derartiger Randbedingungen hingewiesen werden.
- Die Berechnungslogik und das implementierte „Gleitlagerwissen“ aus dem MEBP muss an das CAD-Modell geknüpft werden.

3.5.3 Wechsel eines Funktionsträgers

Dieses Fallbeispiel sieht vor, als weiteres mögliches Lagerungskonzept die Eignung einer Wälzlagerung zu untersuchen. Abbildung 3-19 zeigt, dass nun wälzlagerspezifische Gesichtspunkte an den angrenzenden Bauteilen zu berücksichtigen sind. Jetzt bestimmt das Wälzlager die Ausprägung der Anschlussteile, das heißt, dass Durchmesser, Breite, Oberflächenbeschaffenheit der Aufnahmebohrung und des Bolzenabsatzes manuell anzupassen sind. Insbesondere die Lauffläche, die beim Wälzlager nach Vorschrift gehärtet sein muss, ist ein repräsentatives Beispiel dafür, dass der Konstrukteur an dieser Stelle selbstständig für diese funktional wichtige Eigenschaft Sorge zu tragen hat. Er muss dies nicht nur im Gestaltmodell berücksichtigen, sondern auch im Berechnungsmodell. Da ein Wechsel des Funktionsprinzips stattgefunden hat, muss zudem ein manueller Austausch der Berechnung folgen, wobei die eingeprägten Abhängigkeiten (Drehzahl und resultierende Kraft) erhalten bleiben. Daraus folgt, dass für eine detaillierte Bewertung der Ablauf gemäß Abbildung 3-16 erneut vollzogen werden muss.

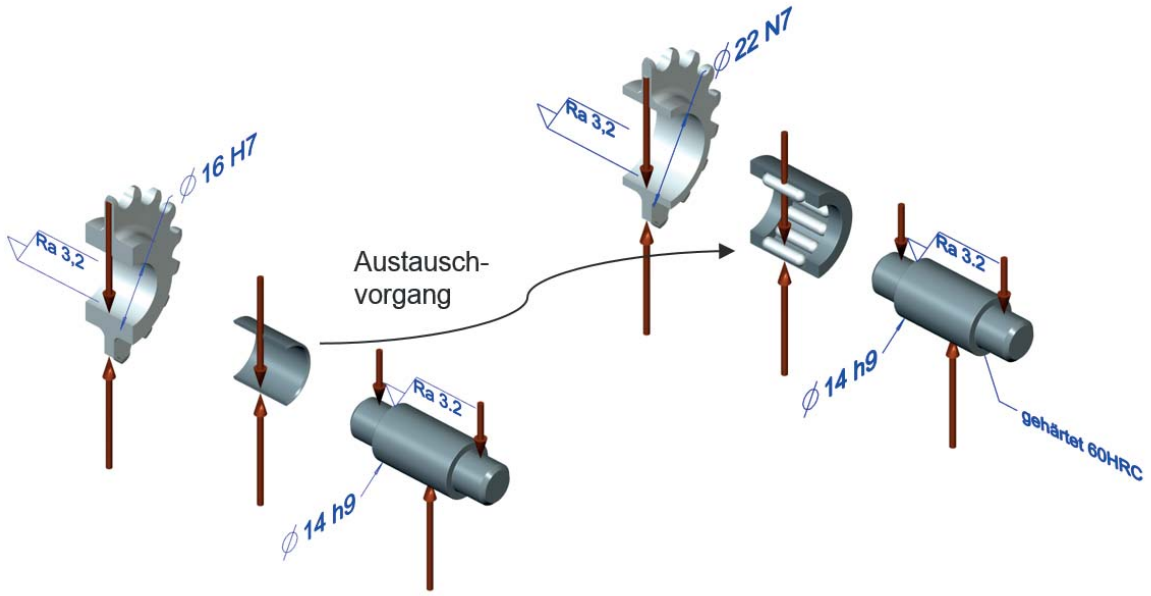


Abbildung 3-19: Auswirkungen auf angrenzende Bauteile nach Einbau oder Austausch einer Komponente

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Hieraus ergeben sich zwei weitere Potentiale/Eigenschaften für höherwertige Konstruktionsobjekte:

- Der Austauschvorgang von Komponenten muss verstärkt unterstützt werden.
- Komponenten müssen mit alternativen Komponenten (bzw. Funktionsträgern) verlinkt werden.
- Bestehende funktionale und belastungsrelevante Abhängigkeiten zu anderen Komponenten müssen automatisiert ersetzt werden.

3.5.4 Fazit

Obwohl der Auslegungsablauf für die Gleitlagerung bzw. die Wälzlagerung klar definiert ist und als sekundärer Konstruktionsprozess aufgefasst werden kann, zeigt das Beispiel, dass die heutige Systemunterstützung optimiert werden kann. Eine direkte Bewertung bzw. ein Vergleich von Alternativen erfordert, bedingt durch die Parametervariationen, Mehrfacheingaben in den verschiedenen Gestalt- und Berechnungsmodellen sowie die manuelle Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Komponenten. Aspekte, die im Rahmen einer Variantenkonstruktion leicht zu automatisieren sind. Es sind Mechanismen gefordert, die diesem Missstand entgegentreten, indem sie die Berücksichtigung funktionaler- und belastungsrelevanter Aspekte verstärkt unterstützen.

3.6 Anforderungen an höherwertige Konstruktionsobjekte

In Kapitel 3 wurden repräsentative Konstruktionsbeispiele vorgestellt, die einerseits gezeigt haben, dass trotz hochentwickelter Software die methodische Unterstützung in Konstruktionen mit hohem Neuheitsgrad fehlt. Andererseits haben sie gezeigt, dass komplexe Auslegungsprozesse (sekundäre Konstruktionsprozesse) mit heutigen Softwaresystemen automatisierbar sind. Ziel muss es sein, automatisierbare (sekundäre) Teilprozesse in Konstruktionen mit hohem Neuheitsgrad in möglichst frühen Konstruktionsphasen bereitzustellen. Indem höherwertige Konstruktionsobjekte sekundäre Prozesse abbilden, unterstützen sie primäre Prozesse und folgen diesem Ziel. Um den Konstrukteur in Zukunft verstärkt systemunterstützt und interaktiv durch den Konstruktionsprozess zu führen, werden aus Prozesssicht neben den aufgeführten Eigenschaften aus Kapitel 3.5 folgende Anforderungen an höherwertige Konstruktionsobjekte gestellt:

- Bekannte Auslegungsabläufe (sekundäre Konstruktionsprozesse) müssen vom Konstrukteur oder vom System bedarfsorientiert initiiert werden.
- Wenn das CAD-System verlassen werden muss, weil die Berechnung aufgrund der Komplexität die Funktionalität des CAD-Systems übersteigt, ist eine Verknüpfung der Modelle notwendig.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Um die Konsistenz fortwährend zu sichern, muss die Verknüpfung den Datenaustausch zwischen dem Gestalt- und Berechnungsmodell in der Form übernehmen, wie sie im Rahmen eines Konfigurationssystems möglich ist.
- Der Konstrukteur muss die Möglichkeit erhalten, die Konstruktionsparameter eines höherwertigen Konstruktionsobjektes beliebig variieren zu können. Erst wenn unzulässige Grenzen erreicht werden, soll er auf die Verletzung der Restriktion hingewiesen werden.
- Der Konstrukteur muss bei der Suche und dem Vergleich von alternativen Lösungsansätzen unterstützt werden. Hierzu müssen die höherwertigen Konstruktionsobjekte mit jeweiligen Alternativen (aus funktionaler Sicht) untereinander verknüpft werden. Beispiel: Verschiedene Zahnkupplungstypen als Alternative zur Faltenbalgkupplung.
- Die Unterstützung bei der Bewertung muss primär hinsichtlich funktionaler, aber als erweitertes Ziel auch hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte erfolgen.
- In der Konzeptphase müssen höherwertige Konstruktionsobjekte die Grobauslegung unterstützen. Beispiel: Der Nabenmotor im Planentengetriebe konnte überschlägig ohne komplexe Analysen ausgelegt werden. Der Detaillierungsgrad eines höherwertigen Konstruktionsobjektes muss somit anpassbar sein.
- Die aus den typischen iterativen Aspekten aus Kapitel 3.5 (Wechsel des Funktionsträgers, Nachführen von Änderungen, Berücksichtigung von Abhängigkeiten zu angrenzenden Komponenten etc.) abgeleiteten Eigenschaften müssen von den höherwertigen Konstruktionsobjekten erfüllt werden.
- Für komplexe Konstruktionskomponenten müssen Teilbereiche oder einzelne Features mit höherwertiger Funktionalität angereichert werden können.
- Funktionsrelevante Informationen, wie sie beispielsweise in Herstellerdatenblättern enthalten sind (Einsatzbedingungen, Montagehinweise, Wartungsintervalle etc.), müssen bedarfsorientiert bereitgestellt werden. Dies gilt insbesondere für disziplinübergreifende Fragestellungen.
- Fehlende Informationen zur Auslegung einer Komponente müssen vom Konstrukteur dialogbasiert abgefragt werden.
- Höherwertige Konstruktionsobjekte müssen auch im Zusammenhang mit Variantenkonstruktionen in einem Konfigurationssystem nutzbar sein.
- Funktionsbezogene Wechselwirkungen zwischen den Komponenten müssen vom System visualisiert und die vom Konstrukteur getroffenen Festlegungen (die fehlerbehaftet sein können) geprüft werden. Beispiel: Zwei Zahnräder können nur

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

miteinander kombiniert werden, wenn Modul, Zähnezahl und Schrägungswinkel identisch sind. Dies ist im Gestalt- und Berechnungsmodell zu prüfen.

- Insbesondere das Beispiel der Balligzahnkupplung verdeutlicht, dass der Auslegungsprozess noch effizienter erfolgen kann, wenn Zukaufteile direkt im CAD-System (des Kunden) ausgelegt werden können.
- Die Auslegungsabläufe bzw. automatisierten Vorgänge müssen für den Konstrukteur stets transparent und zuverlässig bleiben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4 Parametrisierung von Gestalt- und Berechnungsmodellen

Seit der rechnerunterstützten Konstruktion besteht das Bestreben nach der Kopplung der Gestalt- und Berechnungsmodelle, da in beiden Modellen stets identische Informationen enthalten sind. Trotz des hohen Reifegrades moderner Softwarewerkzeuge stellt sich der Informationsabgleich zwischen CAD-System und Berechnungsprogramm auch heute noch problematisch dar. Die folgenden Aspekte fließen zum einen in die Definition der höherwertigen Konstruktionsobjekte (Kapitel 5) ein, zum anderen dienen sie direkt als umfassende Darstellung, in welcher Form die Parametrisierung von höherwertigen Konstruktionsobjekten erfolgen kann. Hierzu werden die bereits in Kapitel 3 vorgestellten Beispiele aufgegriffen.

4.1 Informationstechnische Aspekte

In den folgenden Kapiteln werden Methoden vorgestellt, um Informationen zwischen CAD-System und Berechnungssoftware auszutauschen. Dabei spielen Programmierschnittstellen, die als API (Application Programming Interface) bezeichnet werden und die Verarbeitung von ASCII-Textdateien eine zentrale Rolle. An dieser Stelle soll ein kurzer Einblick in die entsprechenden Grundlagen gegeben werden.

4.1.1 Textdateien zur Modellspeicherung

In Kapitel 2.4.2.4 wurde bereits auf die grundsätzlichen Unterscheidungen hinsichtlich Text- und binär- Formaten hingewiesen. Einfache Textdateien beinhalten ASCII-Zeichen zur Datenspeicherung. Nach dem XML-Schema (Extensible Markup Language) definierte Textdateien können aufgrund der strukturierten Datenspeicherung als eine erweiterte Form der text-basierten Dateiformate verstanden werden. In vielen informationstechnischen Bereichen ersetzt es derzeit die Datenspeicherung im „reinen“ Textformat. XML stellt ein Meta-Dateiformat bereit, das die Struktur einer Textdatei definiert. Somit erfolgt eine grobe Standardisierung, in welcher Form logisch zusammenhängende Daten abgelegt werden können. XML erleichtert sowohl für Mensch als auch für das Softwaresystem die Speicherung und Interpretation der Daten. Der Aufbau einer XML-Datei entspricht einer hierarchischen Baumstruktur. Als Baumknoten können Elemente, Attribute, Verarbeitungsanweisungen, Kommentare und Texte auftreten. Für weiterführende Ausführungen bezüglich des XML-Schemas wird auf [Ha10] verwiesen. Das neuere Format Json stellt eine Alternati-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ve zum XML-Format dar, welches im Vergleich eine noch einfachere Syntax bietet und ressourcenschonender ist.

MEBP und branchenspezifische Berechnungsprogramme legen die Daten häufig. in textbasierten Formaten ab, wobei die Struktur der Textdatei vom Softwarehersteller festgelegt wird. Auch das XML-Format und die damit strukturiertere Datenspeicherung ist bereits bei einigen Herstellern verbreitet.

Zugriffe auf Gestalt- und Berechnungsmodell: Eine Textdatei kann direkt über ein Programm bzw. ein Programmteil angesprochen, durchsucht und deren Inhalt ausgelesen oder verändert werden. Insbesondere die XML-Technologie bietet aufgrund der bereits dargestellten Funktionalität vereinfachte Lese- und Schreibzugriffe. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten die Daten zu manipulieren, zwei Beispiele der *Microsoft .NET* Funktionen hierzu sind: XMLWriter/Reader (vgl. [Mi14a]) oder XMLDOM (vgl. [Mi14b]). Veränderte Eingabedateien können vom zugehörigen Programm eingelesen und verarbeitet werden. Da native CAD-Modelle in proprietären Formaten vorliegen, ist der Zugriff nur über die vom Autorensystem angebotene Programmierschnittstelle möglich. Gleiches gilt für Berechnungsmodelle in Tabellenkalkulationen, auch diese Dateien können nicht wie ein Textformat verarbeitet werden.

4.1.2 Programmierschnittstellen

Hinter dem Begriff Programmierschnittstelle verbirgt sich ein Programmteil eines Softwareproduktes, das anderen Programmen den Zugriff auf die internen Datenstrukturen und Methoden gewährt und so Kommunikationsprozesse zwischen verschiedenen Softwareprodukten ermöglicht. Im Grunde definiert eine Programmierschnittstelle den Umfang der angebotenen sog. Dienste (services) des Servers und die Konventionen, wie diese aufgerufen (invoke) werden. Das aufrufende Programm wird als „client“ bezeichnet. Der client fragt die Dienste beim Server an und erhält das Ergebnis der Anfrage (vgl. Abbildung 4-1, get object, set object). Die jeweiligen Programme können sich auf einem Computer oder aber auf unterschiedlichen Computern, die über ein Netzwerk miteinander verbunden sind, befinden. Einige API’s bieten synchrone- und asynchrone Anfrage/Antwort-Interaktionen an. Während bei der synchronen Verbindung die Antwort des Servers direkt versendet wird, verwalten asynchrone Verbindungen die Antworten zunächst in einer Warteschlange, die abgearbeitet werden muss.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

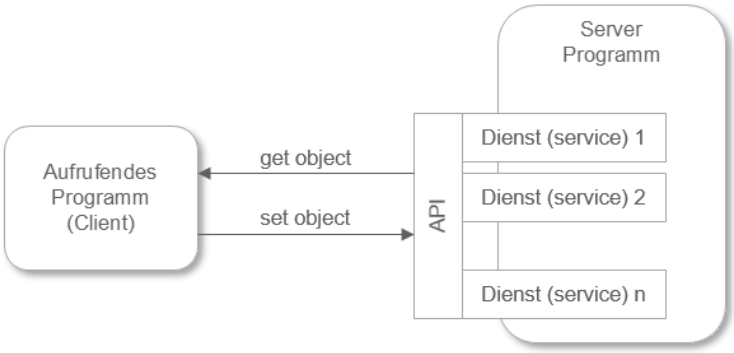


Abbildung 4-1: Schnittstellenkommunikation über das API

Eine häufig eingesetzte und führende Technologie für diese Art der Interprozesskommunikation ist das von Microsoft bereitgestellte COM (Component Object Model). COM bildet ebenfalls die Grundlage für OLE (Object Linking and Embedding) und ActiveX (Active Extension). Basierend auf dem objektorientierten Programmierparadigma erlaubt COM die dynamische Objekterzeugung während der Laufzeit von Anwendungen. Zur Programmierung können alle COM-fähigen Programmiersprachen (z. B. C++, C#, VB.NET, Java) genutzt werden. Server, die eine COM-Schnittstelle anbieten, werden in die Windows Registry eingetragen. Jede Schnittstelle verfügt über eine eindeutige Ident-Nummer, die sog. GUID (Globally Unique Identifier). Diese Schnittstelle kann dann von beliebigen COM-Clients genutzt werden, um die Dienste des COM-Servers anzusprechen. Solange die Verbindung zwischen Server und Client besteht, können die Objekte in den jeweiligen Programmen miteinander kommunizieren. Darüber hinaus kann ein Client auch die Funktionalität mehrerer Serverschnittstellen ansprechen, was dem Grundgedanken der komponentenbasierten Softwarearchitektur gerecht wird oder der sog. losen Kopplung von Programmen (vgl. [Zw05]). DCOM (Distributed Component Object Model) ist die Erweiterung von COM und unterstützt die rechnerübergreifende Prozesskommunikation in einem Netzwerk [Mi13] mit zusätzlichen Funktionen.

Die Regeln der objektorientierten Programmierung bzw. die damit verbundenen Vererbungsregeln fordern die Einhaltung der Objekthierarchie. Daraus folgt, dass das Client-Programm bis zur Ebene „durchdringen“ muss, in der sich das Zielobjekt befindet. Abbildung 4-1 zeigt dies exemplarisch. Es werden schrittweise alle Komponentennamen der in der Baugruppe enthaltenen Komponenten ermittelt und angezeigt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

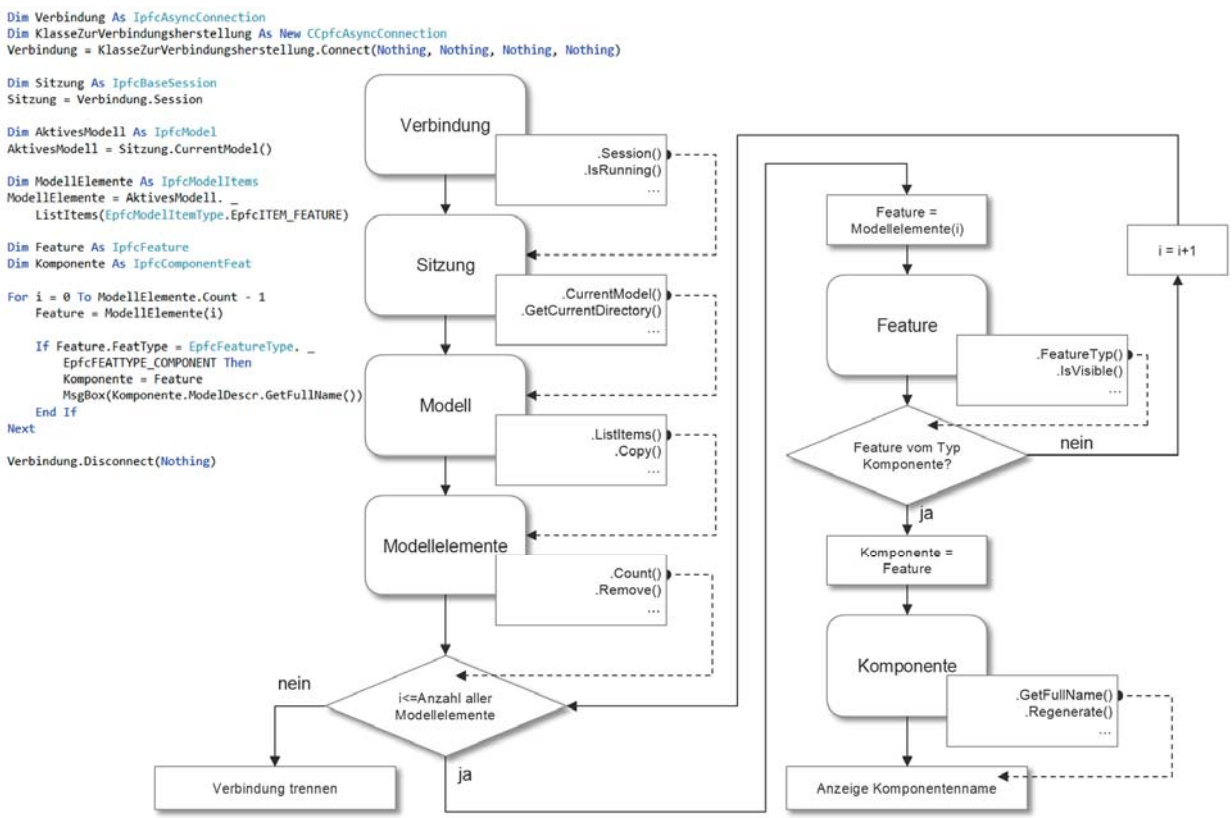


Abbildung 4-2: Objekthierarchie am Beispiel der *CREO 2.0(PTC)* VB-API

Alle leistungsfähigen CAD-Systeme verfügen heute über COM basierte Programmierschnittstellen, um Drittanbietern, aber auch den Benutzern, die Möglichkeit zu geben, das System um zusätzliche Funktionen zu erweitern bzw. Anpassungen vorzunehmen. RADEV [Ra06] stellt ebenfalls fest, dass für komplexe Berechnungen die CAD-Funktionalität durch spezielle Berechnungsapplikationen zu ergänzen ist. Er zeigt in seiner Arbeit die Integration von Gleitlagerberechnungen in *ProEngineer(PTC)* über das C-basierte API *ProToolkit,* um individuelle, fallspezifische Schmiernutgeometrien berücksichtigen zu können. Die CAD-Systemhersteller statten ihre Produkte häufig auch mit mehreren API's aus und dokumentieren diese entsprechend der Syntax verschiedener Programmiersprachen. Ein mit COM vergleichbares Modell stellt CORBA (Common Object Request Broker Architecture) dar, welches allerdings im Umfeld der Windows-Betriebssysteme nicht in dem Maße vertreten ist [Lo04]. CORBA verwendet ebenfalls den objektorientierten Programmieransatz. Auch über CORBA kann die Verknüpfung von Gestalt- und Berechnungsmodell erfolgen. HADERER [Ha00] koppelt das Berechnungsprogramm BOLT mit dem CAD-System *Pro/Engineer(PTC)* innerhalb einer CORBA-Umgebung und stellt fest, dass auch unter Einsatz von CORBA ein hoher Aufwand betrieben werden muss, um die nötige Modell- und Prozessintegration zu erreichen. Weiterführende Informationen zum Einsatz von CORBA im Kontext der Kopplung von Gestaltungs- und Berechnungssystemen können seiner Arbeit entnommen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4.2 Parameterbasierte Berechnungen in CAD-Prozessen

Wie bereits festgestellt, nimmt der Datenaustausch zwischen dem Gestaltmodell und dem Berechnungsmodell eine Schlüsselrolle ein. Der zu bewältigende Datenfluss ist abhängig davon, „wo“ die Berechnung stattfinden soll. Diesbezüglich wird von einem integrierten System gesprochen, wenn die Berechnung innerhalb des CAD-Systems ausgeführt wird, und von einem gekoppelten System, wenn die Berechnung außerhalb des CAD-Systems erfolgt. Hinsichtlich der Integrationstiefe kann daher unterschieden werden in:

- Insellösungen (getrennte Modelle, manueller Datenaustausch),
- mit dem CAD-System gekoppelte Systeme
- und in das CAD System integrierte Systeme.

4.2.1 Zuordnung von Parametern

Grundlegend für die Verknüpfung von Geometrie- und Berechnungsparametern ist die entsprechende Zuordnung in den Teilmodellen (Abbildung 4-3). Es muss identifiziert und festgelegt werden, welcher Parameter des Gestaltmodells welchem Berechnungsparameter zugehörig ist.

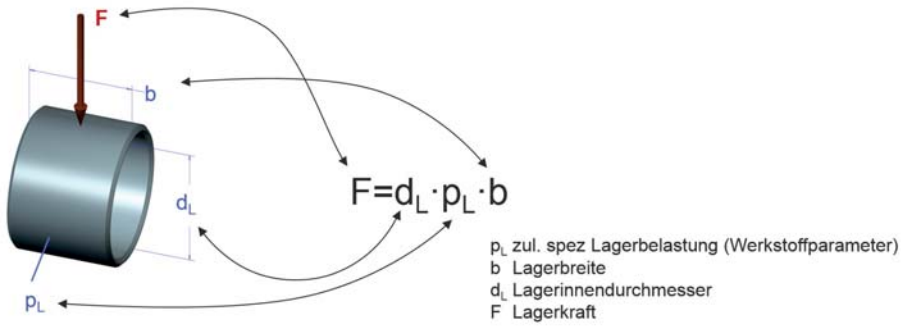


Abbildung 4-3: Zuordnung von Parametern im Gestalt- und Berechnungsmodell

Innerhalb des CAD-Systems kann der Gleichungseditor genutzt werden, um Parameter miteinander in Verbindung zu setzten. Geometrie- und Berechnungsparameter müssen vom Konstrukteur identifiziert und über einen Zuweisungsoperator einander gleich gestellt werden. Die Zuweisung eines Geometrieparameters aus dem CAD-System zu einem Berechnungsparameter aus einer Tabellenkalkulation erfolgt über eine Zellenadressierung in vergleichbarer Weise. Auch die Kopplung zu Parametern in Mathematiksoftware erfolgt analog über eine Attributierung der jeweiligen Parameter. Die Vorgehensweisen sind demnach vergleichbar. Festzuhalten ist, dass dennoch keine genormte softwaresystemunabhängige Vorgehensweise existiert.

Auch die parameterbasierte Kopplung zu einem MEBP muss über Zuweisungen erfolgen. Dabei bestehen besondere Zuordnungsprobleme, da keine einheitlichen Beschreibungsstrukturen existieren. In *Kisssoft(Kisssoft)* ist z. B. ist die Gleitlagerkraft mit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

„Lag[0].RadialKft“ bezeichnet; in *Mdesign(Tedata)* hingegen mit „FR_1“. Jeder Softwarehersteller speichert seine Daten also in der von ihm präferierten Struktur, Bezeichnung und Dateiformat ab. Die Parameter müssen dann umständlich in den Ein- und Ausgabedateien der MEBP identifiziert und den Parametern im CAD-Modell zugordnet werden. Für eine automatisierte Verarbeitung sind dazu individuelle Zeichenkettenverarbeitungsroutinen zu erzeugen. Das bedeutet, dass die Umsetzung einer identischen Kopplung zwischen Zahnradgetriebemodell und Zahnradgetriebeberechnung in verschiedenen MEBP unterschiedliche Vorgehensweisen erfordert. Die Durchsetzung einer einheitlichen und strukturierten Produktdatenspeicherung (wie es z. B. die Aktivitäten im Rahmen der Standardisierung des Getriebeproduktmodells im STEP-XML-Format durch das VDMA-Einheitsblatt 23900 [VD09] anstreben) ist diesbezüglich wünschenswert. Zumal Namenskonventionen über die Normen der Maschinenelemente eindeutig festliegen.

4.2.2 Integrierte Berechnungen

Sofern das Berechnungsmodell nicht zu komplex ist, wird es aus heutiger Sicht möglich sein, Zusammenhänge zwischen Geometrie- und Berechnungsparametern durch eine Berechnungsvorschrift mit Hilfe der Parametrik des CAD-Systems abzubilden. Von einigen CAD-Systemherstellern werden jedoch bereits integrierte Module zur Berechnung von klassischen maschinenbaulichen Elementen wie z. B. Wellen, Achsen, Lötverbindungen und Klemmverbindungen angeboten, die ebenfalls in folgendem Unterkapitel vorgestellt werden.

4.2.2.1 Beziehungseditor als Berechnungssystem

Da Gestaltparameter- und Berechnungsparameter in einem Datenmodell vorliegen, erfolgt nach der Festlegung der Zusammenhänge bei jedem Regenerierungsvorgang eine Neuberechnung. Die Konsistenz wird damit automatisch gewährleistet.

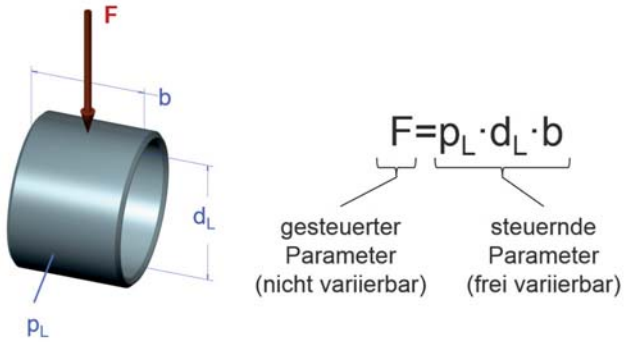


Abbildung 4-4: CAD integrierte Berechnung am Beispiel einer Gleitlagerung

Bedingt durch die Zuweisung ist der Ergebnisparameter als gesteuerter Parameter zunächst einmal zugriffsgesperrt, siehe Abbildung 4-4. Die steuernden Parameter auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens sind für die Variation hingegen frei. Neben durchaus

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

komplexen mathematischen Funktionen und Gleichungen erlauben Regeln und Kontrollstrukturen die logikbasierte Verknüpfung der Parameter im Editor. Das bedeutet, die Überschlagsrechnung der Gleitlagerung ist ein sehr einfaches Beispiel. Es können deutlich komplexere Zusammenhänge integriert werden.

Berechnungen werden in den integrierten Editoren für Gleichungen mit einer Syntax definiert, die an Programmiersprachen angelehnt sind (dies gilt im Übrigen auch für Tabellenkalkulationssoftware). Berechnungen in die CAD-Systeme zu integrieren erinnert stark an die Programmiertätigkeit, da die Syntax programmiersprachenähnlich ist. Komfortable Möglichkeiten der Gleichungseingabe in den übersichtlichen mathematischen Notationen, wie es die heutige moderne Mathematiksoftware zulässt, sind noch nicht etabliert. In Zukunft sollten die Gleichungseditoren mit der Funktionalität bzw. dem Funktionsumfang heutiger Mathematiksoftware angereichert werden und dabei die übersichtlicheren Notationsstile berücksichtigen.

4.2.2.2 Integrierte Berechnungsmodule

Als Beispiel dient der „Konstruktionsassistent“ des CAD-Systems *Inventor(Autodesk)* nach [Au13]. Der integrierte Konstruktionsassistent bietet Funktionalitäten zur Auslegung von Maschinenelementen sowie eine Sammlung häufig verwendeter Zusammenhänge der technischen Mechanik (Gesetze der Dynamik, Statik etc.). Was zunächst ein vielversprechender Lösungsansatz für die Kopplungsproblematik zu sein scheint, stellt sich bei genauerer Betrachtung als halbwertige Lösung dar. Konstruktionsparameter lassen sich zwar in die Berechnung einbeziehen, es erfolgt jedoch keine Nachführung der Berechnung, wenn ein Parameter mit Berechnungseinfluss im Nachhinein geändert wird, vgl. Kapitel 3.5.2. Dies widerspricht der Forderung nach reduzierter manueller Änderungsarbeit und wird insbesondere der Forderung nach stetiger Konsistenzsicherung zwischen den Modellen nicht gerecht. Ferner haben die Berechnungsergebnisse keinen Einfluss auf die Geometrie.

Hervorzuheben ist jedoch, dass der Konstruktionsassistent bereits im Ansatz Baugruppenabhängigkeiten abbilden kann. So können z. B. Innendurchmesser von Wälzlagern auf den Wellenabsatz referenziert werden. Eine Änderung des Absatzes führt zu einer Anpassung des Lagers. Eine automatische Neuberechnung findet jedoch nicht statt, daher kann auch hier nicht von einer zufriedenstellenden durchgängigen Abbildung der Abhängigkeiten gesprochen werden [Pr14a].

4.2.3 Gekoppelte Berechnungen

Übersteigt die Berechnungskomplexität die Möglichkeiten des CAD-Systems, ist es zielführend auf externe, spezifizierte Berechnungssoftware auszuweichen. Es ist zwar die Schnittstellenproblematik zu lösen, aber die Berechnungslogik ist in diesen Programmen deutlich stärker implementiert. Ein Beispiel dafür ist die Kegelquerpressverbindung der

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Balligzahnkupplung ZBG aus Kapitel 3.2.2. Zur Kopplung von komplexeren analytischen Berechnungen mit dem CAD-System stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, welche sich insbesondere im Hinblick auf die Automatisierungsmöglichkeit unterscheiden und in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden.

4.2.3.1 Grundlegende Kopplungsmöglichkeiten im Überblick

Auch im Bereich der numerischen Berechnungssoftware sind vergleichbare Kopplungsprobleme zu lösen. Als Datenübergabemethode kann ebenfalls zwischen Systemaufrufen (ASCII-Dateien enthalten Eingabe- und Ergebniswerte) und Programmierschnittstellen (API) unterschieden werden. Eine weitere Klassifizierung der Kopplungsarten von CAE-Systemen kann [GaGr99] entnommen werden. JUNG [Ju13] stellt bezüglich der API's numerischer Simulationssoftware fest, dass sie zwar in der Regel standardmäßig verfügbar sind, aber der von den Systemherstellern angebotene Funktionsumfang stark unterschiedlich ist. Hierdurch wird die Aufstellung eines Gesamtkonzeptes stark beeinflusst. Diese Beeinflussung kann auch für die analytischen Berechnungssysteme festgestellt werden, wie sich im Folgenden noch zeigen wird.

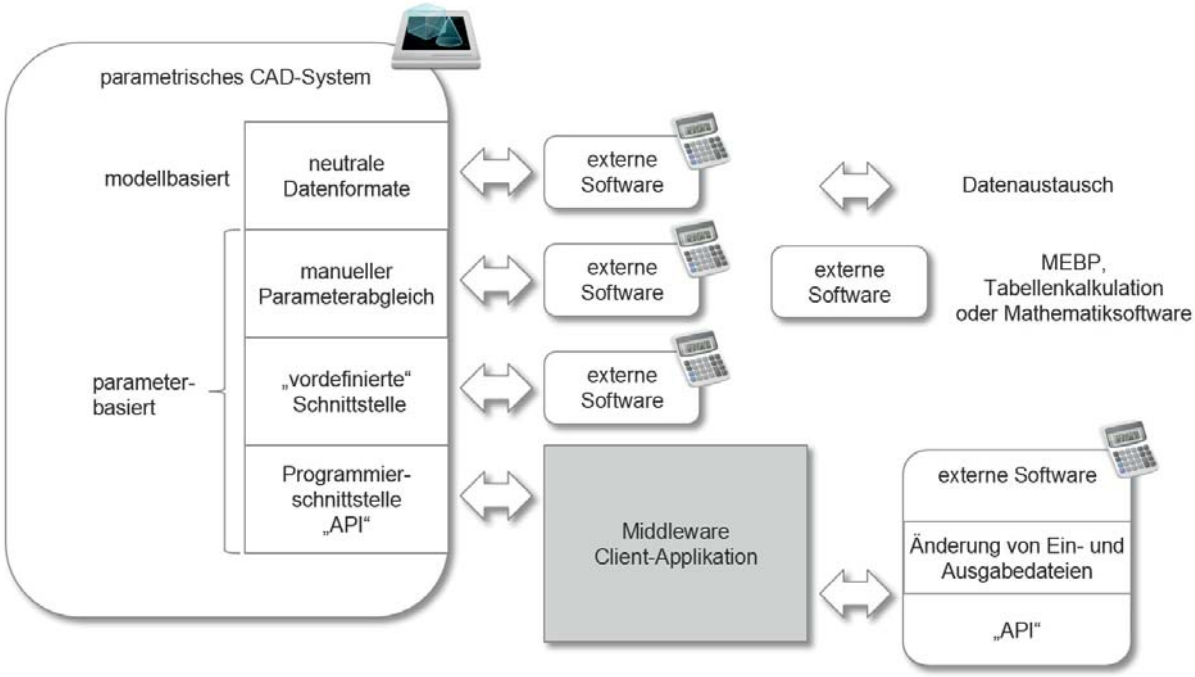


Abbildung 4-5: Möglichkeiten zur Kopplung von Berechnungen an das CAD-System

Abbildung 4-5 zeigt als Übersicht die informationstechnischen Möglichkeiten, um die in dieser Arbeit betrachteten analytischen Berechnungssysteme mit dem CAD-System zu koppeln.

Neutrale Datenformate: Neutrale Datenformate stellen grundsätzlich eine Möglichkeit dar, den modellbasierten Informationsaustausch durchzuführen. Im Bereich der numerischen Berechnungswerkzeuge, wo primär die Geometrieübertragung und nicht die Über-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tragung von Parameterwerten und semantischen Informationen im Vordergrund steht, ist der Einsatz der neutralen Datenformate zielführend. MEBP, die ihre Modelle in ein neutrales Format exportieren können, sind Stand der Technik. Die Übertragung erfolgt jedoch manuell, sodass nach Änderungsvorgängen in einem der Teilmodelle erneut der Export/Import (manuell) vollzogen werden muss. Semantische Informationen wie z. B. die Oberflächenbeschaffenheit gehen dabei i. d. R. verloren. Sie eignen sich nach heutigem Stand der Technik nur bedingt, um die funktionalen und berechnungsrelevanten Aspekte der höherwertigen Konstruktionsobjekte zu berücksichtigen. Daher wird im Weitern auf deren Betrachtung verzichtet.

Manueller Parameterabgleich: In beiden Modellen werden die Anpassungen manuell durch den Konstrukteur vorgenommen. Es müssen redundante Eingaben getätigt werden, da die Modelle getrennt voneinander vorliegen. Es handelt sich um den heutigen Ausgangszustand, den es durch informationstechnische Möglichkeiten zu beseitigen gilt.

Vordefinierte Schnittstellen: Darunter sollen systemspezifische Kommunikationsmöglichkeiten zwischen dem Berechnungssystem und dem CAD-System verstanden werden. Jedes leistungsfähige CAD-System besitzt heute Schnittstellen zu Tabellenkalkulationssoftware und/oder Mathematiksoftware. Auch die meisten MEBP bieten vordefinierte Schnittstellen zu CAD-Systemen an, vgl. [Be06] und [We07]. Weitere Betrachtungen erfolgen in Kapitel 4.2.3.2.

Programmierschnittstellen „API“: Die leistungsstärkste Möglichkeit Gestalt- und Berechnungsmodelle miteinander zu koppeln, besteht darin, direkt die API des CAD-Systems zu nutzen (lose Kopplung). Dazu ist die Programmierung einer Client-Applikation (sog. Middleware) notwendig, welche die softwareübergreifende Kommunikation sicherstellt. Durch den Leistungsumfang der in jedem System zur Verfügung gestellten Funktionen wird das Automatisierungspotential festgelegt. Steht keine API des Berechnungsprogramms zur Verfügung muss auf die Manipulation von Ein- und Ausgabeformaten ausgewichen werden. Die Client-Applikation muss dazu die Parameterwerte in den Dateien auslesen bzw. überschreiben (weitere Betrachtungen in Kapitel 4.2.3.3). Wird auch auf der Berechnungsseite eine API angeboten, kann der direkte Zugriff auf die internen Berechnungsmodelle erfolgen (weitere Betrachtungen in Kapitel 4.2.3.4).

4.2.3.2 Vordefinierte Schnittstellen

Die vordefinierten Schnittstellen basieren auf einer im Vorfeld festgelegten Richtungsabhängigkeit, die im Rahmen eines Automatisierungskonzeptes zu berücksichtigen ist.

Tabellenkalkulation und Mathematiksoftware: Es ist im Vorfeld zu definieren, welcher Parameter an die externe Software übergeben und welcher Parameter zurück an das CAD-System zurückgegeben wird. Das bedeutet, dass neben der Parameterzuordnung in der

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Schnittstelle definiert werden muss, welcher/e Parameter Berechnungseingabe/n und welche/r Parameter Berechnungsergebnis ist, vgl. Abbildung 4-3. Am Beispiel *Creo(PTC)* in Verbindung mit der Tabellenkalkulation *Excel(Microsoft)* oder der Mathematiksoftware *Mathcad(PTC)* wird die Konsistenz automatisch (d. h. bei jeder Regenerierung) oder bei Bedarf (d. h. die Neuberechnung wird manuell initiiert) hergestellt.

Vordefinierte Schnittstellen zu MEBP: Diese konvertieren die Berechnungsmodelle in CAD-Modelle und nutzen dabei ebenfalls die APIs der CAD-Systeme. Es besteht keine Möglichkeit, diesen Konvertierungsprozess anzupassen. Weiterhin sind diese Schnittstellen meist nur für einige ausgewählte Maschinenelemente verfügbar und nicht für die gesamte Breite angebotener Berechnungen. Die Geometrie wird über die API-Funktionalität erzeugt. Das Ergebnis ist anbieterabhängig und nicht derart assoziativ, als dass eine Parameteränderung im Gestaltmodell automatisch auf das Berechnungsmodell übertragen wird bzw. andersherum. Eine Anpassung der Geometrie im CAD-System ist zwar möglich, führt aber zu einem inkonsistenten Modell. Es muss also zum Berechnungsmodell gewechselt werden, um dort manuelle Anpassungen vorzunehmen. Über den Konvertierungsvorgang muss dann wieder ein neues Geometriemodell erzeugt werden. Zusätzliche Angaben wie z. B. Oberflächenrauhigkeit, Toleranzen oder Oberflächenbehandlung einer Welle, die auf der Berechnungsseite definiert wurden, werden i. d. R. ebenfalls nicht mit übertragen, obwohl diese Angaben insbesondere für funktionale Aspekte oder auch für die spätere Zeichnungserstellung elementar sind.

Beispiel EAssistant(GWJ) – CAD-Plugin: Das Berechnungsmodell, das auch webbasiert verwaltet werden kann, wird hier in eine XML-Datei konvertiert, aus der dann das Geometriemodell (hier im CAD-System *SolidWorks(Dassault Systèmes)*) erzeugt wird. Beispielsweise ist eine Änderung der Rotationsskizze eines Wellenabsatzes im CAD-Modell nicht ohne weiteres zulässig, da die Modelle nicht automatisch abgeglichen werden. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass auch hierzu keine allgemeingültigen Methoden zur Verfügung stehen, die es erlauben, die unterschiedlichen Modellierungsschritte, die zu einer „Welle“ führen, geeignet zu interpretieren und in ein Berechnungsmodell zu übersetzen. Darüber hinaus besteht keine Möglichkeit, Parameter aus dem CAD-System an das Berechnungssystem zu übergeben, um diese in die Berechnung einfließen zu lassen. Änderungen können nur im Berechnungsmodell vorgenommen werden. Das Berechnungsmodell erreicht der Konstrukteur, indem er über eine Berechnungsfeature-Selektion im Modellbaum direkt zum dazugehörigen Berechnungsmodell geführt wird.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

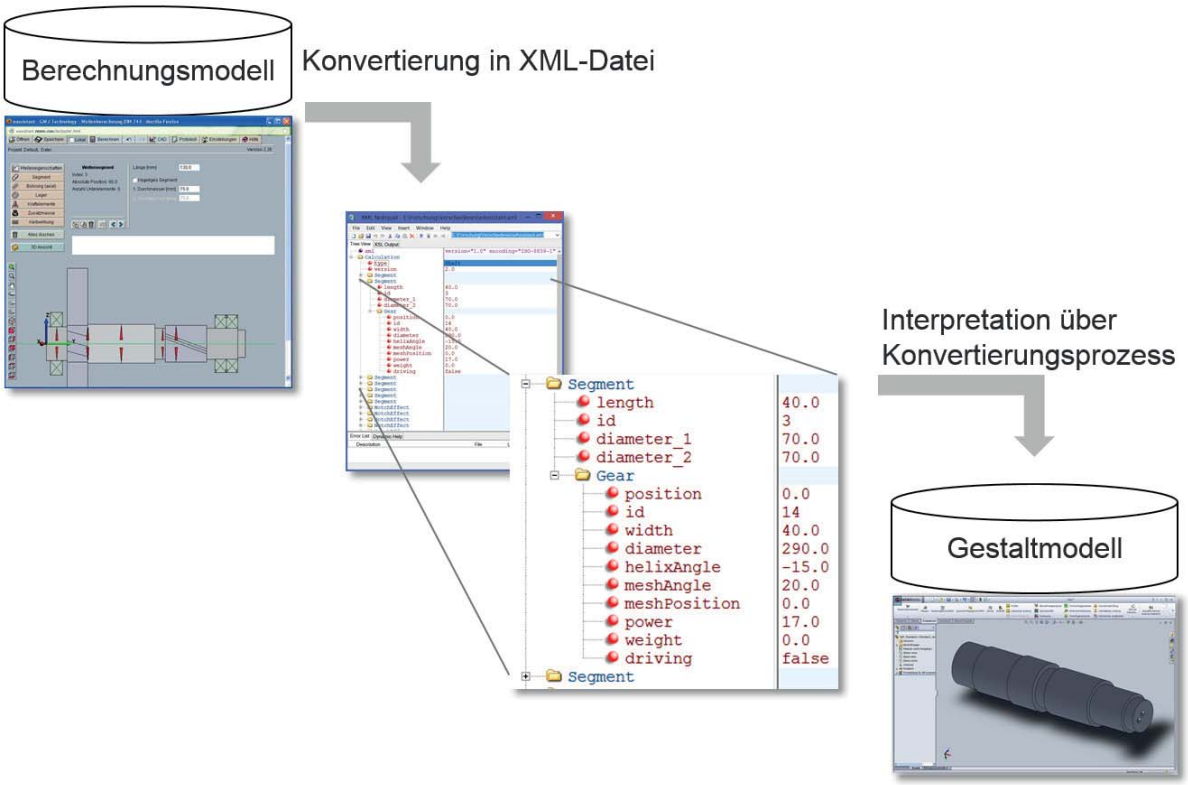


Abbildung 4-6: CAD-PlugIn: *EAssistant(GWJ)* für *SolidWorks(Dassault Systèmes)*

Auch wenn die Übertragung vom Berechnungsmodell in das CAD-System somit grundsätzlich möglich ist, sind diese Schnittstellen für höherwertige Konstruktionsobjekte nur bedingt geeignet.

4.2.3.3 Verarbeitung von Ein-und Ausgabedateien

Die Verarbeitung von Ein- und Ausgabedateien setzt voraus, dass das einzubindende Berechnungsprogramm ASCII-Textdateien verwendet. Auf die Identifizierungsproblematik wurde bereits in Kapitel 4.2.1 hingewiesen. Grundsätzlich funktioniert die Kopplung, indem die Client-Applikation zunächst die für den konkreten Auslegungsfall notwendigen Eingabeparameter setzt. Anschießend muss das Berechnungsprogramm gestartet werden. Dies kann direkt durch die Client-Applikation über die Nutzung der Windows-API Funktionen erfolgen oder über einen Batch-Befehl, der ausgelöst wird, vgl. Abbildung 4-7. Entweder ist das Berechnungsprogramm (hier: Eigenentwicklung der Fa. Siemens) in der Lage, die Berechnung automatisch durchzuführen und die Ergebnisse in die Ausgabedatei zu schreiben oder das Berechnungsprogramm öffnet sich, der Nutzer führt mit den bereits eingetragenen Eingabewerten die Berechnung durch und speichert die Ergebnisse in der Ausgabedatei. Letztere Möglichkeit bietet den Vorteil, dass der Benutzer die Berechnung weiter anpassen kann. Nach der Berechnung stehen dann Eingaben und Ergebnisse in der ASCII-Datei zur Verfügung. Die Client-Applikation liest diese aus und stellt unter Verwendung der API die Konsistenz mit dem Gestaltmodell im CAD-System her (Abbildung 4-7).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

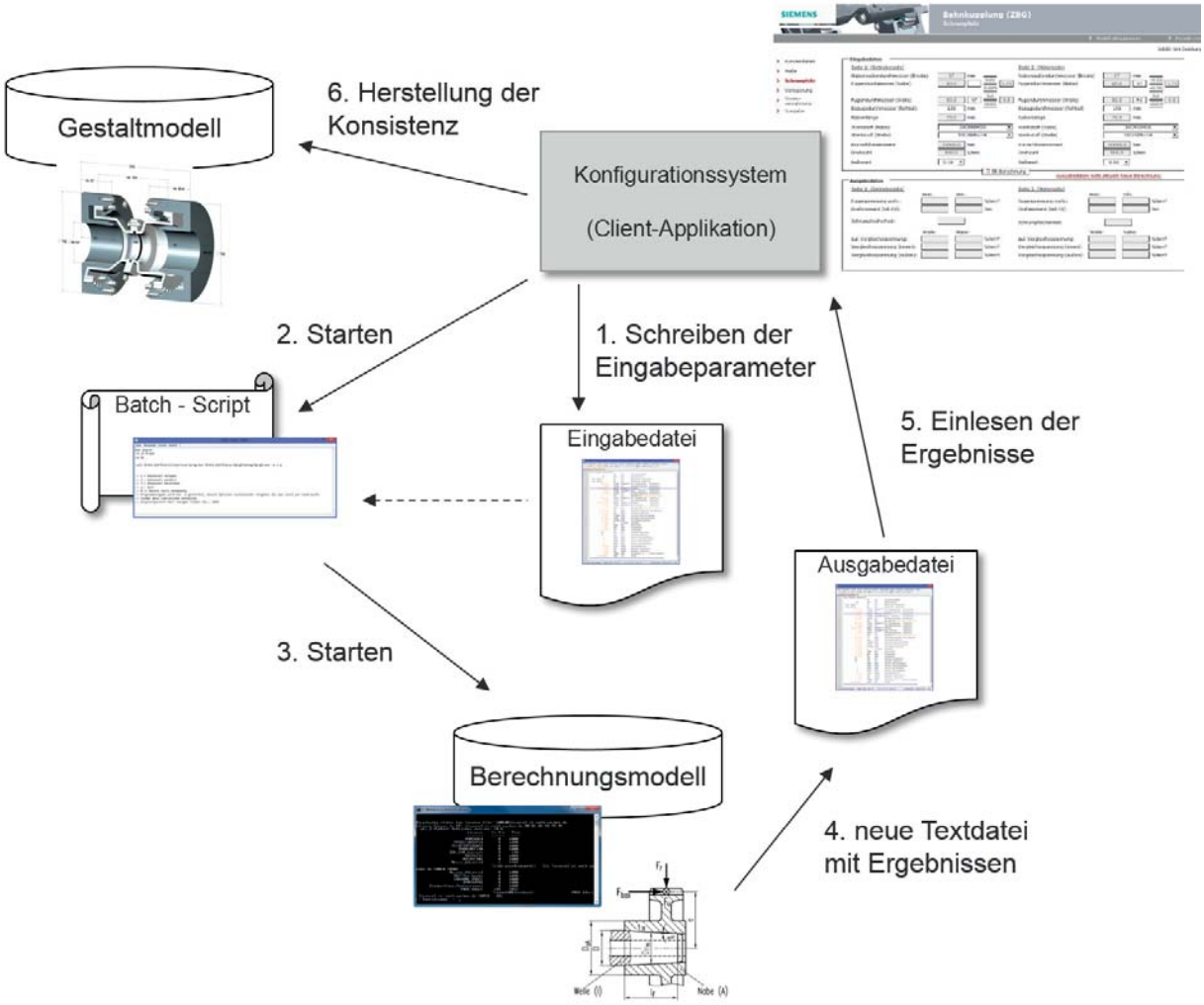


Abbildung 4-7: Einbindung der Kegelquerpressverbindung in den Auslegungsablauf

In vergleichbarer Weise erfolgte der Ablauf im Konfigurationssystem für die Walzwerkgetriebe (Abbildung 3-6), wobei in diesem Fall das MEBP *Mdesign(Tedata)* eingesetzt wurde. Und auch im Bereich des Apparate- und Druckbehälterbau ergeben sich ähnlich Problemstellungen. Zur Berechnung von Druckbehältern können Softwarepakete genutzt werden, die verschiedene Richtlinien (z. B. Druckgeräterichtlinie, AD, ASME) berücksichtigen. Erneut ist neben sinnvoll strukturierten CAD-Mastermodellen die komponentenübergreifende Abbildung von Abhängigkeiten notwendig. Einige Modellabhängigkeiten wie beispielsweise die gegenseitige Beeinflussung von Ausschnitten oder Ausschnittverstärkungen für Stutzen müssen sowohl berechnungsseitig als auch geometrisch (z. B.: Mindestabstände zu Schweißnähten) erfasst und analysiert werden. Die Abstandsdaten der Stutzen können durch Analysefeature im CAD-System deutlich einfacher erfasst werden als es im Berechnungsprogramm der Fall ist. Im Beispiel ist das Berechnungsmodell direkt an die parametrischen CAD-Modelle geknüpft. Dieses Beispiel zeigt im Vergleich zu den anderen Beispielen die Einbindung branchenspezifischer Software *Dimy(Tüv-Nord).*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

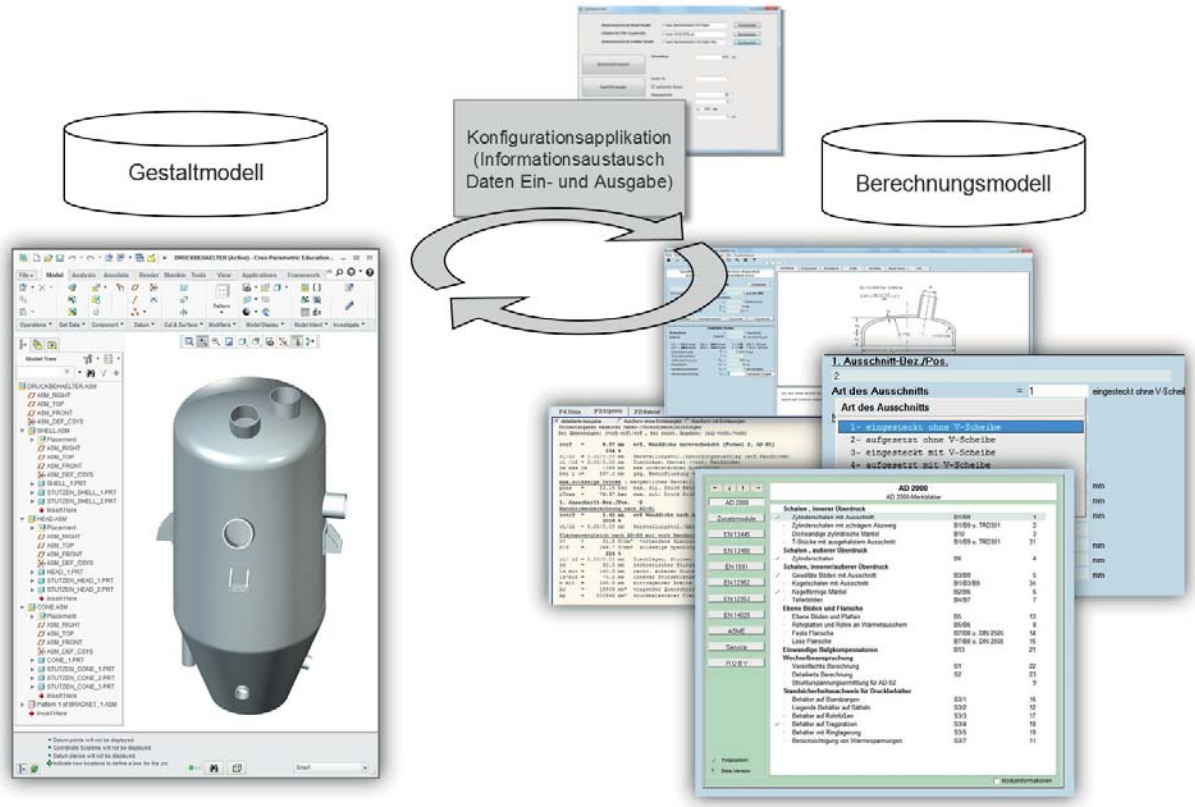


Abbildung 4-8: Kopplung von Behältergestaltung und -berechnung

Auch hier muss auf die Manipulation und Verarbeitung von ASCII-Dateien zurückgegriffen werden, aus denen sich bspw. die aus der Berechnung stammenden Stutzenparameter ermitteln lassen. Abbildung 4-9 zeigt einige Optionen der Stutzendefiniton. Der Behältermantel mit den entsprechenden Ausschnitten und Bezugselementen ist in a) dargestellt, b) zeigt die Ausprägung gerader und schräger Stutzen mit notwendigen Bezugselementen, c) hingegen die Möglichkeit, die Stutzen als aufgesetzte oder durchgesteckte Variante auszuführen. Abbildung 4-9 d) zeigt exemplarisch einen Teil der ASCII-Textdatei, aus der die Informationen über die Stutzenausprägung gewonnen werden können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

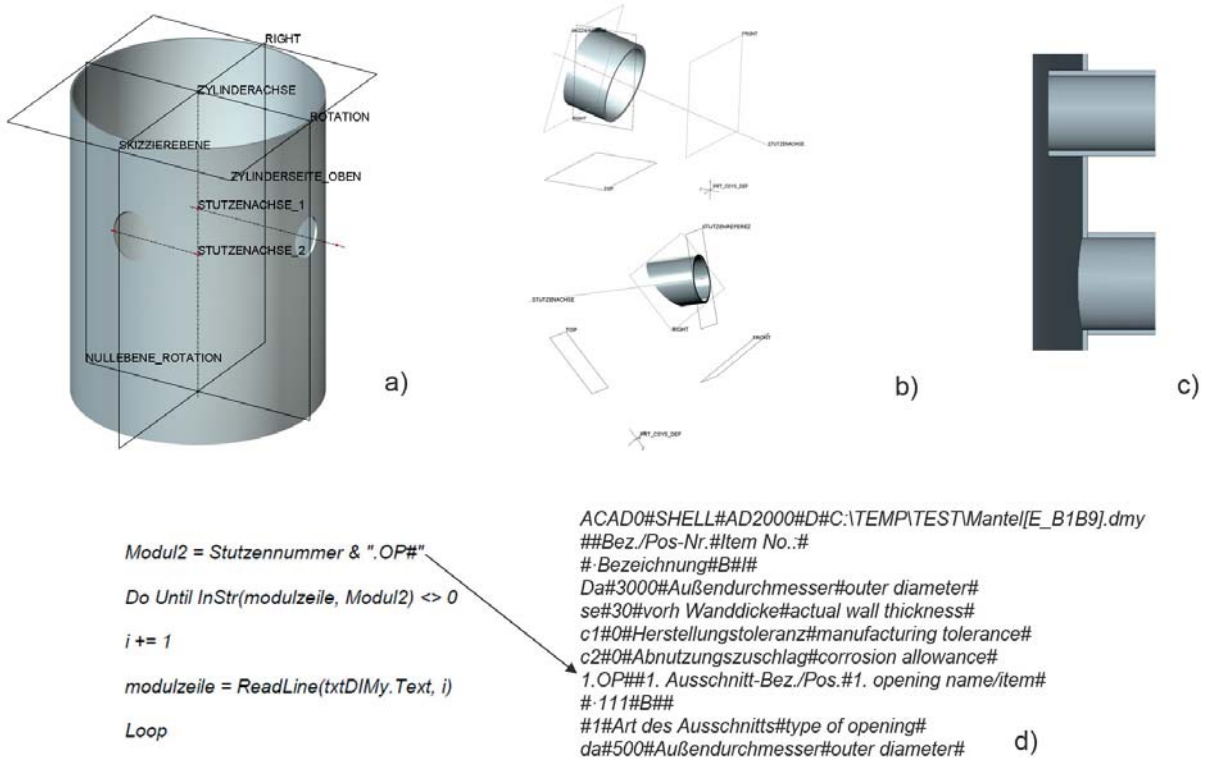


Abbildung 4-9: Automatisierter Einbau von Stutzen in einen Druckbehälter

Die Ausschnitte im Zylindermantel werden über parametergetriebene UDFs erstellt, die bei der automatischen Platzierung entsprechend der Berechnungsparameter angepasst werden. Um die nötige Varianz (Länge, Durchmesser, Wandstärke, gerade, schräg, aufgesetzt, mit Überstand oder durchgesteckt) abbilden zu können, sind die Stutzenmodelle ebenfalls parametrisch aufgebaut. Zur Gewährleistung der Modellstabilität der Stutzen wurden zunächst flächenbasierte Hilfsmodelle erzeugt, die über Familientabellen verwaltet werden. Mithilfe der modellübergreifenden Kopierfunktion sowie Funktionen zur Volumenerzeugung werden die endgültigen Teile abgeleitet [St12].

4.2.3.4 API des Berechnungsprogrammes

Beispiel Tabellenkalkulation: Wird direkt die API der Tabellenkalkulation für die Parameterkopplung genutzt, kann z. B. der Nachteil der Richtungsgebundenheit (im Vergleich zur vordefinierten Schnittstelle zur Tabellenkalkulation) einzelner Parameter stückweise umgangen werden, indem über die Client-Applikation entschieden wird, welcher Parameter unter welcher Bedingung an welche Zelle geschrieben (bzw. ausgelesen) wird. Äquivalent gilt dies auch für die Ergebnisparameter. In einer Tabelle können also mehrere Berechnungen verwaltet werden, die fallspezifisch angesprochen werden können. Auf die Notwendigkeit wird noch in Kapitel 4.3.2 eingegangen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Beispiel MEPB: Im Rahmen der Recherche konnte als einziges MEBP mit einer API *Kisssoft(Kisssoft)* ermittelt werden. Die API ermöglicht der Client-Applikation, auf die Parameter der 41 Berechnungsmodule schreibend und lesend zuzugreifen. Außerdem kann auf Funktionen wie speichern, laden, auslösen der Berechnung, erzeugen einer Berechnungsdokumentation etc. zurückgegriffen werden. Eine Kopplung kann hier im Vergleich zu anderen MEBP deutlich flexibler erfolgen.

In Bezug auf diese Arbeit bzw. auf die Erstellung der höherwertigen Konstruktionsobjekte wären z. B. folgende Funktionen wünschenswert: Ereignisbasierte Funktionen (z. B. Ereignismeldung an die Client-Applikation nach einer Änderung eines Parameters oder nach einer manuell ausgeführten Berechnung), Fehlerbehandlungsmethoden, Rückgabewerte der vorhandenen Funktionen (z. B. nach erfolgreich ausgeführter Berechnung). Auch wenn der heute zur Verfügung stehende Umfang im Vergleich zu den Möglichkeiten in den CAD-Systemen noch stark eingeschränkt ist, zeigt *Kisssoft(Kisssoft)* somit einen zielführenden Ansatz, leistungsfähigere Kompositionen aus verschiedenen Softwaresystemen zu definieren, wie es für die höherwertigen Konstruktionsobjekte wünschenswert ist.

4.3 Richtungsabhängigkeit und Variation von Parametern

4.3.1 Bidirektionale Kopplung

Bisher wurde dargestellt, wie Eingabeparameter an das Berechnungsmodell übergeben und Ergebnisparameter zurückgegeben wurden. Es handelte sich um eine unidirektionale Verknüpfung, siehe Abbildung 4-10 a). Eine Eingabe bzw. Änderung eines Eingabeparameters erfolgte dabei an einer Stelle (z. B. im Konfigurationssystem oder im CAD-Modell, wenn dieses mit einer Tabellenkalkulation verknüpft ist). Es stellt sich somit eine im Vorfeld definierte Richtungsabhängigkeit ein. Unter der Verwendung eines Konfigurators (bzw. in einer Variantenkonstruktion) ist diese Einschränkung vollkommen ausreichend, da der Auslegungsablauf sowie der „Eingabeort“ vordefiniert werden. Da sich der Konstrukteur im Rahmen eines primären Konstruktionsprozesses ständig in den verschiedenen Modellen bewegt, um Anpassungen vorzunehmen, entwickelt sich ein deutlich komplexeres Informationsübertragungsmuster. Abbildung 4-10 b) zeigt die bidirektionale Kopplung, bei der Berechnungseingabeparameter sowohl im Gestalt- als auch im Berechnungsmodell geändert werden können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

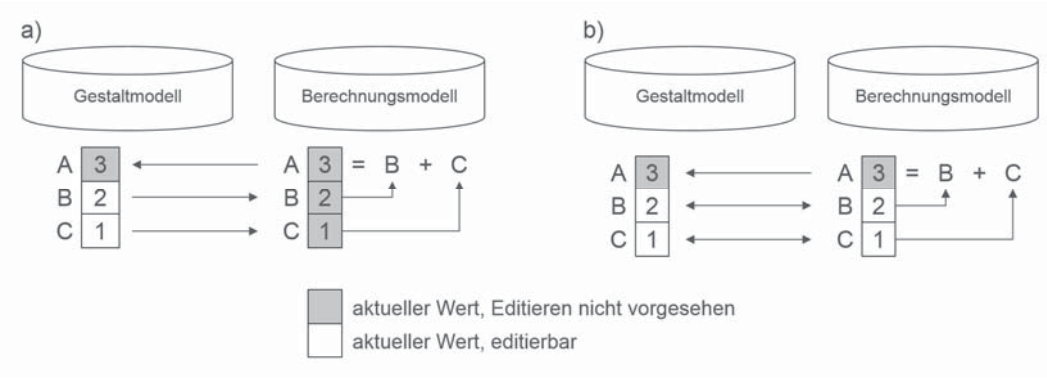


Abbildung 4-10: a) unidirektionale Kopplung, b) bidirektionale Kopplung

Um dem Konstrukteur eine möglichst flexible Lösung bereitzustellen, besteht der Wunsch, eine bidirektionale Kopplung einzurichten. Der bidirektionale Informationsfluss stellt eine besondere Herausforderung in gekoppelten Systemen dar (siehe Abbildung 4-11). Änderungen, die der Konstrukteur an einem der Modelle vornimmt, müssen „überwacht“ werden, um die Konsistenz zum anderen Modell herstellen zu können. Die Schwierigkeit besteht darin, abzusehen, wann Änderungen erfolgen und in welche Richtung der Abgleich stattfinden soll.

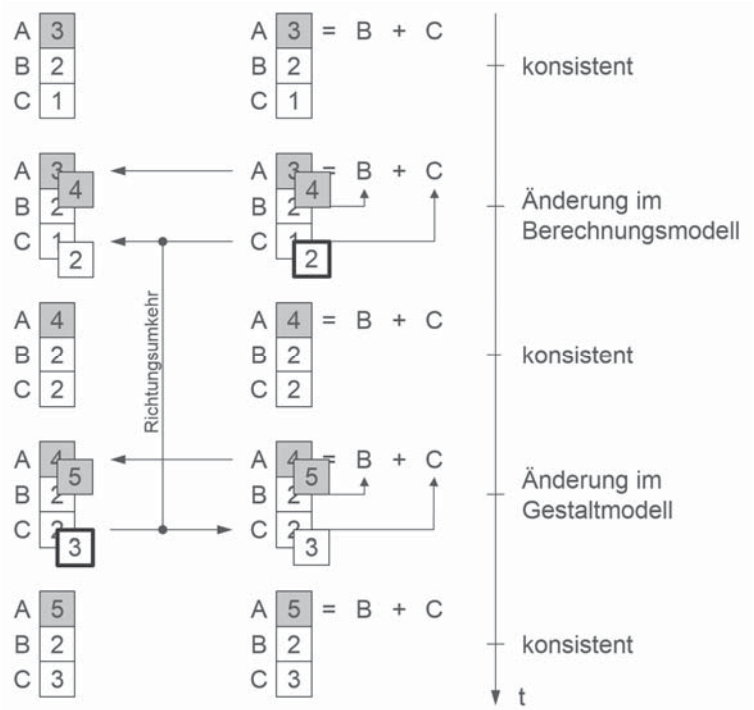


Abbildung 4-11: Bidirektionale Kopplung, Richtungsumkehr

In festgelegten Zeitintervallen oder ereignisbasiert muss geprüft werden, an welchem Modell und an welchem Parameter der Konstrukteur Änderungen vorgenommen hat. In leistungsfähigen CAD-Systemen kann (über die API) auf Ereignisse (z. B. Parameteränderung, Regenerierung, Speicherung etc.) reagiert werden, die dann weiterführende Routinen auslösen können. In MEBP oder Mathematikprogrammen fehlen derartige API-Funktionen. Das interne Datenmodell muss ggf. erst in die Ein-Ausgabedatei geschrieben werden, wozu

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

zunächst ein Speichervorgang notwendig ist. Erst dann kann eine Prüfung der Parameterwerte erfolgen (siehe Kapitel 4.2.3.3). Darüber hinaus reicht ein einfacher Vergleich von Gestalt- und Berechnungsparameter nicht aus, um festzustellen, welcher Parameter den aktuellen Wert besitzt. Es kann lediglich die Ungleichheit festgestellt werden, wie Abbildung 4-12 verdeutlicht.

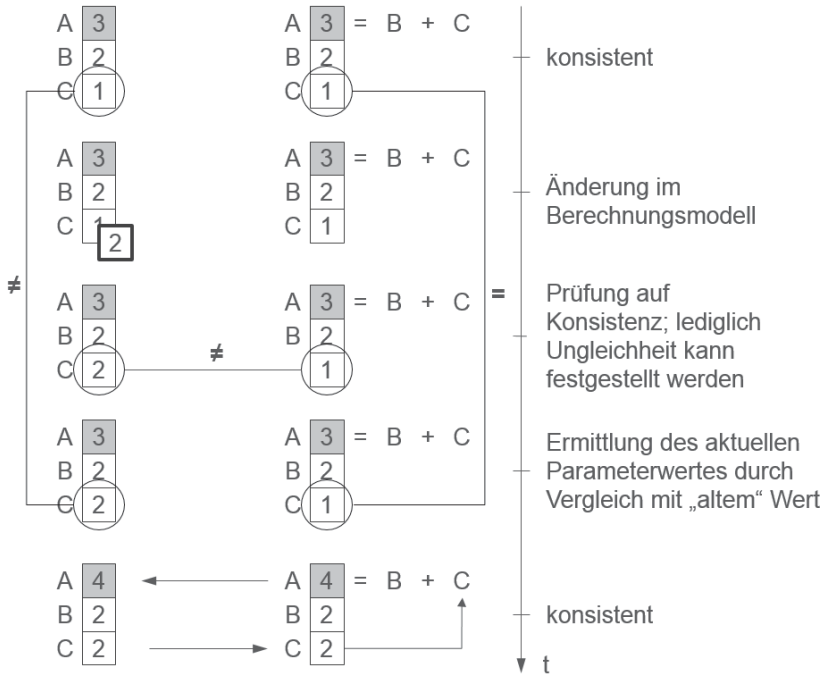


Abbildung 4-12: Bidirektionale Kopplung, zeitliche Abhängigkeit

Wenn es nicht möglich ist, in beiden Modellen auf das Ereignis „Parameteränderung“ zu reagieren und somit nicht identifiziert werden kann, wo die Änderung erfolgte, wird ein Vergleich mit dem „alten“ Parameterwert notwendig. Dieser liegt aber nur dann vor, wenn die Historie des Modells bekannt ist.

Alternativ kann zur Realisierung eines derartigen Konzeptes der Benutzer aufgefordert werden, den aktuellen Wert zu bestätigen. Zur Beherrschung der Komplexität ist ein Datenbankkonzept oder ein Referenzmodell zielführend [Pr14a].

4.3.2 Variation von Berechnungsergebnissen

In Kapitel 3 wurde dargestellt, wie der Konstrukteur Schritt für Schritt Konstruktionsparameter festzulegen hat. Welche Parameter dabei Berechnungseingaben und welche Parameter Berechnungsergebnisse sind, muss häufig fallabhängig entschieden werden können. Das bedeutet, dass die Gleichungen hinsichtlich unterschiedlicher Parameter aufzulösen sind. Am Beispiel der Kegelquerpressverbindung der Zahnkupplung soll die praktische Relevanz vorgestellt werden, unterschiedliche Berechnungsziele vorgeben zu können. Abbildung 4-13 zeigt eine kleine Auswahl der wichtigen Auslegungsparameter. Im Rahmen eines Auslegungsprozesses könnten sich unterschiedliche Fragestellungen ergeben, z. B.:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- wie groß das übertragbare Moment einer vorgegebenen Gestalt ist,
- wie groß die nötige Fugenlänge bei gegebener Belastung ist,
- welcher Werkstoff der Belastung gerade gerecht werden würde oder
- wie groß das nötige Übermaß bzw. der Montageaufschub ist.

Entsprechend dieser Fragen (indirekt sind dies Berechnungsergebnisse) müssen unterschiedliche Parameter als Eingaben bzw. als Ergebnisse festgelegt werden können

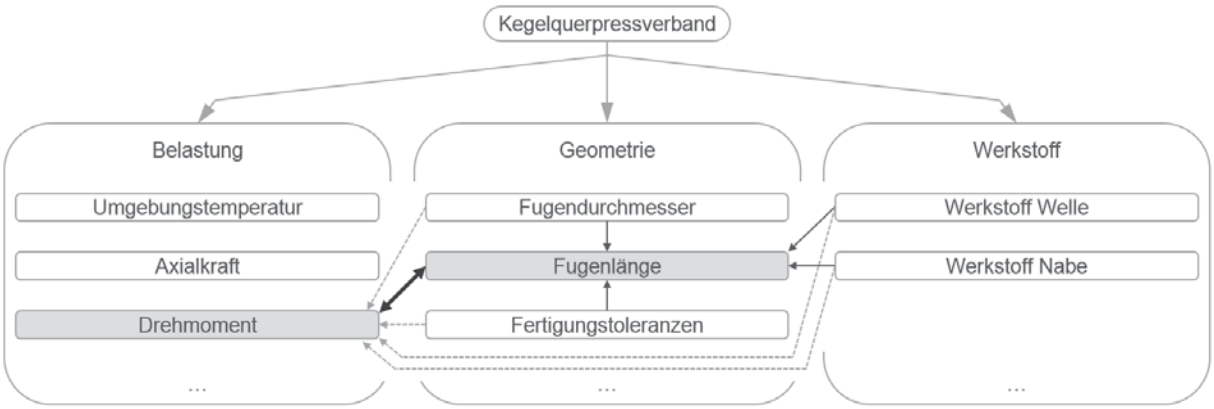


Abbildung 4-13: Unterschiedliche Berechnungsziele bei der Kegelquerpressverbindung

Abbildung 4-14 zeigt die Umsetzung für die Parameter Drehmoment und Fugenlänge. Im Rahmen des Konfigurationssystems für die Balligzahnkupplung ZBG wurde das System so aufbereitet, dass entsprechend der getroffenen Eingaben in der Eingabedatei ausgewertet wird, welcher Berechnungsgang (berechne Fugenlänge aus vorgegebenem Nennmoment oder berechne Nennmoment aus vorgegebener Fugenlänge) zu wählen ist. Da das Konfigurationssystem die Ein- und Ausgaben verwaltet, werden unabhängig vom Auslegungsfall die Berechnungseingaben und Berechnungsergebnisse an das Geometriemodell geschrieben. Dennoch ist die Datenübertragungsproblematik identisch mit einer Konstellation, die nur Gestalt- und Berechnungsmodell (ohne Konfigurationssystem) vorsieht.

Das Beispiel der Kegelquerpressverbindung zeigt, dass es im Rahmen dieser Variantenkonstruktion ausreichend ist, sich auf ein System zu beschränken, das hinsichtlich der wichtigsten Zielgrößen auslegen kann. Auch wenn es grundsätzlich wünschenswert ist, jeden beliebigen Parameter frei zu variieren.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

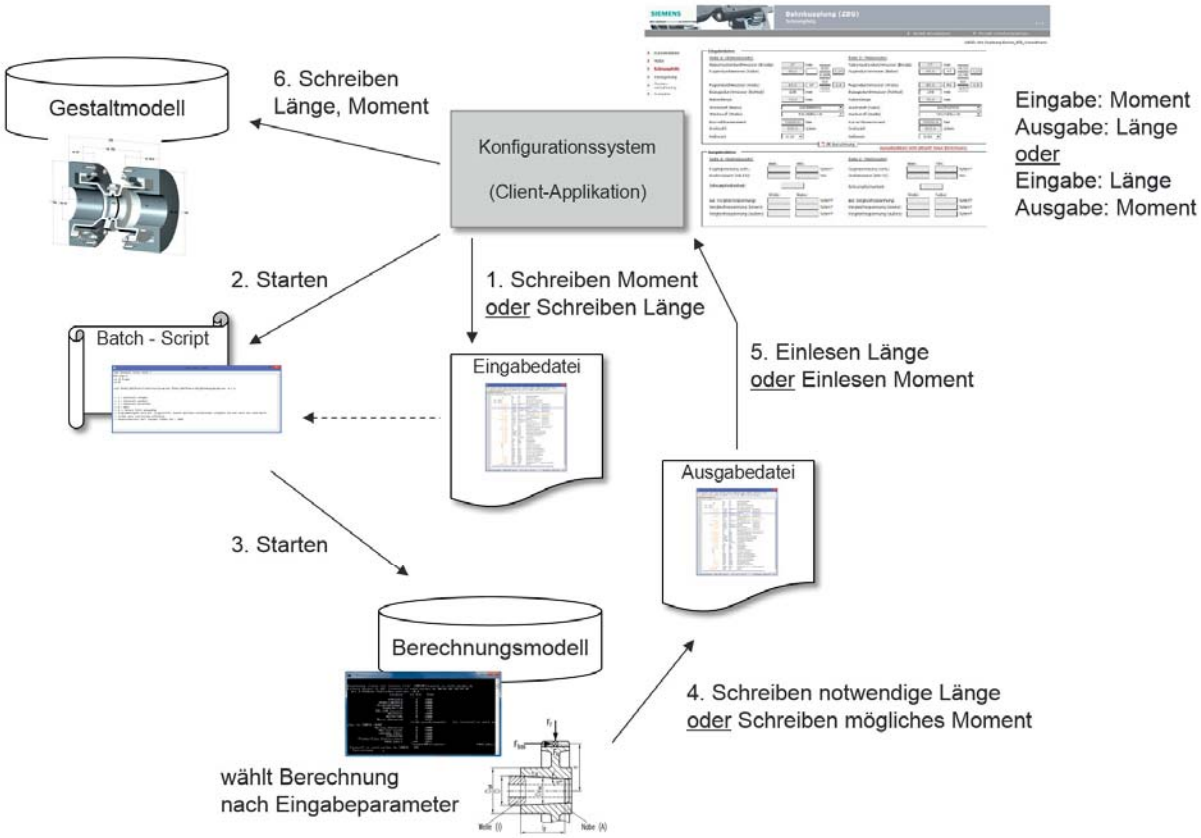


Abbildung 4-14: Datenfluss mit unterschiedlichen Berechnungszielen

4.3.3 Integration von Vorauslegungen

Einfachere Zusammenhänge können heute durchaus entsprechend abgebildet werden, um dem Konstrukteur die Möglichkeit zu geben, Ergebnisparameter fallabhängig festlegen zu können. Dies trifft für überschlägige Vorauslegungen zu. Notwendige Bedingung ist, dass die Gleichungen in aufgelöster Form bereitstehen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

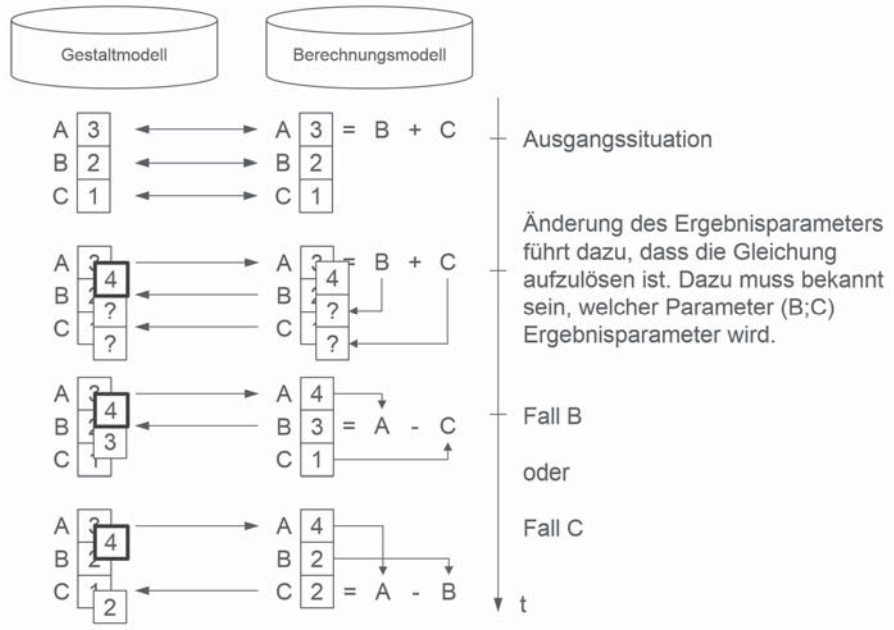


Abbildung 4-15: Variation von Berechnungsergebnissen

Beispiel Beziehungseditor: Abbildung 4-16 zeigt exemplarisch, wie die Dimensionierungsrechnung für die Gleitlagerung aus Kapitel 3.5 in ein Entwurfsmodell integriert wurde. Derartig aufbereitet entsteht ein hochgradig variables und anpassungsfähiges Modell, das die iterative Lösungsfindung unterstützen kann. Alle Parameter und auch Berechnungsergebnisse können nun fallabhängig variiert werden.

Zum Teil sind heutige CAD-Systeme mit Gleichungslösern für benutzerdefinierte Gleichungen ausgestattet (z. B. *Creo2.0(PTC))*. Wenn kein Gleichungslöser vorhanden ist, kann die Ursprungsgleichung auch manuell nach den freien Parametern aufgelöst werden. Die Umgehung der Zugriffssperre kann über eine bedingte Anweisung (if-else) oder Fallunterscheidung (select-case) umgangen werden, die standardmäßig in leistungsfähigen CAD-Systemen zur Verfügung stehen. Der Gleichungslöser muss durch eine Benutzereingabe lediglich die Information erhalten, welcher Parameter als Ausgleich auf der rechten Seite der Gleichung angepasst werden soll (bzw. nach welchem Parameter die Gleichung aufzulösen ist). Abbildung 4-16 zeigt die Umsetzung im CAD-System *Creo2.0(PTC)*.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

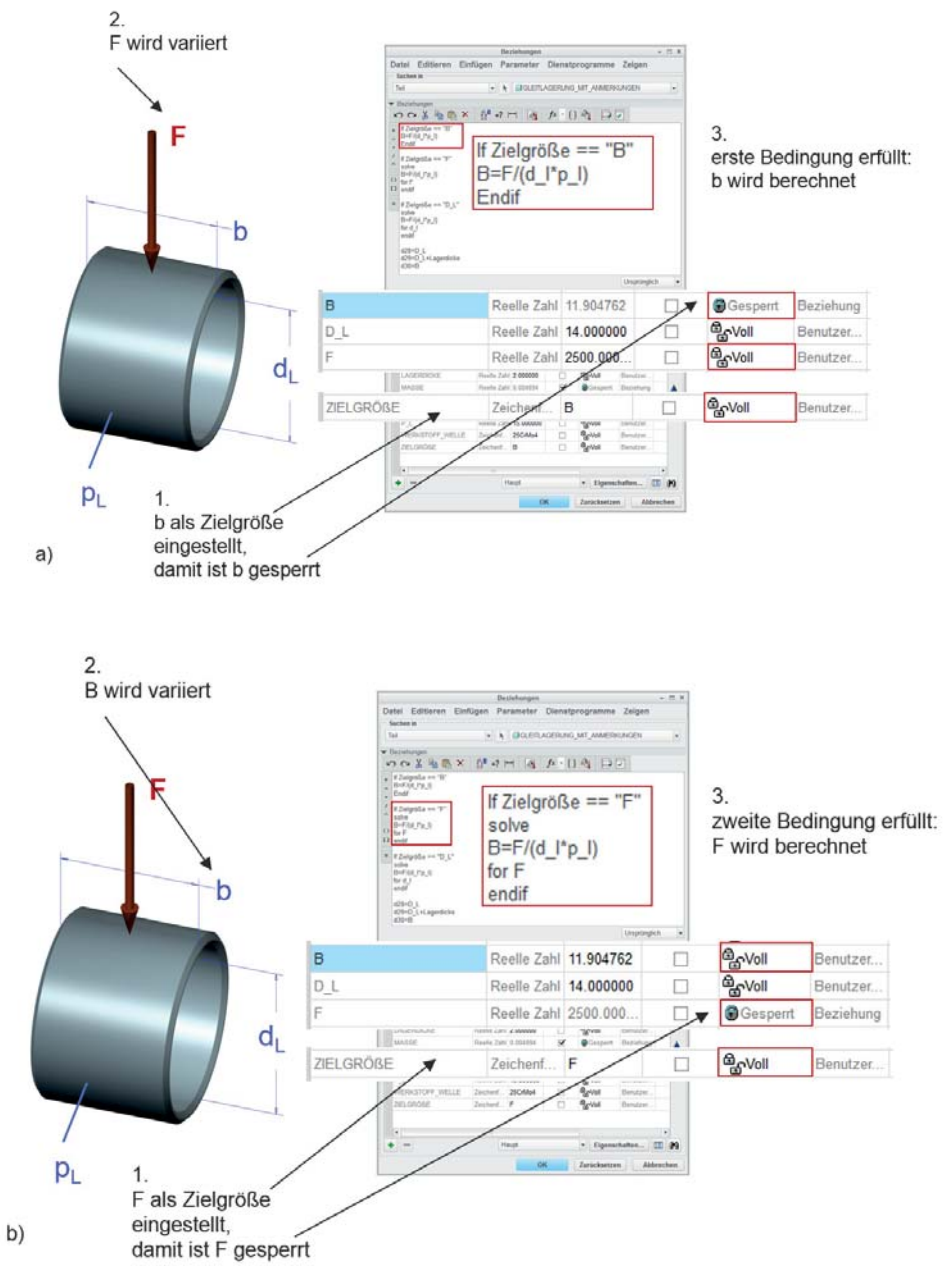


Abbildung 4-16: Entwurfsmodell Gleitlagerung und Gleichungslöser im CAD-System

Da auch MEPB Vorauslegungen anbieten, soll an dieser Stelle zusätzlich die Vorauslegung der Kegelquerpressverbindung der Zahnkupplung vorgestellt werden.

Beispiel MEBP: MEPB bieten neben dem obligatorischen Nachrechnen einer Kegelquerpressverbindung auch die Funktionalität an, hinsichtlich der wichtigsten Zielgrößen vorauszulegen. Das Modul „Kegelquerpressverbindung“ unterstützt die Vorauslegung des Nennmoments, des Kegelwinkels, des Fügedruckes und der nötigen Fugenlänge. Abbildung 4-17 zeigt die Eingabedialoge des Berechnungsmoduls für Kegelquerpressverbindungen. Abhängig davon, welche Größe ausgelegt werden soll, sind unterschiedliche Eingabeparameter erforderlich. Die nötige Logik ist im MEBP implementiert. Über die API des MEBP kann sowohl das Lesen als auch das Schreiben der Fugenlänge erfolgen: Call Kisssoft.SetVar("m01b.l", 150), Call Kisssoft.GetVar("m01b.l“).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

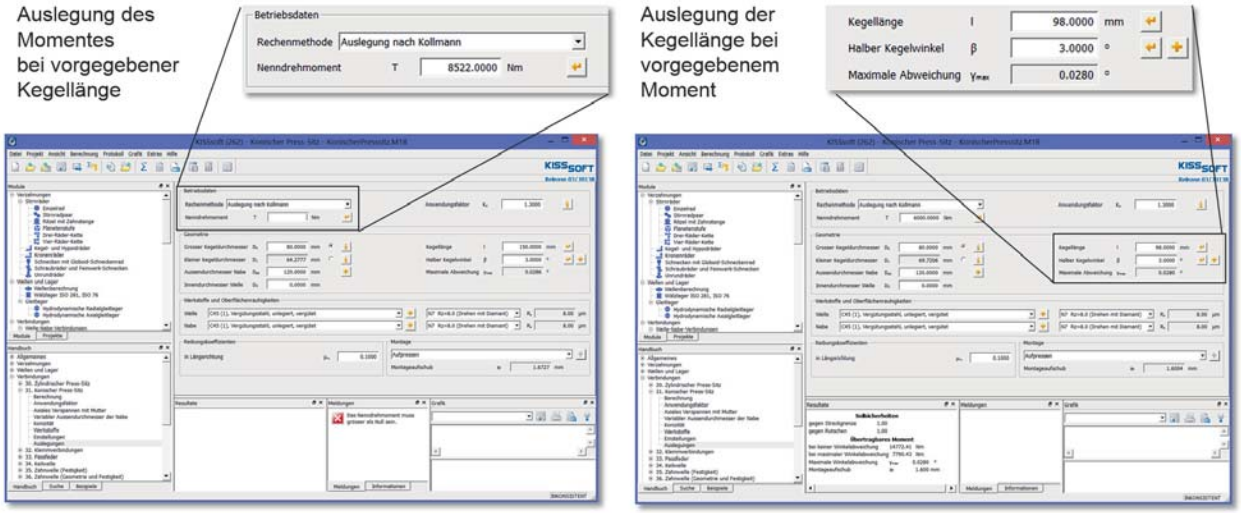


Abbildung 4-17: Auslegung hinsichtlich verschiedener Zielgrößen in *Kisssoft(Kisssoft)*

4.4 Wertebereiche der Konstruktionsparameter

Alle maßgeblichen Konstruktionsparameter (sowohl im Gestalt- als auch im Berechnungsmodell) müssen neben dem Namen als identifizierendes Merkmal weitere Informationen tragen. Obligatorisch sind Typ (String, Ganzzahl etc.), aktueller Wert und Einheit (bzw. Dimension). Die weiterführenden Möglichkeiten, Parameter zu definieren, unterscheiden sich in den verschiedenen CAD-Systemen bzw. Berechnungsprogrammen teilweise erheblich, da auch hier keine einheitlichen Konventionen existieren. Im CAD-System *NX(Siemens)* besteht beispielweise die Möglichkeit, einen Vektor zu definieren, was hingegen in SolidWorks(Dassault Systèmes) oder Creo(PTC) nicht direkt möglich ist. Darüber hinaus können in manchen Systemen Hilfetexte, Kommentare oder Toleranzen direkt angegeben werden.

In MEBP besteht im Allgemeinen nicht die Möglichkeit, beliebige Parameter zu definieren; sie werden indirekt vom Programm erzeugt und intern verarbeitet. Innerhalb der Mathematiksoftware können vergleichbar mit der Definition im CAD-System Parameter mit den zuvor genannten Eigenschaften erzeugt werden. Durch die Möglichkeit einheitenbasiert zu rechnen (z. B. *Mathcad(PTC)*), helfen sie dem Konstrukteur, syntaktische Fehler zu verringern.

Parameterbasierte Konzepte, die automatisierte Abläufe beinhalten, müssen dem Konstrukteur eine Unterstützung bei der Variation von Konstruktionsparametern bieten. Eine wesentliche Bedingung, um dieser Anforderung gerecht zu werden, ist die Definition von zulässigen Wertebereichen und möglichen Stufensprüngen der Konstruktionsparameter. Über die eigentliche Parameterdefinition in den CAD-Systemen werden diesbezüglich zunächst keine Möglichkeiten vorgesehen. Es muss auf Familientabellen oder Begrenzungen über if-else-Konstrukte im Beziehungseditor zurückgegriffen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Software, die speziell zur Erzeugung von eigenständigen Konfigurationssystemen entwickelt wurde, sieht obligatorisch Möglichkeiten zur Beschränkung von Werteeingaben vor. Abbildung 4-18 zeigt als Beispiel die Parameterdefinition in *Spyydmaxx(Acatec)*. Die tabellarisch angelegten Parametersätze werden mit entsprechenden Formularobjekten verknüpft, in denen die Eingaben des Benutzers erfolgen. Nach Festlegung eines Parameters im Formularobjekt prüft das System automatisch, ob eine Verletzung des Wertebereiches hervorgerufen wurde. Dazu muss der Wertebereich für jeden Parameter im Vorfeld explizit festgelegt werden.

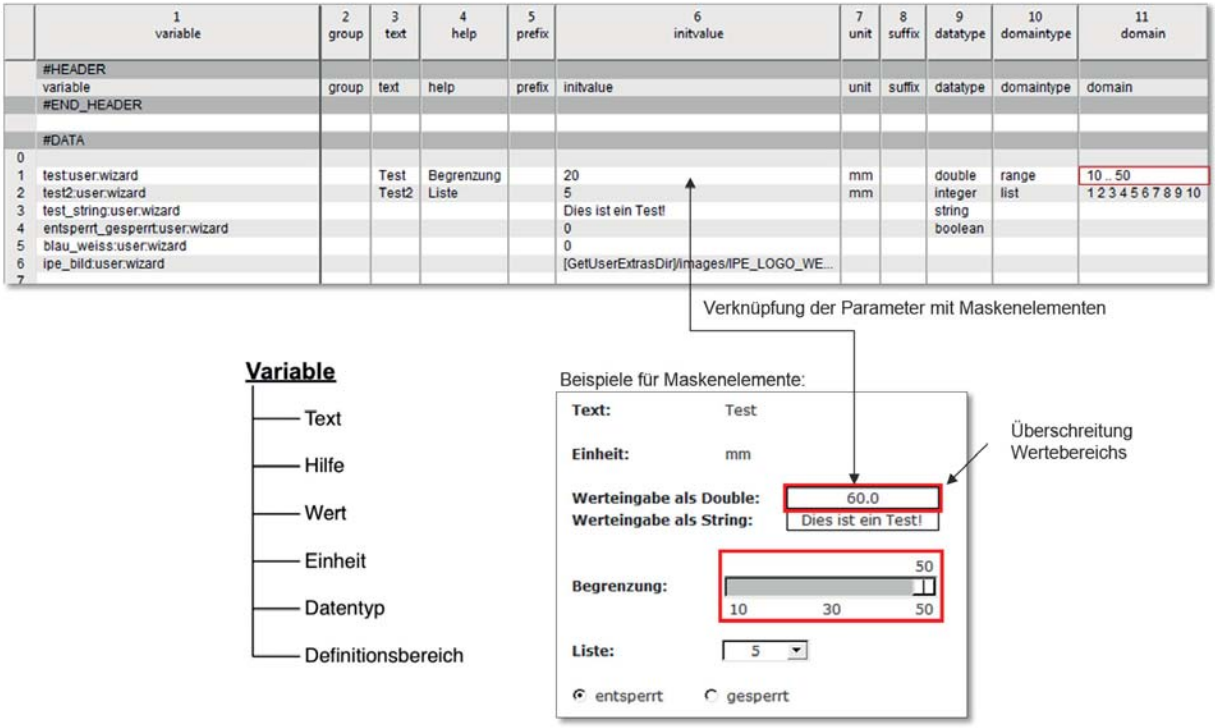


Abbildung 4-18: Parameterdefinition, Plausibilitätskontrolle und Formularelement in *Spyydmaxx(Acatec)*

Welche Probleme das vorläufige Festlegen von Wertebereichen verursacht und wie diesen Problemen begegnet werden kann, soll im Folgenden weiter spezifiziert werden. Höherwertige Konstruktionsobjekte werden die Definition von Wertebereichen voraussetzen.

Als Beispiel dient eine vereinfachte Form der Bogenzahnkupplung ZBG. Abbildung 4-19 zeigt den vereinfachten Aufbau (weitestgehend symmetrisch vereinfacht und nur Längenmaße betrachtet), es sollen lediglich die gezeigten Bemaßungen betrachtet werden; Deckelbreiten etc. bleiben ebenfalls unberücksichtigt. In Kapitel 3.2.2 wurde bereits auf die einzuhaltenden funktionalen und fertigungstechnischen Gesichtspunkte (Montagegerechtheit, Erreichbarkeit der Verbindungsstellen) hingewiesen. Die schattierten rot umrandeten Bereiche symbolisieren nicht zulässige Zustände (ebenfalls vereinfacht). Es soll angenommen werden, dass nur die Parameter S und L (in den zunächst plausiblen Grenzen $L \leq 300$ und $60 \leq S$) beliebig veränderbar sind. Die Länge l ($40 \leq l \leq 100$) kann eindeutig über $l = ½(L-S)$

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ausgedrückt werden. Das System ist damit überbestimmt. Durch l ist L und S voneinander abhängig.

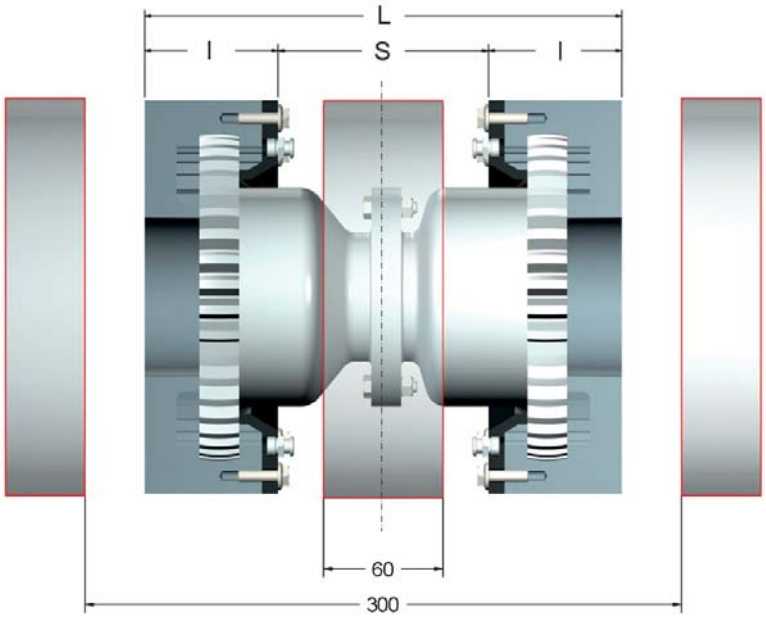


Abbildung 4-19: Randbedingungen, Zahnkupplung ZBG

Diese Grenzen (Randbedingungen) schränken den möglichen Lösungsraum ein. Es bildet sich ein (Un-)Gleichungssystem, für das Lösungen gefunden werden müssen. Der Konstrukteur muss die Möglichkeit bekommen, die für den konkreten Auftrag notwendigen Werteingaben festzulegen. Dazu ist es grundsätzlich möglich, dass vom System die Eingabe von L und S abgewartet wird, um anschließend eine Prüfung der drei Grenzen ($40 \leq l \leq 100$; $L \leq 300$; $60 \leq S$) erfolgen zu lassen. Dadurch wird zwar die Erzeugung ungültiger Lösungen vermieden, dem Benutzer fehlt jedoch die entscheidende Rückmeldung, welcher Parameterwert zulässig gewesen wäre ((Abbildung 4-20 a), fett hervorgehobene Werte deuten für dieses Beispiel verletzte Grenzen an).

Das Beispiel zeigt die Abhängigkeit der zulässigen Parameterwertebereiche von anderen Parametern (die ursprüngliche Annahme $60 \leq S$ kann nach dem Festlegen von L weiter eingeschränkt werden $70 \leq S \leq 190$.). Daraus folgt, dass die während der Auslegung getätigten Eingaben überwacht werden müssen (Abbildung 4-20 b)). Für S wäre die Eingabe 200 durchaus möglich, aber nur dann, wenn $L > 280$ gewählt wurde. Dies verdeutlicht die Problematik, Parametergrenzen nur statisch vorgeben zu können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

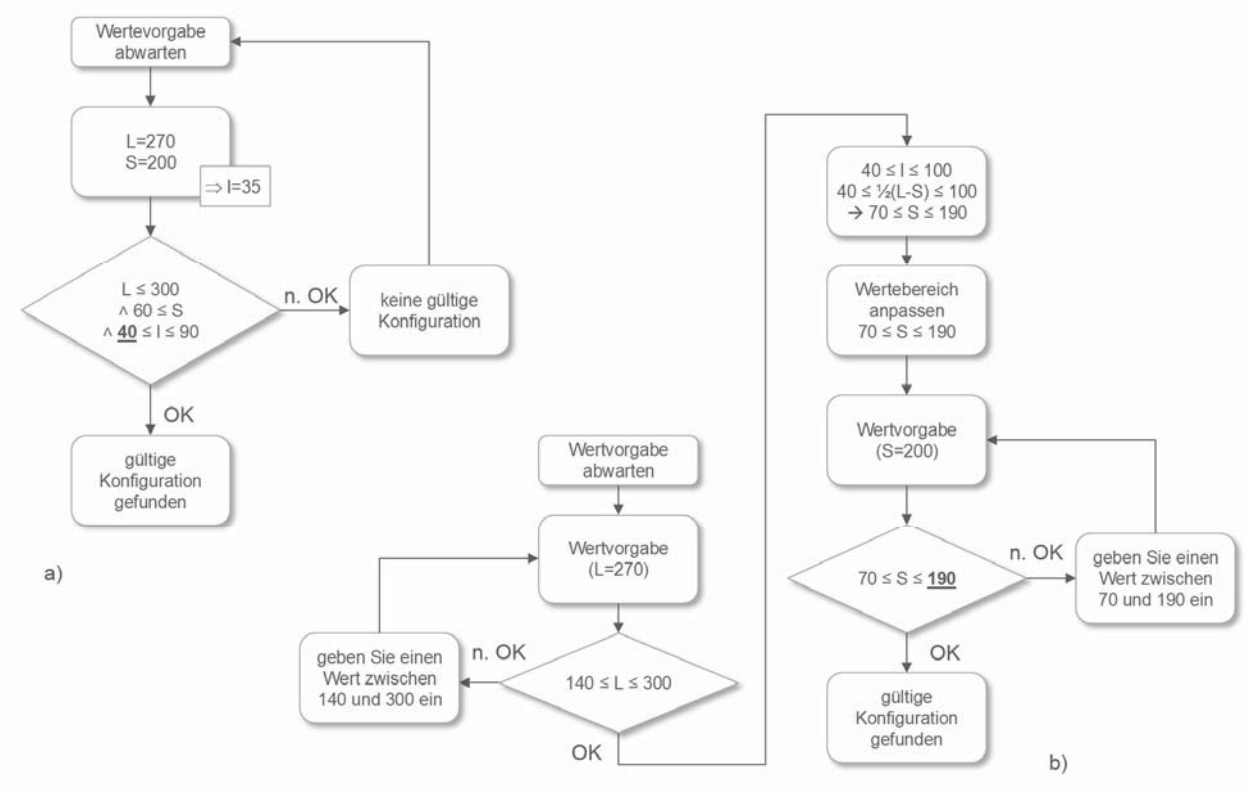


Abbildung 4-20: Ermittlung zulässiger Wertebereiche nach Wertvorgabe

Wird ein zeitlicher Auslegungsablauf vorgesehen, kann die Komplexität reduziert werden, sodass die vorgeschlagene Systemunterstützung möglich wird. Im Rahmen des Konfigurationssystems erfolgte dies durch die Vorgabe der Reihenfolge der Benutzerdialoge und durch die Vorgabe, in welcher Reihenfolge die Eingabefelder auszufüllen sind. Da vorherige Parameterwerte im Folgeschritt bekannt sind, können die Wertebereiche des aktuell einzugebenden Parameters dynamisch ermittelt werden. Wird es im weiteren Verlauf der Auslegung notwendig, zuvor definierte Parameter zu verändern, müssen die Wertebereiche der abhängigen Parameter erneut geprüft werden, was als Nachteil dieser Lösung angesehen werden kann. Wie dieser Ablauf der Parametereingaben festzulegen ist, wird durch die konkrete Konstruktion beeinflusst und muss im Rahmen der Definition der Konstruktionsvorschrift (Kapitel 3.3) ermittelt werden. Mit der einfachen Parameterdefinition in der Konfigurationssoftware *Spyydmaxx(Acatec)* war dies nicht möglich. Es können nur statische Wertebereiche vorgegeben werden, sodass hierfür systemspezifische Anpassungen notwendig waren. *Spyydmaxx(Acatec)* erlaubt die spezifische Anpassung über die Programmiersprache Tcl/TK und die Möglichkeit, Parameter über Regeln zu verarbeiten, sodass der aktuelle Wert entsprechend überprüft werden konnte.

Die Auslegung der Bogenzahnkupplung ist durch die Notwendigkeit eine Vielzahl weiterer Parameter zu berücksichtigen, deutlich komplexer als bisher dargestellt. Wie im Folgenden noch weiter angeführt wird, müssen weitere Kriterien hinsichtlich Funktionalität berücksichtigt werden und darüber hinaus sind Parameter durch Berechnungen gekoppelt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die vorgestellte Vorgehensweise zur Ermittlung der Wertebereiche konnte dennoch auf weitere Teilprobleme zur Auslegung der Zahnkupplung ZBG übertragen werden. Zur Ermittlung und Überprüfung der Wertebereiche ist es zielführend bereits frühzeitig ein leistungsfähiges CAD-System heranzuziehen. Konstruktionsstudien und Parametervariationen ermöglichen diesbezüglich die Untersuchung komplexer Zusammenhänge.

Abbildung 4-21 zeigt das Modell mit weiteren geometrischen Zusammenhängen. An dieser Stelle sei noch kurz auf die Ermittlung des Gelenkpunktabstandes in diesem Kupplungsbeispiel hingewiesen. Der Normalgelenkpunktabstand (hier 153mm) ergibt sich aus den Mitten der Hohlradbreiten und wird über ein Analysefeature im Baugruppenmodell gemessen. Über einen Verschiebeanteil kann dieser hinsichtlich eines geforderten Wertes angepasst werden. Dies musste bei der Referenzierungsmethodik und im Strukturmodell entsprechend berücksichtigt werden.

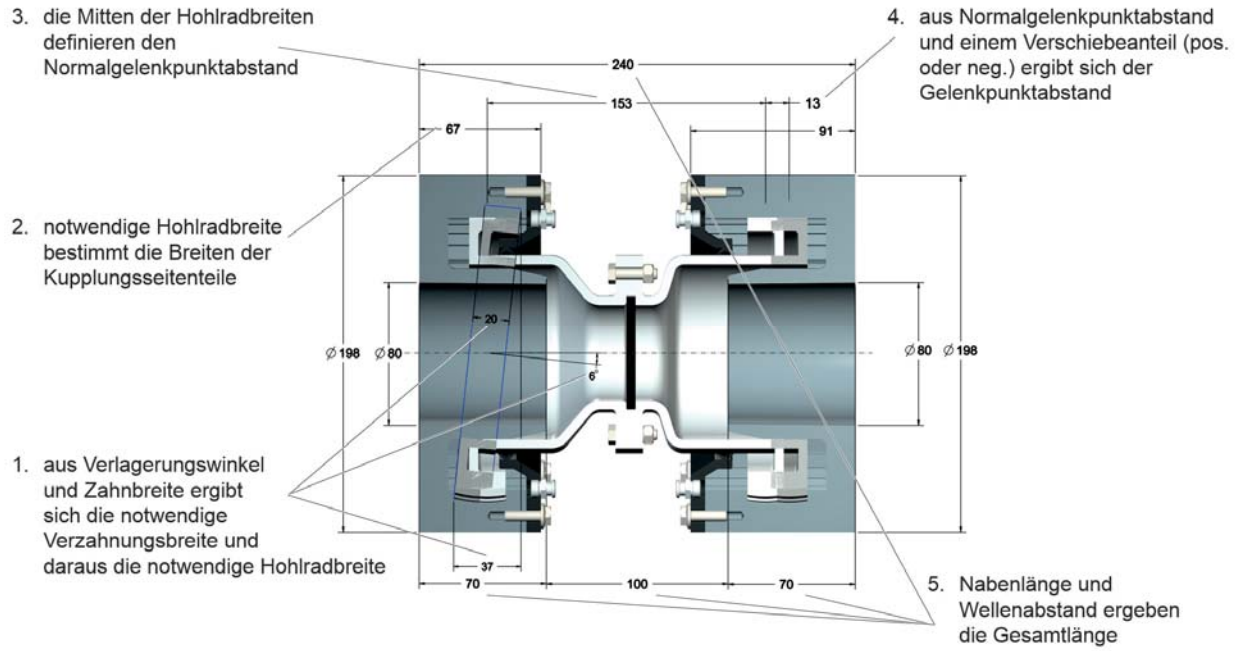


Abbildung 4-21: Zahnkupplung ZBG, Abhängigkeiten im Auslegungsablauf

Auf die Notwendigkeit, ungewünschte Modellzustände zu verhindern, wurde bereits hingewiesen, grundsätzlich ist eine Differenzierung zwischen:

- geometrisch möglichen (bzw. stabilen) Modellen
- und Modellen, die eine geforderte „Gerechtheit“ verletzen

zweckmäßig. Der komplette Kupplungsaufbau erfolgte vollständig parametergetrieben, wobei die Steuerparameter über das Konfigurationssystem mit aktuellen Werten versorgt wurden. Abbildung 4-22 zeigt eine Auswahl nicht funktionsgerechter Konfigurationen. Für den Aufbau des Konfigurationssystems mussten derartige Zustände über die erwähnten Kontrollmechanismen verhindert werden. Abbildung 4-22 a) zeigt eine Kupplung, bei der

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sich im Betrieb Berührungspunkte einstellen würden. Hierzu konnte zudem eine über das Konfigurationssystem initiierte Durchdringungsanalyse im CAD-System genutzt werden. Abbildung 4-22 b) zeigt eine Kupplungsausprägung, die der geforderten Axialverlagerung nicht genügen würde. Das innere Kupplungsteil wird berührt (mit dem Kreis markierte Stelle), ehe die Verzahnung links (die mit der Linie markierte Stelle) anschlägt. Abbildung 4-22 b) zeigt eine Kupplung die geometrisch stabil, aber nicht montagegerecht ist.

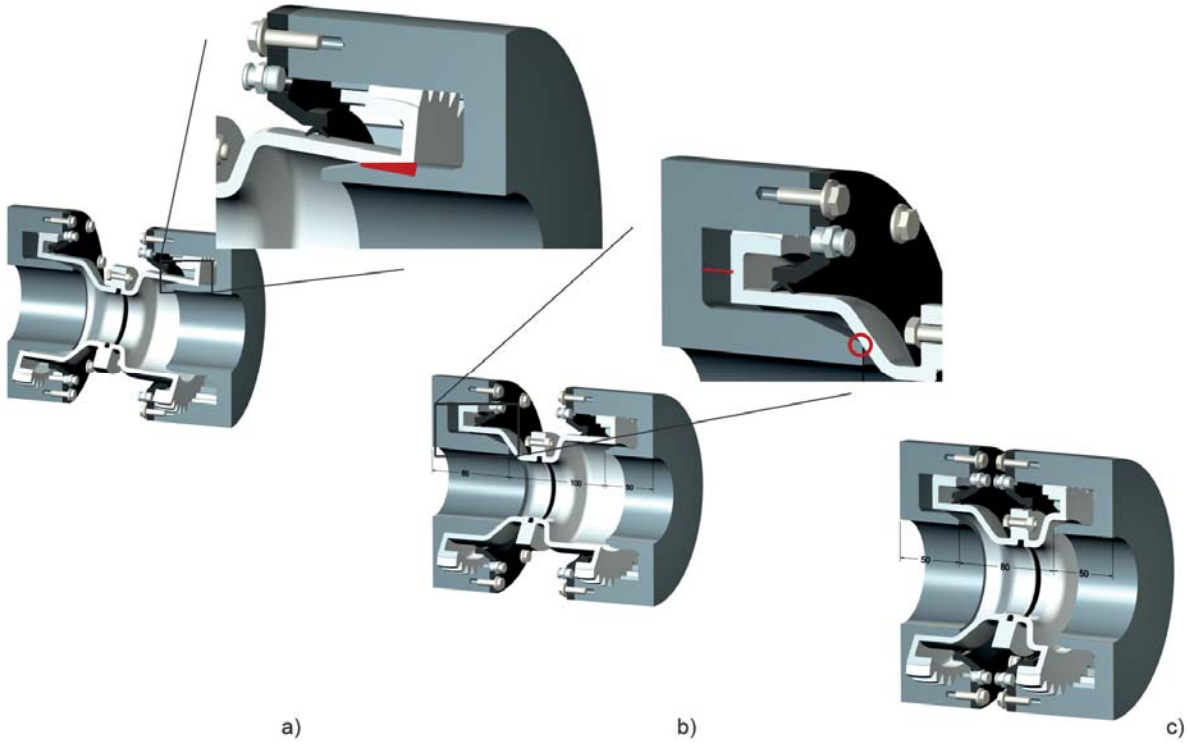


Abbildung 4-22: Verschiedene, nicht zulässige Konfigurationsausprägungen

4.5 Berechnungsrelevante Zusammenhänge in Baugruppen

Nachdem in Kapitel 4.4 verstärkt geometrische Probleme bei Parametervariationen betrachtet wurden, soll in Kapitel 4.5 der Fokus wieder stärker auf die berechnungsrelevanten Aspekte gelegt werden. Im Allgemeinen erfordern Konstruktionen eine ganzheitliche Betrachtungsweise. Einzelne Komponenten dürfen im Baugruppenkontext nicht als isolierte, unabhängige Objekte angesehen werden.

4.5.1 Ganzheitliche Sichtweise

Am Beispiel der Antriebswelle des Walzwerkgetriebes verdeutlicht sich die Durchgängigkeit der Abhängigkeiten zwischen den Teilmodellen anschaulich. Betrachtet wird zunächst auszugsweise die Antriebswelle mit Zahnrad. Die Zahnradbreite ist sowohl im Gestalt- als auch im Berechnungsmodell zu berücksichtigen. Gleiches gilt für die Absatzbreite der Antriebswelle. Aus der Verzahnungsberechnung ergibt sich die Wellenbelastung, die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zahnradbreite entspricht der Breite eines Wellenabsatzes (ober zumindest einem Teilbereich des Absatzes). Es müssen also die Abhängigkeiten zwischen:

- Gestaltmodell Zahnrad und Berechnungsmodell Zahnrad,
- Gestaltmodell Zahnrad und Gestaltmodell Welle,
- sowie Berechnungsmodell Zahnrad und Berechnungsmodell Welle

über einen entsprechenden Informationsaustausch berücksichtigt werden. Abbildung 4-23 zeigt exemplarisch weitere Parameter und die Analogie zwischen Welle und Wälzlager. Bei komplexeren Systemen wird es zur Herausforderung, die Gesamtübersicht zu behalten wenn z. B. ein Konfigurationssystem aufgebaut werden soll. Dies unterstreicht die Bedeutung geordneter Produktstrukturen.

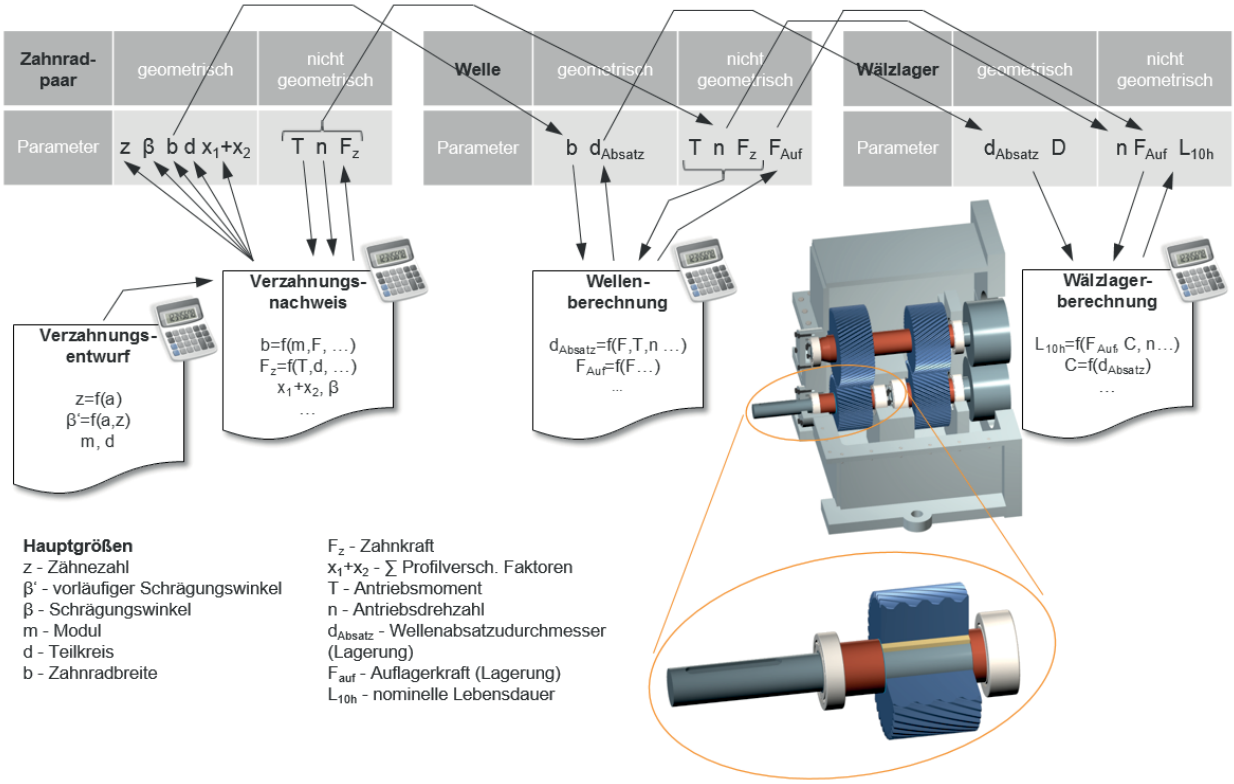


Abbildung 4-23: Abhängigkeiten zwischen den Modellen am Beispiel des Walzwerkgetriebes

Verallgemeinert man diese Zusammenhänge, ziehen sich die Abhängigkeiten zwischen den Gestalt- und Berechnungsmodellen durch die gesamte Konstruktion (vgl. Abbildung 4-24).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

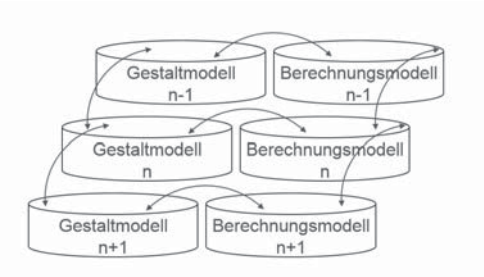


Abbildung 4-24: Abhängigkeiten zwischen den Modellen

Soll ein parameterbasiertes Gesamtkonzept aufgestellt werden, müssen Parametervariationen innerhalb eines gekoppelten Systems möglich sein. In dem Beispiel der Walzwerkgetriebe wurde auf die Manipulation und Verarbeitung der im XML-Format vorliegenden Ein- und Ausgabedateien des MEBP *Mdesign(Tedata)* zurückgegriffen.

Rekursive Zusammenhänge: Wird die Lagerbreite während der Lagerauswahl angepasst, verändern sich die Auflagerstellen im Wellenmodell. Das bedeutet, es entsteht eine rekursive Abhängigkeit, sodass nach der Wälzlagerberechnung eine Anpassung des Wellenmodells erfolgen muss. Geänderte Auflager verändern die Lagerkräfte, sodass erneut durch Anpassung die Konsistenz hergestellt werden muss.

Höherwertige Konstruktionsobjekte sollen untereinander eigenständig für diesen übergreifenden Informationsaustausch sorgen, ohne dabei ein Konfigurationssystem nutzen zu müssen.

4.5.2 Produktlogik

Neben dem zu bewältigenden Informationsaustausch zwischen Gestalt- und Berechnungsmodell spielt die Abbildung der Produktlogik eine zentrale Rolle. Abbildung 4-25 zeigt einen Ausschnitt der abzubildenden Logik der Antriebswelle des Walzwerkgetriebes. Da die Getriebe sowohl ins Schnelle als auch ins Langsame übersetzen müssen, werden die Zahnräder stark variiert. Hieraus ergibt sich die Anforderung, dass unter einem Grenzteilkreisdurchmesser die Welle-Zahnradkombination gegen eine Ritzelwelle auszutauschen ist. Die Zahnradberechnungssoftware weist zwar u.a. auf die Unterschreitung der praktischen Grenzzähnezahl hin, berücksichtigt aber nicht die Teilkreisgrenze für die Ritzelwelle, welche wiederum vom Wellendurchmesser abhängig ist. Als Konsequenz folgt daraus, dass im Berechnungsmodell des Zahnradpaares die Zähnezahl beliebig reduziert werden kann, obwohl die tatsächlich mögliche Teilkreisgrenze längst unterschritten ist. Dieser Umstand resultiert daraus, dass Zahnrad- und Wellenberechnung nicht logisch voneinander abhängig sind. Abhängig von der Erfüllung der Bedingung (Ritzelwelle oder Welle-Zahnrad Kombination) sind unterschiedliche Anpassungen an den Gestalt- und Berechnungsmodellen vorzunehmen bzw. Berechnungsgänge zu initiieren.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

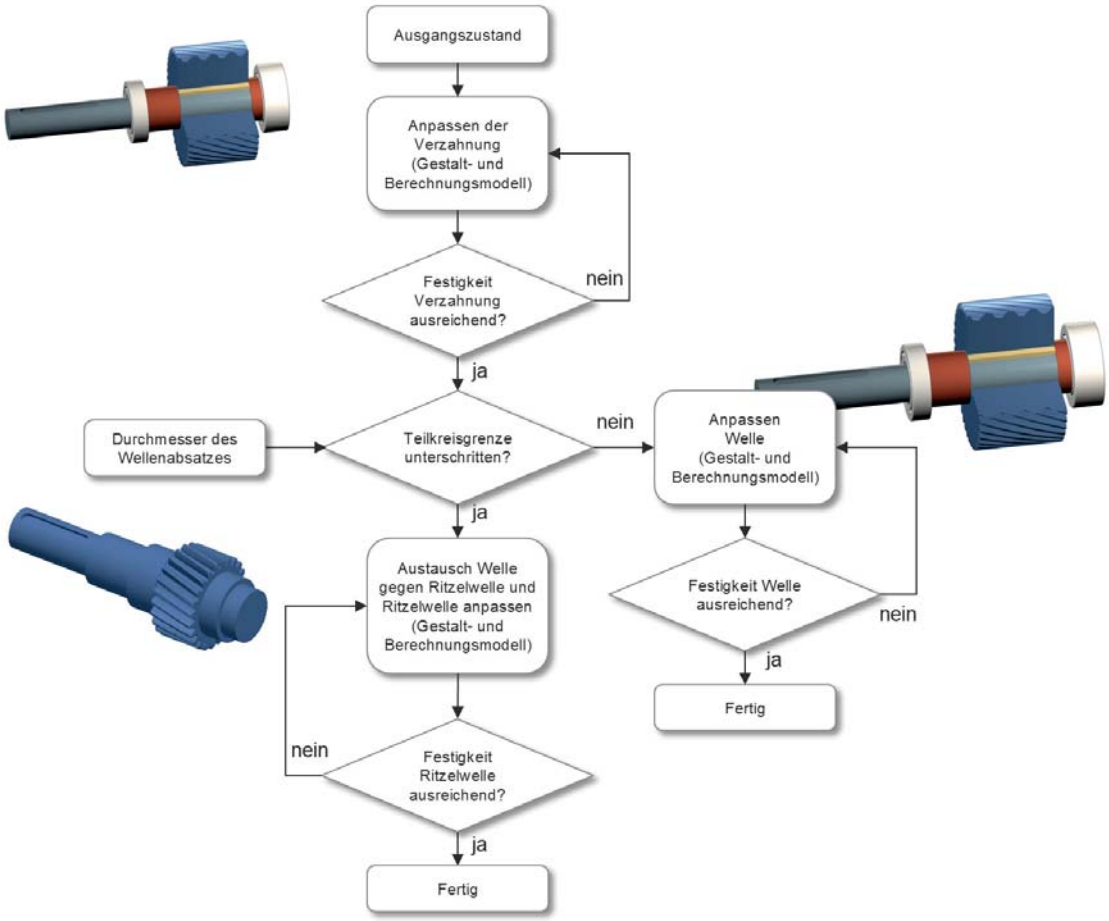


Abbildung 4-25: Konstruktionsvorschrift und Produktlogik am Beispiel der Antriebswelle

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5 Höherwertige Konstruktionsobjekte

Aufgrund der im Vorfeld zusammengetragenen Erkenntnisse und den daraus abgeleiteten Anforderungen an die in Zukunft notwendige Systemunterstützung, kann in diesem Kapitel die Definition der höherwertigen Konstruktionsobjekte erfolgen. Die in vorherigen Kapiteln entwickelten Ansatzpunkte werden aufgegriffen, um sowohl Aspekte aus Sicht des Konstruktionsprozesses als auch aus informationstechnischer Sicht zusammenzuführen. Es folgen Ausführungen, wie höherwertige Konstruktionsobjekte in den Baugruppenzusammenhang gebracht werden, wie sie sich im Baugruppenzusammenhang verhalten und wie sie sich an geänderte Randbedingungen anpassen. Um den praktischen Bezug herzustellen, werden neben diesen allgemeinen Betrachtungen, repräsentative Beispiele angeführt. Das Kapitel schließt mit einem Anwendungsszenario, in dem die Anwendung von höherwertigen Konstruktionsobjekten (im Folgenden auch durch HKO abgekürzt) vorgestellt wird.

5.1 Präzisierung der Merkmale

5.1.1 Wirkungsbereich

Zunächst sollen einige kurze Ausführungen erfolgen, welche Konstruktionskomponenten als höherwertige Konstruktionsobjekte aufbereitet werden können. Wie im Grundlagenkapitel bereits andeutet, können Konstruktionen im maschinenbaulichen Umfeld auf das Zusammenwirken der vier wesentlichen Konstruktionskomponenten:

- Normteile (Maschinenelemente und Apparateteile)
- Zukaufteile (nicht genormte aber fertig angebotene Komponenten)
- Wiederholteile (innerbetrieblich häufig verwendete Standardteile oder Vorzugsteile) und

Neuteile vereinheitlicht werden. Zukaufteile und Normteile werden sowohl in kommerziell vertriebenen Bibliotheken als auch frei im Internet angeboten. Zur Einschätzung der Größenordnung dienen zwei Beispiele: „Traceparts“ bietet derzeit über einhundert Millionen Teile [Tr14]; „Cadenas“ die 3D-Modelle der gesamten Produktpalette von über sechshundert Lieferanten [Ca14]. SCHULTE und MANTWILL [ScMa10] unterstreichen die Bedeutung von Normteilen im gesamten Produktentstehungsprozess sowie deren assistenzgestützte Bereitstellung für den Konstrukteur. Darüber hinaus fordern sie, den ganzheitlichen Standardisierungsgedanken zu forcieren. Bereits aus diesen Ausführungen kann abgeleitet werden, dass für höherwertige Konstruktionsobjekte hohes Potential vorhanden ist. Es muss

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

allerdings vorausgesetzt werden, dass die notwendigen Randbedingungen informationstechnisch abgebildet werden können. Das gilt gleichermaßen für Wiederholteile als auch für Neuteile.

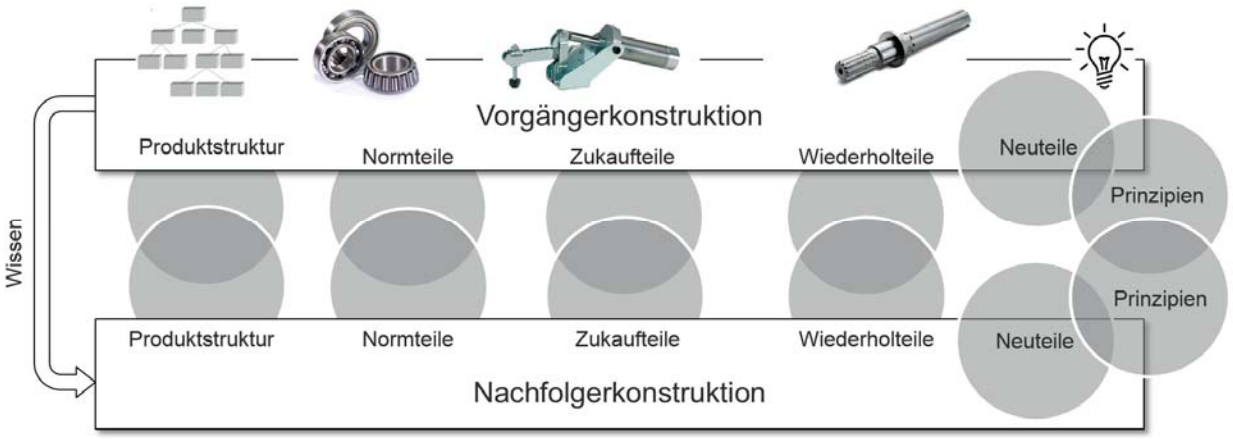


Abbildung 5-1: Konstruktionskomponenten, Verwendung in Vorgänger- Nachfolgerkonstruktionen

Gemäß Abbildung 5-1 besteht zwischen Vorgänger- und Nachfolgerkonstruktionen[8] eine Schnittmenge identischer Konstruktionskomponenten. Dies trifft insbesondere auf Konstruktionen mit hohem Neuheitsgrad zu, in denen sich der Neuheitsanteil vorrangig über Neukombination der Konstruktionskomponenten definiert. Aber auch bei Neuteilen kann davon ausgegangen werden, das die zugrundeliegenden Prinzipien ähnlich denen der Vorgängerkonstruktion sind. So können ebenfalls Konzeptmodelle aufbereitet werden, in denen Prinzipien verankert sind und die weiter zu detaillieren sind. Erkenntnisse aus der Verwendung der Konstruktionsobjekte in Vorgängerkonstruktionen müssen in höherwertigen Konstruktionsobjekten verankert werden, damit sie in Nachfolgerkonstruktionen entsprechend berücksichtigt werden können. Fragen, die sich der Konstrukteur aus heutiger Sicht während der Ableitung der Nachfolgerkonstruktion auf herkömmlichem Wege stellen muss, sind u.a.:

- Was ist zu berücksichtigen, wenn die ausgesuchte Konstruktionskomponente verwendet werden soll?
- Welche Informationen werden benötigt, um eine Entscheidung zu treffen, ob diese Konstruktionskomponente verwendet werden kann?
- Genügt die Komponente dem sich einstellenden Zustand in der Baugruppe?
- Warum sind genau diese Konstruktionskomponenten in den Vorgängerversionen eingesetzt worden?

[8] Als Vorgängerkonstruktion soll beispielsweise auch der aus der Walzmühle übernommene Nabenmotor für die integrierte Getriebelösung aus Kapitel 3.4.2 verstanden werden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Welche Alternativen standen bei der Entwicklung der Vorgängerkonstruktion zur Auswahl?
- Würde eine dieser Alternativen besser in die Nachfolgerkonstruktion passen?
- Existieren zu den Komponenten zwischenzeitlich Weiterentwicklungen?
- **...**

Die vollständige durchgängige Berücksichtig dieser Aspekte ist aus heutiger Sicht jedoch eher Fiktion als realisierbare Wirklichkeit. Um eine Steigerung der Produktivität als auch der Qualität des Konstruktionsprozesses zu erzielen, muss es in Zukunft dennoch gelingen, den Konstrukteur direkt im CAD-System bei der Klärung dieser und vergleichbarer Fragen zu unterstützen. Höherwertige Konstruktionsobjekte müssen im Laufe der Zeit erweiterbar sein, um neue Informationen, die sich aus neuen Verwendungen ergeben haben, aufnehmen zu können. Somit wird sichergestellt, dass sie als erweiterte Form mit weiteren angereicherten Informationen für Folgekonstruktionen bereitstehen. Die Integration in den CAD-Prozess erfolgt dabei in Form von Bibliotheken, sodass der Konstrukteur unmittelbar Zugriff erhält.

5.1.2 Definition

Ein höherwertiges Konstruktionsobjekt soll als eine neuartige Erweiterung der herkömmlichen im CAD-Prozess eingesetzten Konstruktionskomponenten aus Teile- oder Feature-Bibliotheken verstanden werden. Sie sind mit einer erweiterten Funktionalität und Konstruktionswissen angereichert. Höherwertige Konstruktionsobjekte basieren auf parametrischen CAD-Mastermodellen:

- Diese können mit Klassen aus der objektorientierten Programmierung verglichen werden.
- Sie haben ebenfalls als Ziel, die Funktionalität zu kapseln und die Komplexität nach außen hin zu verbergen.
- Sie besitzen ein semantisch abgeschlossenes inneres Verhalten, das durch das Zusammenspiel von Gestalt- und Berechnungsmodell charakterisiert wird.
- Über Schnittstellen legt ein höherwertiges Konstruktionsobjekt offen, was zur korrekten Funktion notwendig ist.

Über folgende Schnittstellen kommunizieren sie mit dem Konstrukteur und interagieren im Baugruppenkontext mit anderen Konstruktionskomponenten:

- Dialogschnittstelle zum interaktiven Abfragen fehlender Werte bzw. zur Anzeige von Ergebnissen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Schnittstelle zu anderen Komponenten, um komponentenübergreifende Abhängigkeiten berücksichtigen zu können
- Platzierungsschnittstelle (intelligente Auswahl der Einbaureferenzen)

Abbildung 5-2 zeigt schematisch zwei höherwertige Konstruktionsobjekte. Mit „E_n“ bzw. „e_n“ werden die Möglichkeiten symbolisiert, Informationen in ein höherwertiges Konstruktionsobjekt einfließen zu lassen. Dies erfolgt entweder über den Konstrukteur oder über eine angrenzende Konstruktionskomponente. Äquivalent dazu erfolgt die Informationsausleitung über „A_n“ bzw. „a_n“.

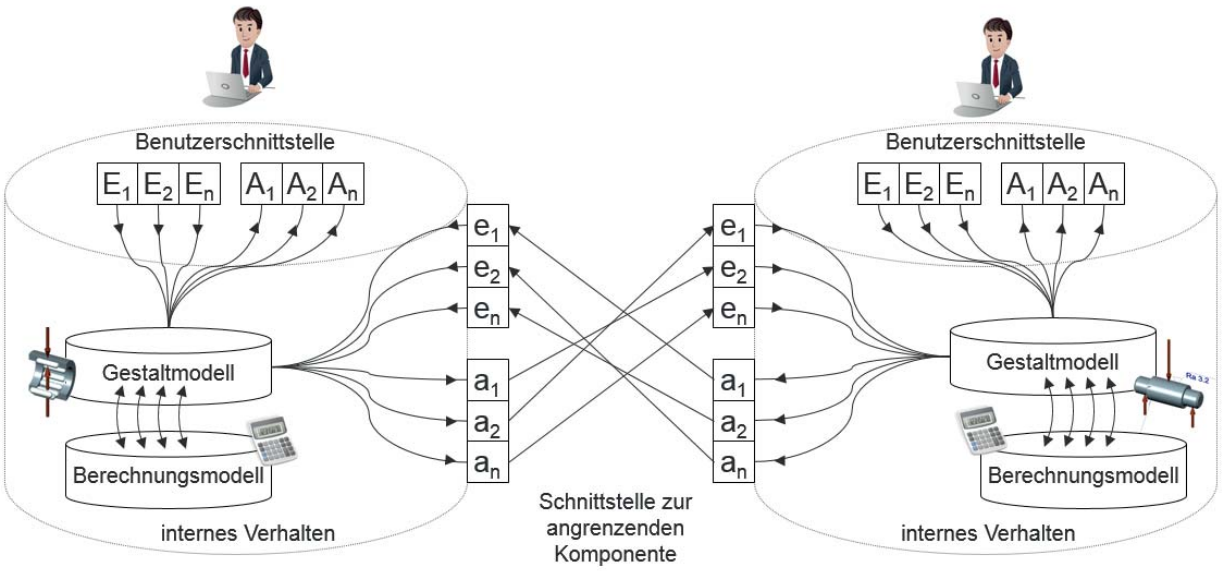


Abbildung 5-2: Höherwertige Konstruktionsobjekte

Der gewählte Ansatz vertauscht die herkömmliche Vorgehensweise, die vorsieht, erst eine Konstruktionskomponente zu konfigurieren (z. B. auf der Zuliefererinternetseite) und dann die Platzierung der Komponente in der Zielbaugruppe vorzunehmen (was bei Änderungen Nachteile verursacht). Das höherwertige Konstruktionsobjekt kann erst (systemunterstützt) platziert und dann ausgelegt werden. Somit grenzen sich höherwertige Konstruktionsobjekte zusätzlich zur herkömmlichen Variantenkonstruktion über einen Konfigurator ab. Mit dem inneren Verhalten wird ebenfalls definiert, welche Eingaben mindestens zur Definition eines höherwertigen Konstruktionsobjektes notwendig sind. Ein höherwertiges Konstruktionsobjekt passt sich im Entwurfsprozess nach der Platzierung dynamisch an den Baugruppenkontext an. Dazu nutzt es die in der Baugruppe bereits bekannten und durch den Konstrukteur im Dialog (der von der Komponente eigenständig ausgelöst wird) weiter festzulegenden Randbedingungen. Indem das HKO den Änderungen eigenständig nachkommt bzw. Rückmeldung liefert, wenn es dem Baugruppenkontext nicht mehr gerecht wird, unterstützt es die iterativen Vorgänge in primären Konstruktionsprozessen und reduziert manuelle Arbeiten. Was damit konkreter gemeint ist, soll am Beispiel eines Sicherungsrings dargestellt werden: Im Kontext der umgebenden Teile (Wel-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

le, Lager, Gehäuse etc.) wird vom CAD-System geprüft, ob der Sicherungsring, die axiale Last, die über das Lager eingebracht wird ertragen kann, ob er im biegefreien Bereich der Welle liegt (die notwendige Nut erzeugt hohe Kerbspannung), ob er für die Montage zugänglich ist oder ob es eine bessere Alternative gibt. Da höherwertige Konstruktionsobjekte frühzeitig funktionale und belastungsrelevante Betrachtungsweisen unterstützen, forcieren sie den Grundgedanken des „Front Loadings". Ist der Auslegungsablauf während der Konzept- oder Entwurfsphase abgeschlossen, werden die auftragsspezifischen Instanzen ausgeleitet und können wie herkömmliche Modelle über das PDM-System verwaltet werden.

5.1.3 Internes Verhalten

Das dem HKO zugrundeliegende parametrische Mastermodell ist möglichst anpassungsfähig zu definieren. Es implementiert das komponentenspezifische Konstruktionswissen. So kann es gemäß den definierten Anforderungen in den Schnittstellen fallabhängig reagieren. Das bedeutet, dass das interne Verhalten ausschließlich durch die Schnittstellen beeinflusst wird. Zur Definition des internen Verhaltens können sämtliche im CAD-System zur Verfügung stehenden Funktionen zur Abbildung der Konstruktionsabsicht genutzt werden (Parametrik, Familientabellen, Analysefeature, Wirkkomplexe, etc.). Das CAD-Modell des HKO trägt somit die mögliche Varianz und insbesondere deren Grenzen, die sicherstellen, dass stets die konstruktionsobjektspezifischen „Gerechtigkeiten" eingehalten werden. Ausführungen dazu erfolgten bereits in Kapitel 4.4. Zum internen Verhalten gehört auch die Integration von Berechnungen bzw. die Kopplung zum Berechnungssystem unter Berücksichtigung der vorgestellten Möglichkeiten aus Kapitel 4.2 und 4.3. HKO müssen dabei erfassen, ob die im Vorfeld definierten Berechnungen Gültigkeit für den aktuellen Belastungszustand aufweisen (z. B. gilt die Berechnung auch für wechselnde Lasten? Wird ein Wälzlager nur den möglichen Belastungsrichtungen ausgesetzt?). Dies gilt auch für andere funktionale Zustände, die ein HKO nicht annehmen darf. Als Beispiel sei ein Getriebemotor genannt, der aufgrund der Ölschmierung nur in einer vorbestimmten Orientierung verbaut werden darf.

Für komplexe Komponenten wird es zielführend sein, lediglich Teilbereiche von besonderem Interesse entsprechend höherwertig aufzubereiten, sodass einzelne Feature oder Featuregruppen mit der höherwertigen Funktionalität auszustatten sind, dies können beispielsweise Fügestellen, Lagerstellen oder Anschlussstellen sein. Auch für Teilbereich wird es möglich sein, eine Kopplung zur entsprechenden (Teil-)Berechnung herzustellen.

Ausgangspunkt beim Einbau eines HKO ist ein definierter innerer Zustand. Die Konstruktionsparameter werden mit Initialwerten vorbelegt (z. B. der Gleitlagerinnendurchmesser: 16 mm; Drehzahl: 0 min^{-1}; Radialkraft: 0 N). Im Baugruppenkontext werden diese Werte mit aktuellen Werten überschrieben und an die Berechnung weitergeleitet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Berechnungen können dabei Dimensionierungs- oder Nachweisrechnungen sein. Für viele höherwertige Konstruktionsobjekte wird es nötig sein, mehrere unterschiedliche Berechnungen auszuführen, sodass eine Gesamtsicherheit definiert werden soll. Dieser wird über die kleinste aller Teilsicherheiten gebildet.

Beispiel Zahnrad WWG: kleinste Sicherheit hinsichtlich Versagens durch Zahnfussbruch oder Grübchenbildung.

Beispiel Bogenzahnkupplung: kleinste Sicherheit hinsichtlich des Versagens der Verzahnung (verschiedene Kriterien) oder der Kegelquerpressverbindung (ebenfalls verschiedene Kriterien).

Die Sicherheit muss dem Konstrukteur über die Dialogschnittstelle stets visualisiert werden, sodass er ganzheitlich und zentral die aktuellen inneren Zustände aller höherwertigen Konstruktionsobjekte einsehen kann.

5.1.4 Schnittstelle zu angrenzenden Komponente

Um im Baugruppenzusammenhang die Übertragung der Abhängigkeiten zwischen den Komponenten zu ermöglichen, werden die Schnittstellen zu angrenzenden Komponenten genutzt. Da sich Baugruppen nicht vollständig aus höherwertigen Konstruktionsobjekten generieren lassen werden, ergeben sich folgende komponentenübergreifende Verknüpfungskonstellationen:

- Abhängigkeiten zwischen HKO und HKO
- Abhängigkeiten zwischen HKO und herkömmlichen Konstruktionskomponenten. Dies sind i. d. R. neu zu gestaltende Komponenten, die dennoch auf Modellvorlagen basieren und Prinziplösungen breithalten können

Beim herkömmlichen Komponenteneinbau muss der Konstrukteur die Abhängigkeiten zunächst selbstständig erkennen und eine Entscheidung treffen, welche Abhängigkeiten sinnvoll zu definieren sind und diese schlussendlich manuell festlegen. Über die Schnittstelle zu anderen Komponenten übertragen die höherwertigen Konstruktionsobjekte Abhängigkeiten automatisch. Daraus folgt zwangsläufig eine gegenseitige Beeinflussung, die zu einem Abhängigkeitsgeflecht führt. Abhängigkeiten können unterschieden werden in:

- geometrische Abhängigkeiten (z. B.: Abmaße, Durchmesser, Anschlussmaße etc.),
- belastungsrelevante Abhängigkeiten (z. B.: Kräfte, deren Angriffspunkte, Momente, Temperaturen, Drehzahl, Materialparameter etc.),
- weitere technische (semantische) Abhängigkeiten (z. B.: Toleranzen, Oberflächenrauheit, Behandlungsverfahren etc.).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Abhängigkeiten beeinflussen sowohl Gestaltmodelle untereinander als auch die Berechnungsmodelle untereinander, vgl. Beispiel Walzwerkgetriebe Abbildung 4-23. Die Beispiele zu den Variantenkonstruktionen haben zeigt, wie die Abhängigkeiten zentral vom Konfigurationssystem verwaltet werden können, indem die Konfigurationsapplikation den komponentenübergreifenden Informationsaustausch übernimmt. In einer Neukonstruktion, die aus einer unbekannten Kombination von Konstruktionskomponenten besteht, ist die zentrale Verwaltung der Abhängigkeiten nicht möglich.

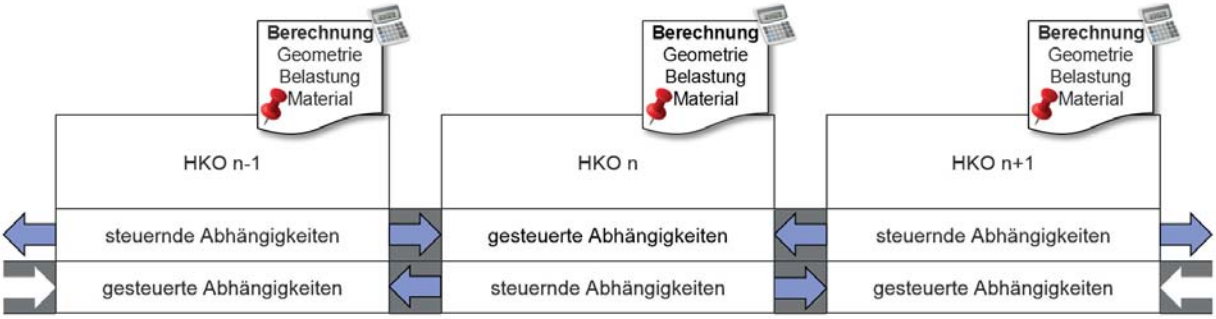


Abbildung 5-3: Komponentenübergreifende Abhängigkeiten

Grundsätzlich können einzelne Abhängigkeiten sowohl steuernd als auch gesteuert wirken. Im konkreten Einbaufall muss diese Zuordnung spezifisch vom Konstrukteur festgelegt werden können. Es wird also erst beim Einbau definiert, ob die Information in die Komponente hinein- oder hinausfließt. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist der Aufnahmedurchmesser des Umlenkrades (Abbildung 3-19). Einerseits könnte das Umlenkrad (welches ggf. ein Vorzugsteil mit vorgegebener Bohrung sein könnte) den Durchmesser der Lagerungskomponente vorgeben, andererseits könnte die Lagerungskomponente den Durchmesser der Aufnahmebohrung vorgeben. Diese Varianz muss bei der Festlegung des inneren Verhaltens eines höherwertigen Konstruktionsobjektes und deren (bidirektionaler) Kopplung zur Berechnung berücksichtigt werden. Darüber hinaus existieren Abhängigkeiten, die nur steuernd oder gesteuert wirken. In der Norm ISO 4379 wird empfohlen, zur Montage der Gleitlagerungsbuchse die Aufnahmebohrung mit der Toleranz H7 auszuführen, um nach dem Einpressen eine Toleranz für den Innendurchmesser der Gleitlagerung von H8 zu erreichen. Die Information den Aufnahmedurchmesser mit der Toleranz H7 ausführen, wird stets steuernd wirken. Ein Beispiel für eine Abhängigkeit, die zweckmäßiger Weise steuernd definiert wird, ist die Drehzahl.

Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Informationsübertragung zwischen zwei Komponenten sind abhängig vom CAD-System. Weitestgehend verallgemeinerte Möglichkeiten sind:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- „direktes“ Referenzieren auf vorhandene Baugruppenkomponenten,
- über eine Zuweisung der Parameter im Gleichungseditor (i. d. R. im übergeordneten Baugruppenmodell),
- teileübergreifende Kopierfunktionen für Geometrie (Punkte, Flächen, Volumen).

Parameter stellen in allen leistungsfähigen CAD-Systemen die grundlegendste Form der Informationsabbildung dar. In allen leistungsfähigen CAD-Systemen besteht (i. d. R.) die Möglichkeit, Parameter komponentenübergreifend zu verknüpfen, um damit einen Informationsaustausch über die Schnittstellen hinweg zu gestalten. Zudem lassen sich mit einem Parameter beliebige Informationen (geometrische, belastungsrelevante, semantische etc.) übertragen. Parameter stellen somit nach heutigem Stand der CAD-Systeme die allgemeingültigste Form dar, Abhängigkeiten abzubilden und zu verknüpfen.

5.1.5 Erzeugung höherwertiger Konstruktionsobjekte

Höherwertige Konstruktionsobjekte können auch als elementare, nicht sinnvoll weiter zu zerlegende Funktionseinheiten verstanden werden und sind grundsätzlich Variantenkonstruktionen wie beispielsweise die Bogenzahnkupplung ZBG. Die zur Aufbereitung notwendigen Arbeitsschritte können daher Abbildung 3-8 (Schritte zur Automatisierung eines Konstruktionsprozesses) entnommen bzw. übertragen werden.

Dem Konstrukteur muss eine Umgebung bereitgestellt werden, die nicht nur die Verwendung der höherwertigen Konstruktionsobjekte erlaubt, sondern auch deren vereinfachte Erzeugung. Über eine benutzerzentrierte Oberfläche muss es dem Konstrukteur ermöglicht werden, ohne vertiefte Programmierkenntnisse herkömmliche Konstruktionskomponenten „höherwertig“ zu machen. Vergleichbar mit dem Umstieg von 2D auf 3D CAD, der ebenfalls zunächst Mehrarbeit hervorgerufen hat, wird auch die Berücksichtigung der funktionalen und belastungsrelevanten Aspekte einmalig Mehrarbeit fordern. Durch die sich in Zukunft einstellenden Vorteile, wird aus der Mehrarbeit jedoch ganzheitlich Nutzen gezogen werden können. Der im Vorfeld einmalig zu leistende Aufwand zur Abbildung der nötigen semantischen Informationen innerhalb der Modelle wird mit der Klassifizierung einer Produktkomponente nach Sachmerkmalen in einem PDM-System vergleichbar sein. Da die höherwertigen Konstruktionsobjekte vom CAD-System verwaltet werden, ist der direkte Abgleich mit den Informationen aus dem PDM-System sichergestellt. Zur Erzeugung der verschiedenen Konstruktionsobjekte sollen folgend einige Bemerkungen getroffen werden.

Normteile (Maschinenelemente und Apparateteile): Diese Gruppe ist durch die existierenden Normen weitestgehend einheitlich beschrieben. Das in den Normen gespeicherte Wissen ist zu digitalisieren, um es in den höherwertigen Konstruktionsobjekten zu hinter-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

legen. Als Berechnungssoftware können direkt branchenspezifische Software bzw. MEBP genutzt werden.

Zukaufteile: Zukaufteile müssen direkt im CAD-System zugänglich gemacht werden. Dies setzt voraus, dass auch die dazugehörigen Berechnungen berücksichtigt werden können. Für diesen Bereich müssen also nicht nur für die Gestaltmodelle, sondern auch für die Berechnungsmodelle weiterführende Standardisierungsvorgänge der neutralen Formate erfolgen. Ferner wäre zu klären, wie der ggf. notwendige Know-How Schutz erzielt werden kann. Ansätze hierzu bietet MEIMANN [Me10].

Wiederholteile, Vorzugsteile: Hier spielen neutrale Formate eine geringere Rolle, denn die innerbetriebliche Softwareumgebung ist bekannt. Vorhandene Berechnungen können direkt mit den Gestaltmodellen gekoppelt werden. Das in den Unternehmen vorhandene, komponentenspezifische Wissen ist dazu lediglich entsprechend aufzubereiten und falls nicht bereits erfolgt, zu digitalisieren.

Neuteile: Wie bereits festgestellt, eignen sich Neuteile im Vergleich zu den bisher genannten Konstruktionskomponenten nur im geringen Maße für die Erstellung höherwertiger Konstruktionsobjekte. Alleinig wiederkehrende Funktionsprinzipien lassen sich berücksichtigen. Beispiel hierfür ist ein „Konzeptmodell Stützstab“ der stets eine Knickanalyse erfordert, wobei verschiedene Querschnitte oder Einspannverhältnisse berücksichtigt werden können. Somit lassen sich Grobmodelle, die durch überschlägige Berechnungen bzw. Dimensionierungsrechnungen abgesichert sind, bereitstellen. Für Neuteile, die aus bekannten Funktionsprinzipien abgeleitet werden, können die im Unternehmen üblichen Berechnungsprogramme herangezogen werden. Insbesondere FE-Analysen werden in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle spielen.

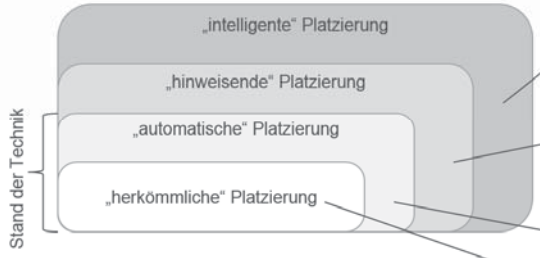
5.2 Höherwertige Konstruktionsobjekte in der Baugruppenmodellierung

Da der Konstrukteur im Moment der Platzierung einer Konstruktionskomponente Klarheit über mögliche Konsequenzen gewinnen muss, basiert der entwickelte Ansatz auf der Erweiterung der Komponentenplatzierungsfunktionen im CAD-System. Das Ereignis der Komponentenplatzierung wird genutzt, um den Konstrukteur bei der Bewertung der Auswirkungen auf den Baugruppenkontext zu unterstützen. Dem Einbau einer Komponente (bzw. dem Austausch, der praktisch einen Einbau impliziert) kommt folglich eine Schlüsselrolle zu. Während beim herkömmlichen Einbauvorgang lediglich die Referenzen zur Platzierung definiert werden, erfordert die Berücksichtigung belastungsrelevanter- und funktionaler-Aspekte weiterführende Methoden. Methoden, die automatisiert ablaufen oder die den Konstrukteur unterstützen, die wechselseitigen Abhängigkeiten festzulegen und ihn bei der Definition notwendiger Konstruktionsparameter interaktiv unterstützen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.2.1 Einbau eines höherwertigen Konstruktionsobjektes

Zum verbesserten Verständnis sollen verschiedene Einbaumöglichkeiten weiter ausgeführt werden. Abbildung 5-4 zeigt eine Übersicht.



Einbaureferenzen	Prüfung auf Eignung	Abhängigkeiten
unterstützend durch vordefinierte Optionen	aktive Unterstützung und Absicherung durch Berechnungen	dialoggesteuerte, richtungsgebundene Kopplung, automatische Nachführung der Abhängigkeiten
unterstützend durch vordefinierte Optionen	Hinweise auf einzuhaltende Restriktionen	manuell
unterstützend durch vordefinierte Optionen	manuell	manuell
manuell	manuell	manuell

Abbildung 5-4: Steigerung der Unterstützung beim Komponenteneinbau

Herkömmliche Platzierung: Die herkömmliche, aus allen CAD-Systemen bekannte, Platzierung von Komponenten basiert auf der manuellen Selektion der Bauteil- bzw. der Baugruppenreferenz (zusammenfallende Achsen oder Koordinatensysteme, orthogonale Ebenen etc.). Das System lässt dabei jegliche sinnvollen, aber auch weniger sinnvollen Definitionen zu. Der Konstrukteur muss manuell jegliche Prüfung auf Eignung der Komponente ausführen.

Automatische Platzierung: Leistungsfähige CAD-Systeme bieten die Möglichkeit, die Platzierungsreferenzen stückweise vorausschauend zu definieren. Es kann z. B. festgelegt werden, dass eine Komponente nur über die im Vorfeld definierten Ebenen eingebaut werden kann. Damit kann u.a. sichergestellt werden, dass Konstrukteure, welche die Komponente nur nutzen und nicht selber erstellt haben, die ursprüngliche Konstruktionsabsicht (wie diese Komponente geeignet zu platzieren ist) zugänglich gemacht bekommen. Beispiele hierfür sind: „Komponentenschnittstelle" in *Creo(PTC)*, „intelligente Verbindungselemente" in *SolidWorks(DassaultSystèmes)*, intelligente Verbindungselemente oder „iMates" *Inventor(Autodesk)*. Damit erfolgt die Platzierung strukturierter. Darüber hinaus können regelbasierte Suchvorgänge definiert werden, die z. B. über Vergleiche von Bezeichnungen nach geeigneten Einbauorten suchen. Der Einbau wird hierdurch bereits unterstützt und manuelle Tätigkeiten reduziert. Es ist bisher nicht möglich, auch Abhängigkeiten in Form von Parametern, Geometrie oder semantischen Informationen an andere Komponenten weiterzugeben oder zur funktionalen Analyse automatisch eine Berechnung zu initiieren. Neben der Zuordnung von Platzierungsreferenzen erfolgt demnach keine weitere Systemunterstützung, sodass auch hier der Konstrukteur manuell die Eignung prüfen muss.

Hinweisende Platzierung: Die „hinweisende" Platzierung kann als eine weitere Ausbaustufe verstanden werden. Neben den Vorteilen der „automatischen Platzierung" erfolgt hier eine Unterstützung des Systems, indem der Konstrukteur auf einzuhaltende Restriktionen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

(Abhängigkeiten) aktiv hingewiesen wird. Er bekommt vom System Informationen angezeigt, was er zu berücksichtigen hat, wenn er diese Komponente verwenden möchte. Für das Beispiel der Gleitlagerung kann das der aktiv ausgelöste Hinweis sein, dass sich günstige Einbauverhältnisse ergeben, wenn das Gleitlager in eine Bohrung mit der Toleranzklasse H7 eingebaut wird. Bei einem Wellendichtring beispielsweise ist die Welle „drallfrei geschliffen“ auszuführen. In dieser Stufe erfolgt noch keine Übertragung der Abhängigkeiten von/in andere Komponenten.

Intelligente Platzierung: Die höchste Stufe der Platzierungshierarchie soll als „intelligente Platzierung“ bezeichnet werden. Das ist die Stufe, die von den höherwertigen Konstruktionsobjekten verwendet wird. Im Vergleich zur vorherigen Stufe werden dem Konstrukteur nun auch Verknüpfungsmöglichkeiten angeboten, sodass die Abhängigkeiten (Kapitel 5.1.4) richtungsorientiert zugewiesen und vom System übertragen werden. Sind die Abhängigkeiten hergestellt und folgen Veränderungen an den ursprünglichen Parametern, können diese automatisch übernommen werden. Den verknüpften Berechnungen können so aktuelle Werte aus dem Baugruppenkontext zugeführt werden. Somit entsteht eine „intelligente“ Autovervollständigungsfunktion für Baugruppen, die über die Platzierungsoptionen hinaus funktionale Aspekte berücksichtigt.

5.2.2 Einbaureihenfolge

Um die gegenseitige Zuordnung der Abhängigkeiten zu gewährleisten, muss vorausgesetzt werden, dass die höherwertigen Konstruktionsobjekte über identifizierende Merkmale verfügen und diese vom System erkannt werden. Diese Merkmale können z. B. über die Attributierung von Bezugsreferenzen, Geometrie oder Parametern erzeugt werden. Zur Integration dieser semantischen Informationen bietet sich die Featuretechnologie an, die es zulässt, z. B. aus einer Zylinderfläche (geometrisch betrachtet) eine semantisch interpretierbare „Aufnahmebohrung für ein Lager“ oder „Lagerfläche“ zu erzeugen. Beim Einbau können dann entsprechende Suchfunktionen genutzt werden.

Während des Einbaus der „neuen“ Komponente können zunächst lediglich Abhängigkeiten zu bereits eingebauten Komponenten definiert werden (Einhaltung der Eltern-Kind Beziehung). In der „neuen“ Komponente können aber durchaus schon Festlegungen für eine direkt oder später folgende Komponente getroffen werden. Damit wird vorausgesetzt, dass vom System geprüft wird, ob die Mindestanforderungen, welche Informationen ein höherwertiges Konstruktionsobjekt erhält und weitergegeben werden müssen, erfüllt sind. Es ergibt sich so insgesamt eine striktere Strukturierung der Baugruppe, die zur Absicherung des notwendigen komponentenübergreifenden Informationsaustausches beiträgt.

Beispiel Kettentrieb aus Kapitel 3.5: Es kann vorausgesetzt werden, dass die Konstruktion des Kettentriebes nicht mit dem Einbau des Gleitlagers oder des Wälzlagers begonnen wird. Angenommen alle Kettenräder und das Umlenkrad sind bereits in der Baugruppe

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

enthalten, dann kann die Gleitlagerung zwar platziert werden, aber zur Berechnung ist u.a. der Werkstoff des noch nicht eingebauten Bolzens erforderlich. Daraus folgt, dass das System bis zur Berechnung der Gleitlagerung auf den Einbau des Bolzens „warten“ muss oder der Bolzenwerkstoff bereits im Vorfeld festgelegt wird, um im Nachhinein (wenn der Bolzen eingebaut ist) zu prüfen, ob der Werkstoff der zuvor gewählten Eingabe entspricht.

5.2.3 Austausch eines höherwertigen Konstruktionsobjektes

Das typische iterative Springen zwischen den Lösungen in der Entwurfsphase bedingt, dass bereits eingebaute Komponenten wieder ausgebaut werden müssen und an deren Stelle alternative Komponenten platziert werden. Daraus folgt, dass die beim Einbau der „alten“ Komponente definierten Abhängigkeiten auf die „neue“ Komponente zu übertragen sind. Da dem System die Abhängigkeiten bekannt sind, wird es möglich, dem Konstrukteur die verlorenen Abhängigkeiten anzuzeigen und ihn bei der Übertragung auf die neue Komponente zu unterstützen. Im Beispiel des Kettentriebes, gilt dies beispielsweise für die Lagerkraft und die Drehzahl, die auf die Wälzlagerung zu übertragen sind.

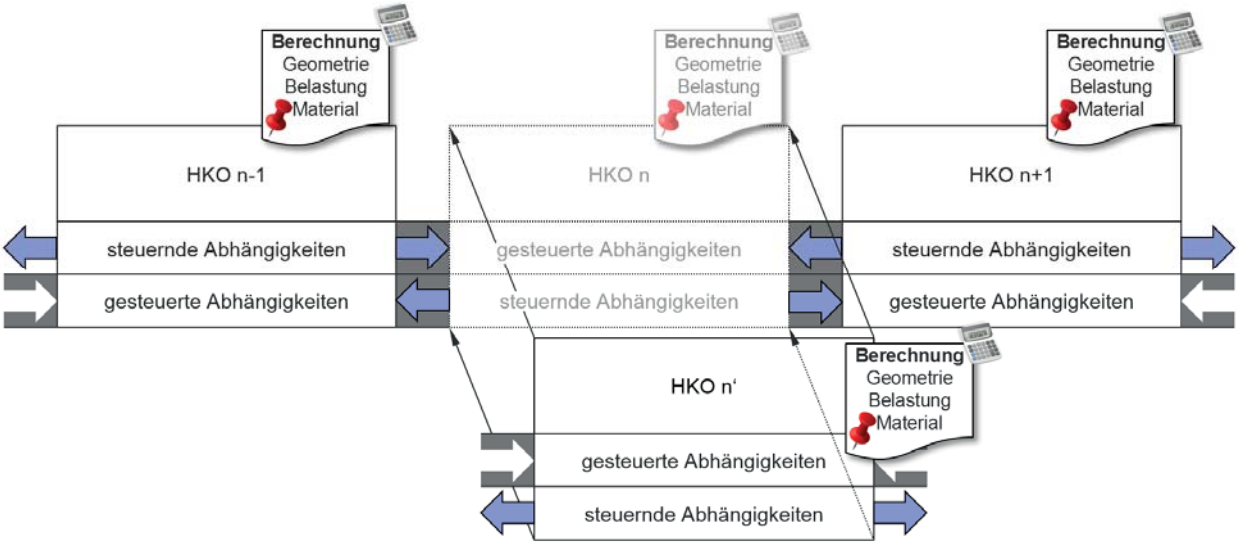


Abbildung 5-5: Austausch eines höherwertigen Konstruktionsobjektes

5.3 Exemplarische Umsetzung

An den in Kapitel 3 vorgestellten Beispielen wurden die entwickelten Methoden zum Aufbau höherwertiger Konstruktionsobjekte exemplarisch validiert. Die verschiedenen Aspekte der Verknüpfung von Gestalt- und Berechnungsmodell konnten ebenfalls im Zusammenhang dieser Projekte erprobt werden. Auf eine projektbezogene Beschreibung wird verzichtet. Die repräsentative Vorstellung der Methodenimplementierung erfolgt an dem in Kapitel 3.5 veranschaulichten Beispiel des Kettentriebes. Als höherwertige Konstruktionsobjekte werden die Gleitlagerung und die Wälzlagerung aufbereitet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.1 Festlegung der Systemumgebung

Da die Umsetzung nicht in allen erdenklichen Systemkonstellationen durchgeführt werden kann, muss eine repräsentative Auswahl erfolgen. Sowohl CAD-Systeme als auch Berechnungssoftware bieten teils stark unterschiedliche Funktionen an, in welcher Form Informationen abgebildet und teileübergreifend übertragen werden können. Eine weitestgehend generelle und allgemeingültige Vorgehensweise kann derzeit nur auf Basis von Parametern erfolgen. Da der Blick bei der Entwicklung des Konzeptes stets auch auf andere Systemkonstellationen gerichtet bleiben soll, werden Parameter zur Abbildung der Semantik eingesetzt. Für ein derartiges Konzept spricht zudem:

- Über Steuerparameter lässt sich das gesamte innere Verhalten der HKO beeinflussen.
- Gestaltparameter können direkt entsprechenden Berechnungsparametern zugeordnet werden, vgl. Kapitel 4.
- Da in der Schnittstelle zu anderen Konstruktionsobjekten identische geometrische und physikalische Größen verknüpft werden, kann das System „vorauswählen“, welche Parameter miteinander kompatibel sind. Das System kann vorauswählen, dass z. B. Parameter vom Typ „Kraft“ miteinander verknüpft werden.
- Die Parameter können über den Typ, Einheit etc. einfach miteinander verglichen werden, um so eine falsche Zuordnung zu vermeiden. Beispiel: Längengröße mit Kraftgröße wäre eine ungültige Zuordnung.
- Einfache Abfrage und Anzeige von Parameterwerten im Benutzerdialog.

Gegen dieses Parameterkonzept spricht:

- Kopieren komplexerer Geometrie kann mit spezifischen Funktionen effizienter erfolgen.
- Komplexere Komponenten werden die Berücksichtigung von sehr vielen Parametern erfordern, wodurch sich die Selektion schwierig gestaltet.

CAD-System: Die Erzeugung und Verwaltung der höherwertigen Konstruktionsobjekte soll mit dem CAD-System *Creo 2.0 (PTC)* erfolgen. Als leistungsfähiges CAD-System stellt es einen repräsentativen Funktionsumfang bereit. *Creo 2.0 (PTC)* bietet gleich mehrere API’s an, die mit verschiedenen Programmiersprachen genutzt werden können.

Berechnungssystem: Zur Verwaltung des Berechnungsmodells (die Gleit- und Wälzlagerungsberechnung) bietet sich das MEBP *Kisssoft 13 (Kisssoft)* an, da es als einziges MEBP über ein API verfügt. Die Vorteile sind in Kapitel 4.3.3 dargestellt worden und sollen hier genutzt werden. Für andere Anwendungsfälle, in denen ein MEBP ohne API genutzt werden soll, muss z. B. auf die in Kapitel 4.2.3.3 beschriebene Kopplung über Ein- und Ausga-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

bedateien mit entsprechenden Nachteilen ausgewichen werden. Die Übertragbarkeit ist jedoch auch hier gegeben. Bei der Nutzung einer Tabellenkalkulation oder einer Mathematiksoftware wären die nötigen Berechnungsvorschriften für die Wälz- und Gleitlagerung mit dazugehörigen Tabellen und Diagrammen zunächst bereitzustellen.

Programmiersprache: Zur Auswahl stehen objektorientierte Programmiersprachen wie VB.NET, Java oder C++. Da auch die API von *Kisssoft(Kisssoft)* über VB.NET programmiert werden kann, wird VB.NET als Programmiersprache zur Erstellung der Applikation genutzt. Ausführungen zur API-Programmierung erfolgten bereits in Kapitel 4.1.2.

5.3.2 Konzeption

Da die angebotene Funktionalität des CAD-Systems *Creo 2.0 (PTC)* nicht ausreicht, um eine geeignete Umgebung für die HKO bereitzustellen, sind einige systemspezifische Anpassungen vorzunehmen, die im Folgenden erläutert werden. Um die entsprechende Unterstützung bei der Verknüpfung von Abhängigkeiten bereitzustellen, ist eine Hilfsapplikation entwickelt worden. Es wird keinerlei spezifisches Konstruktionswissen in der Applikation verankert und ist daher nicht mit einem Konfigurationssystem zu verwechseln. Durch den Einsatz dieser Applikation wird es möglich, dem Konstrukteur die bei der Definition der HKO in den Komponenten gespeicherten Informationen (internes Verhalten) während des Einbaus und in aufbereiteter Form anzubieten. Sie übernimmt dabei folgende Aufgaben:

- Bereitstellung der Möglichkeit auf Konstruktionsereignisse zu reagieren (hier: Komponenteneinbau, oder Komponentenaustausch, Änderung der Parameter)
- Bereitstellung des Komponentenpaares, für das Abhängigkeiten definiert werden soll
- Bereitstellung von Verknüpfungs- und Eingabedialogen
- Anzeige der Steuerparameter, die eine Komponente nach außen hin freigibt
- Hilfestellung bei der Zuordnung von Parametern
- Speichern der Zuordnung im Baugruppenmodell bzw. im Gleichungseditor
- Regenerierung auslösen

Abbildung 5-6 stellt die Systemunterstützung zur Verdeutlichung schematisch dar.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

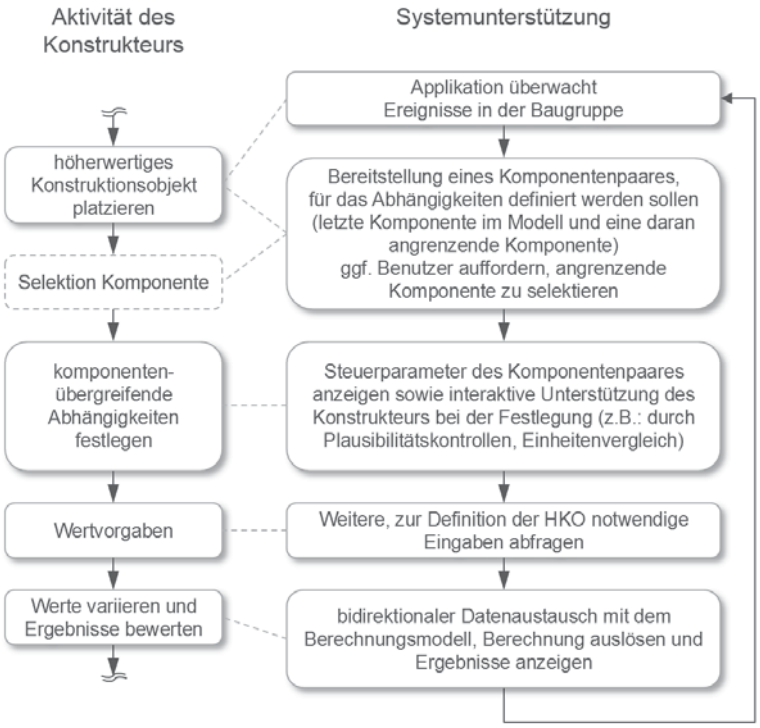


Abbildung 5-6: Systemunterstützung während des Einbaus eines HKO

Verknüpfung von Gestalt- und Berechnungsmodell: In den vorangegangen Kapiteln erfolgten bereits ausführliche Bemerkungen zu Möglichkeiten der Kopplung von Gestalt- und Berechnungsmodell. Da die *Kisssoft(Kisssoft)* API genutzt wird, ist es nicht erforderlich, Ein- und Ausgabedateien zu verarbeiten. Dennoch muss der Zusammenhang zwischen Geometrie- und Berechnungsparameter der höherwertigen Konstruktionsobjekte hergestellt werden. Dazu wird zu jedem höherwertigen Konstruktionsobjekt eine XML-Datei erzeugt, in der die Parameterzuordnung festgelegt ist. Während der Laufzeit wird die Zuordnung ausgelesen, sodass der nötige Informationsaustausch zwischen dem Gestalt- und dem Berechnungsmodell erfolgen kann. Der Aufbau ist bidirektional gestaltet, sodass sowohl *Creo*- als auch *Kisssoft*-Parameter geändert werden können. Abbildung 5-7 zeigt die Parameterzuordnung. In beiden Modellen (Gestalt- und Berechnung) lassen sich Breite, Durchmesser, Radialkraft, Spiel (bei 20°C), Lagerwerkstoff der Welle und der Lagerschale variieren.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

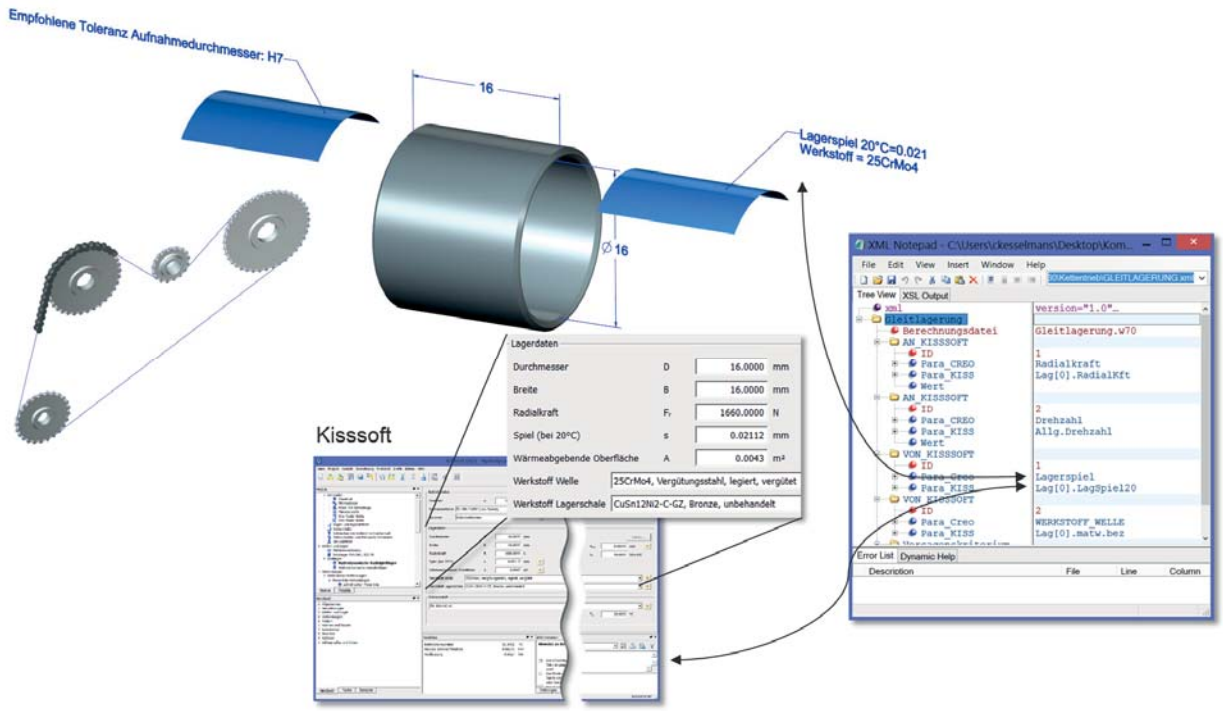


Abbildung 5-7: Parameterzuordnung am Beispiel der Gleitlagerung

5.3.3 Konzeptumsetzung

Komponenteneinbau: Nach dem Öffnen des Einbaudialoges sucht das System nach der Platzierungsstelle. Identifizierendes Merkmal ist hierbei ein Koordinatensystem, das in der Bezeichnung die Zeichenfolge „lager“ enthält. Existieren mehreren Möglichkeiten muss der Nutzer aus der Auswahl manuell selektieren. Die Applikation erkennt den Einbau der HKO und bietet dem Konstrukteur die Verknüpfungsmöglichkeiten an (Abbildung 5-8). Mit Hilfe der integrierten Unterstützungsfunktionen (z. B. Anzeige des empfohlenen Einbaudurchmessers für die Aufnahmebohrung) werden die Abhängigkeiten (Breite der Gleitlagerung entspricht der Breite des Umlenkrades, resultierende Kraft des Umlenkrades entspricht der Radiallagerkraft) zwischen dem Umlenkrad und der Gleitlagerung vorgeschlagen und können festgelegt werden. Die Festlegung erfolgt interaktiv durch Verwendung der Maus. Stehen in einem Modell nicht genügend Parameter zur Verfügung, können interaktiv neue erzeugt werden. So wird die Informationsübertragung zwischen höherwertigen Konstruktionsobjekten und herkömmlichen Komponenten sichergestellt. Nachdem der Verknüpfungsdialog abgeschlossen ist, werden die bekannten Größen an das Berechnungsmodell übergeben und automatisch *Kisssoft(Kisssoft)* gestartet. Das System macht den Konstrukteur auf fehlende Parameter aufmerksam (z. B. Bolzenwerkstoff festlegen) wobei direkt der Eingabedialog von *Kisssoft(Kisssoft)* genutzt werden kann. Das Lagerspiel zwischen Gleitlagerung und Bolzen kann über die Vorauslegungsfunktion von *Kisssoft(Kisssoft)* ebenfalls ermittelt werden. Nach durchgeführter Berechnung wird die Baugruppe aktualisiert. Das bedeutet, auch die Abhängigkeiten für den Bolzen liegen somit bereits im Baugruppenmo-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

dell bereit und können bei der folgenden Bolzengestaltung berücksichtigt werden. Nun kann der Konstrukteur im Gestalt- und Berechnungsmodell weitere Parameteranpassungen vornehmen, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis vorliegt. Wird beispielsweise der Durchmesser in der Kisssoft-Berechnung variiert (innerer Durchmesser der Gleitlagerung), ändert sich gemäß des inneren Verhaltens des höherwertigen Konstruktionsobjektes und der Verknüpfungen in der Schnittstelle zur angrenzenden Komponente auch der Aufnahmedurchmesser zum Umlenkrad. Wobei vom Umlenkrad der größtmögliche Durchmesser vorgegeben wird. Weiterhin wird die erreichte Sicherheit (als Quotient der vorhandenen und zulässigen Schmierfilmdicke, aus *Kisssoft(Kisssoft)* ermittelt) direkt im CAD-System über die Dialogschnittstelle angezeigt.

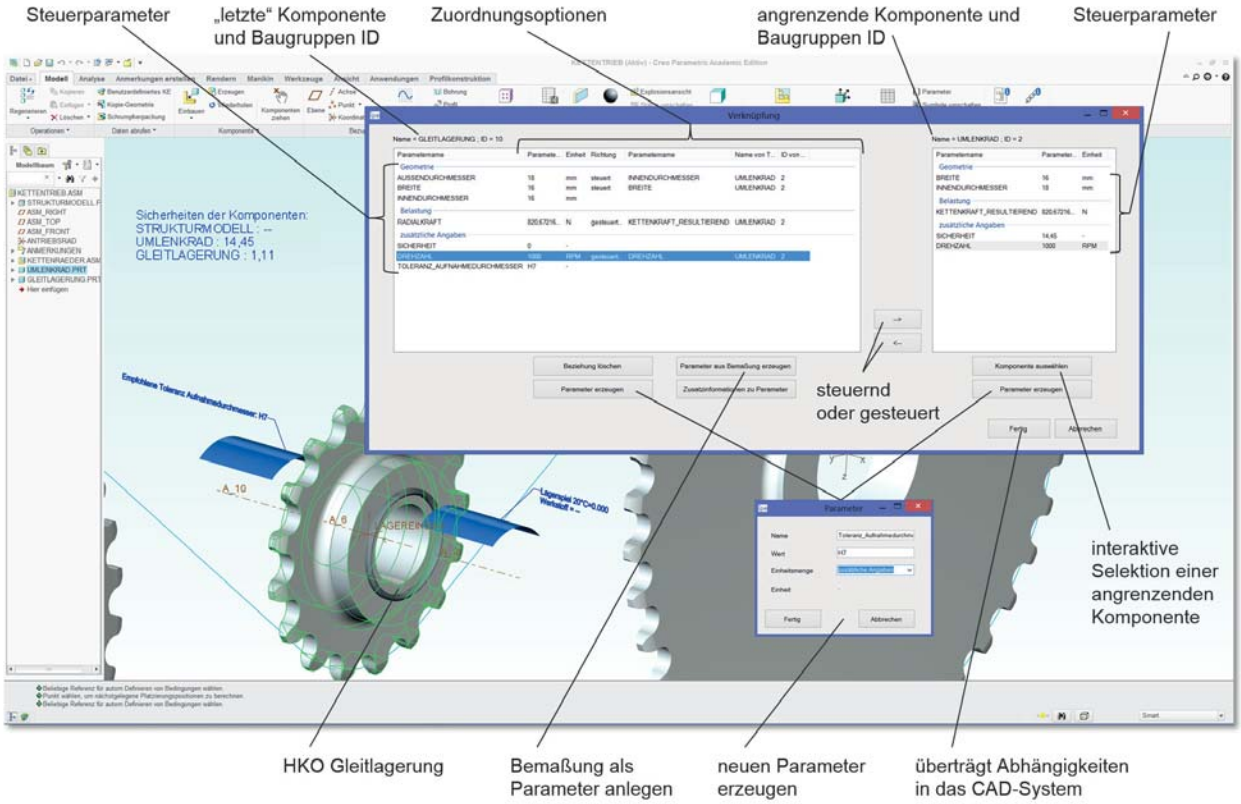


Abbildung 5-8: Unterstützung durch HKO bei der Verknüpfung von Abhängigkeiten

Die Vorgehensweise zur Bolzengestaltung kann aus den beschriebenen Aspekten abgeleitet werden. Von relevanter Bedeutung ist das Nachführen von Abhängigkeiten.

Nachführen von Abhängigkeiten: Der Konstrukteur ändert nun die Position des Umlenkrades (im Strukturmodell), wodurch sich die Belastungssituation ändert (Abbildung 3-17). Durch die Verknüpfung der Abhängigkeiten zwischen Strukturmodell (in dem ebenfalls die geometrische Berechnung der resultierenden Kraft erfolgt), dem Umlenkrad und der Gleitlagerung erkennt das System, dass in der Schnittstelle der Gleitlagerung eine Änderung der Radialkraft erfolgte und löst die Neuberechnung der Gleitlagerung aus. Über die direkt im CAD-System integrierte Benutzerschnittstelle wird der Konstrukteur auf die nicht mehr belastungsgerechte Situation hingewiesen. Er könnte nun Anpassungen an der Gleitlage-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

rung vornehmen oder, wie es das Beispiel vorsieht, eine Wälzlagerung hinsichtlich Eignung zu prüfen.

Austauschvorgang: Die Gleitlagerung wird durch den Konstrukteur über die CAD-Funktionalität gegen das höherwertige Konstruktionsobjekt „Wälzlagerung“ ausgetauscht. Die Abhängigkeiten der Gleitlagerung gehen im CAD-Modell zunächst verloren. Daher wird die Historie der Abhängigkeiten über eine weitere XML-Datei von der Applikation mitgeschrieben. Auf die „alten“ Abhängigkeiten, die von der Gleitlagerung aus steuernd oder gesteuert wirkten, kann somit zugegriffen werden. Der Konstrukteur bekommt diese in einem neuen Dialog angeboten, sodass er die Übertragung einleiten kann. Im gewählten Beispiel gemäß Abbildung 5-9 wurde beispielsweise erkannt, dass die Drehzahl auf die Gleitlagerung steuernd wirkte. Über eine Neuzuweisung kann die Drehzahl nun direkt auf die Wälzlagerung übertragen werden.

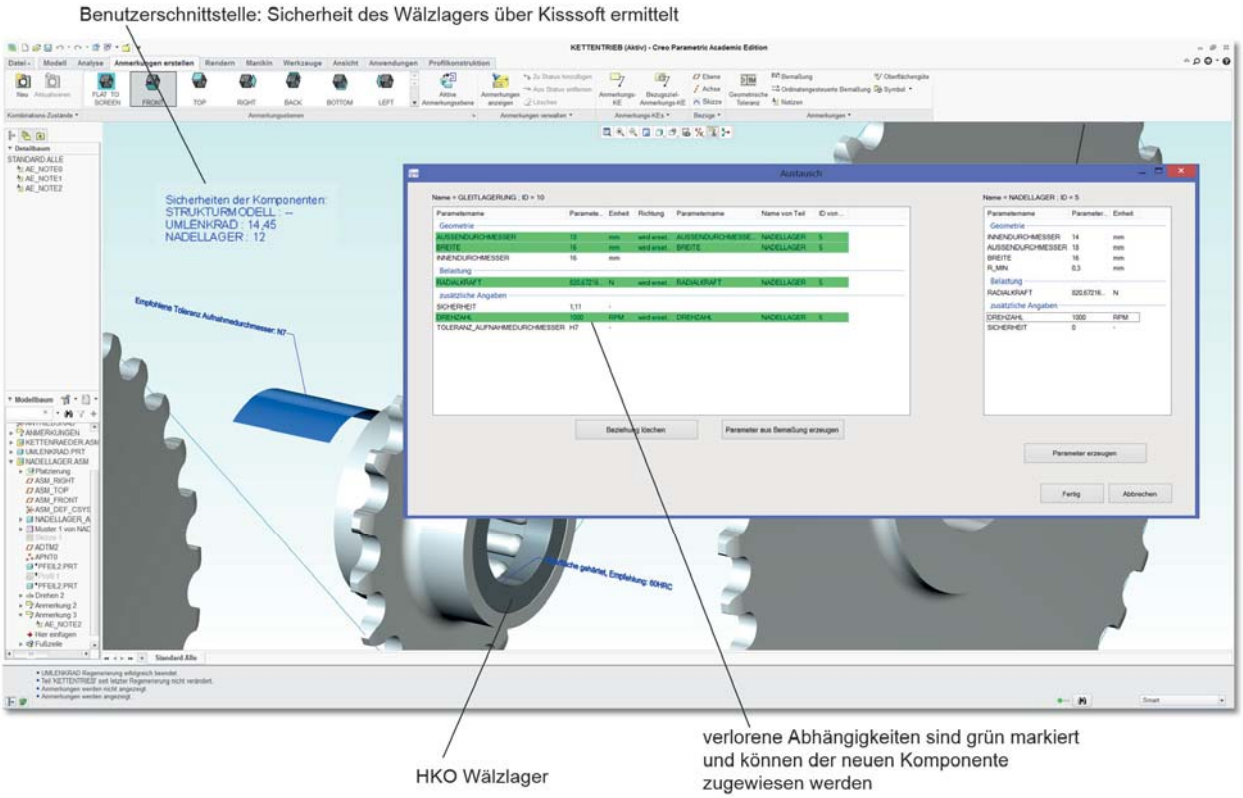


Abbildung 5-9: Unterstützung durch HKO beim Ersetzen von Abhängigkeiten

Ist der Austauschvorgang abgeschlossen, können die verschiedenen, in einer Familientabelle hinterlegten Lagergrößen (in *Creo 2.0 (PTC)* und in *Kisssoft(Kisssoft)*) beliebig variiert werden. Die Wälzlagerungsberechnung wird mit den entsprechenden Werten ausgeführt und die vorhandene Sicherheit (hier der aus *Kisssoft(Kisssoft)* ermittelte Quotient von geforderter Lebensdauer und errechneter Lebensdauer) über den Benutzerdialog im CAD-System angezeigt. Die Applikation ist so aufbereitet, dass auch im Nachhinein zwischen beliebigen Teilen Abhängigkeiten definiert werden können. Ein Video, das die gesamte

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Vorgehensweise anschaulich darstellt, befindet sich unter folgender Internetadresse: https://www.uni-due.de/cae/kbe.shtml#hko

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Inhalte und Erkenntnisse der Arbeit basieren auf einer Analyse praxisbezogener repräsentativer Konstruktionsprozesse, denen unterschiedliche Randbedingungen zu Grunde lagen. Die Analyse hat gezeigt, dass insbesondere die aktive methodische Softwareunterstützung beim Vergleich von Lösungsalternativen im Rahmen von Anpassungs- und Neukonstruktionen noch an ihren Anfängen steht. Auch wenn standardisierte Komponenten als Funktionsträger zur Lösung eines Teilproblems herangezogen werden sollen, erfolgt keine bedarfsgerechte Bereitgestellung der notwendigen spezifischen Informationen. Der Konstrukteur muss die Eignung der Komponente im Baugruppenzusammenhang hinsichtlich funktionaler und belastungsrelevanter Bedingungen manuell überprüfen. Um diesem Missstand entgegenzuwirken, wurden im Rahmen der Analyse Verbesserungspotentiale identifiziert und daraus grundlegende Anforderungen an weiterführenden Methoden zur Optimierung CAD-basierter Konstruktionsprozesse abgeleitet. Somit steht eine breit gefächerte Grundlage bereit, die methodische Aspekte aus praktisch orientierter Prozesssicht berücksichtigt.

Die Arbeit hat umfassend nachgewiesen, dass die Verknüpfungsproblematiken von Gestalt- und Berechnungsmodellen in Variantenkonstruktionen weitestgehend über die informationstechnischen Möglichkeiten gelöst werden können, auch wenn hierzu teils umfangreiche Systemanpassungen notwendig sind. Als weitere elementare Erkenntnis der Arbeit ist die Feststellung hervorzuheben, dass auch innerhalb von Anpassungs- und Neukonstruktionen Teilprozesse grundsätzlich automatisiert werden können. Berechnungen werden auch in Zukunft ihre wesentliche Rolle als Bewertungsverfahren im Konstruktionsprozess beibehalten. Daher ist es von hoher Bedeutung, Berechnungsabläufe geeignet in die gestalterischen Tätigkeiten des Konstruktionsprozesses einzubinden. Aus dieser Arbeit resultiert eine Zusammenstellung der Möglichkeiten, etablierte analytische Berechnungssoftware in den CAD-Prozess zu integrieren. Vorhandene Schwachstellen der eingesetzten Softwaresysteme bzw. -typen konnten aufgedeckt und im Kontext der Beispiele bewertet werden. Hieraus wurden Ansatzpunkte für weiterführende Betrachtungen und Verbesserungen abgeleitet. Im Vergleich zu ähnlichen Arbeiten, die Aspekte der Verknüpfung von Gestaltung- und Berechnung tangieren, wurden Berechnungen verstärkt vor dem Hintergrund der Komponentenwechselwirkungen betrachtet. Die Arbeit liefert folglich eine erweiterte Grundlage für die zu überwindende Kopplungsproblematik zwischen Gestalt- und Berechnungsmodellen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Sowohl aus Prozesssicht als auch aus informationstechnischer Sicht konnten im Verlauf der Arbeit Anforderungen gesammelt werden, die in die Entwicklung des neuartigen Ansatzes der höherwertigen Konstruktionsobjekte eingeflossen sind. Höherwertige Konstruktionsobjekte wurden dabei zunächst allgemeingültig entwickelt. Neben der Abbildung des inneren Verhaltens und der Definition der notwendigen Schnittstellen ist die Kopplung zum Berechnungsmodell ein elementares Merkmal eines höherwertigen Konstruktionsobjektes. Anforderungsspezifisch können aus dem konzeptionellen Ansatz konkrete höherwertige Konstruktionsobjekte abgeleitet werden. Die Verifizierung des Ansatzes der höherwertigen Konstruktionsobjekte erfolgte über verschiedene Beispiele. Die Charakteristik wurde an den höherwertigen Konstruktionsobjekten „Gleitlagerung“ und „Wälzlagerung“ anschaulich dargestellt. Da beide Lagerungsarten repräsentative Berechnungen voraussetzen, können sie stellvertretend für weitere Konstruktionskomponenten aufgefasst werden. Der praktische Verwendungsnachweis der höherwertigen Konstruktionsobjekte erfolgte durch die Nachbildung eines typischen Auslegungsablaufs innerhalb der geschaffenen Softwareumgebung.

Um der Zielsetzung der Wirtschaftlichkeits- und Qualitätssteigerung in allen Bereichen der Produktentstehung entgegen zu kommen, werden in Zukunft mehr denn je Standardisierungspotentiale ausgenutzt werden müssen. Auch in Neu- oder Anpassungskonstruktion wird somit verstärkt auf standardisierte Konstruktionskomponenten zurückgegriffen werden. Dies setzt voraus, dass die bestehenden Netzwerkstrukturen zwischen Zulieferer und Abnehmer weiter ausgebaut werden und die durchgängige Informationsbereitstellung auch über Unternehmensgrenzen hinweg sichergestellt wird. In Zukunft ist daher mit einem wachsenden Potential für höherwertige Konstruktionsobjekte zu rechnen. Für eine detaillierte Nutzwertanalyse der höherwertigen Konstruktionsobjekte fehlen bislang Anwendungsfälle im industriellen Maßstab.

Der Transfer der vorgestellten Arbeitsergebnisse in die industrielle Praxis wird einheitliche Methoden und somit Normierungsvorgänge voraussetzen. Nur so werden sich die Ansätze in die heute noch heterogenen Systemlandschaften der Unternehmen eingliedern können. Insbesondere im Bereich der Austauschformate müssen die Aktivitäten forciert werden, um die Konstruktionsabsicht der einzelnen Konstruktionskomponenten abzubilden. Das Datenformat JT (Jupiter Tesselation) etabliert sich aufgrund der erweiterten Möglichkeiten der Produktdatenbeschreibung aktuell verstärkt. Es existieren bereits Ansätze, die Featureinformationen der nativen Daten durch die Kopplung von JT mit XML-Technologien abzubilden, um dem Informationsverlust entgegenzuwirken [EiHa10]. Auch im Bereich der STEP-Entwicklungen kann mit vergleichbaren Aktivitäten gerechnet werden. Die neutralen Datenformate werden erweiterte Möglichkeiten breitstellen, sodass damit zu rechnen ist, dass die notwendigen einheitlichen Formate für höherwertige Konstruktionsobjekte bald vorliegen. Auch die Softwarehersteller beeinflussen die Verfüg-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

barkeit möglicher Systemunterstützung für den Konstrukteur. Sie müssen in Zukunft stärker aufeinander zugehen und die Systeme stetig verbessert aufeinander abstimmen. Nur so kann insgesamt das notwendige homogene Softwareumfeld bereitgestellt werden.

Die Automatisierung von Konstruktionsprozessen wird vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeit oftmals kontrovers gesehen. Möglicherweise wird die eine oder andere Bemerkung dieser Arbeit daher auch kritische Stellungnahmen auslösen. Die Arbeit verdeutlicht jedoch an vielen Stellen die Komplexität des Konstruktionsprozesses und unterstreicht somit im Grunde auch die Unentbehrlichkeit der Intelligenz des Konstrukteurs, der auch auf lange Sicht nicht ersetzt werden kann. Automatisierte Mechanismen werden ihn verstärkt in Teilbereichen unterstützen können, die ganzheitliche Sichtweise auf eine Konstruktionsaufgabe aber wird ihm zugeteilt bleiben. Dazu muss ein intuitiveres Arbeiten an virtuellen Produktmodellen ermöglicht werden. Funktionale- und belastungsrelevante Kriterien müssen in Zukunft vom System so selbstverständlich geprüft und ausgewertet werden, wie es heute selbstverständlich ist, dass nach dem Hinzufügen einer Komponente die Masseanalyse der Gesamtbaugruppe erfolgt.

An verschiedenen Stellen wurden signifikante Problemfelder im Konstruktionsumfeld identifiziert, deren Lösung nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit war. Ideen und Ansatzpunkte konnten dennoch abgeleitet und vorgestellt werden. Mögen diese aufgegriffen, abgewandelt, übertragen oder weiter fokussiert werden und sich somit zum Ausgangspunkt weiterführender Arbeiten oder Forschungsaktivitäten entwickeln.

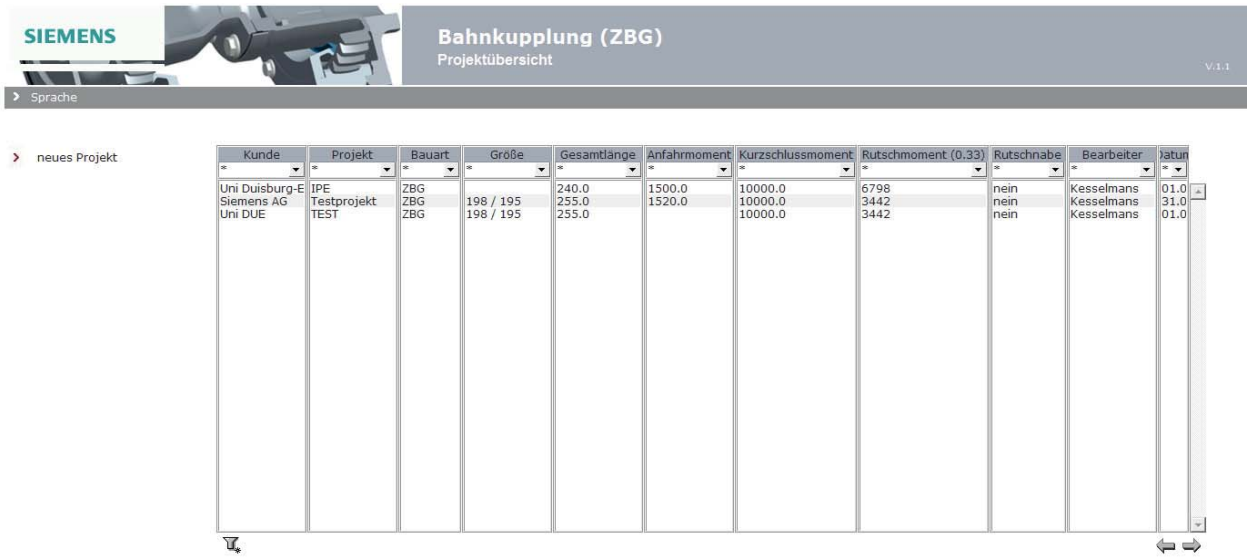
Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang

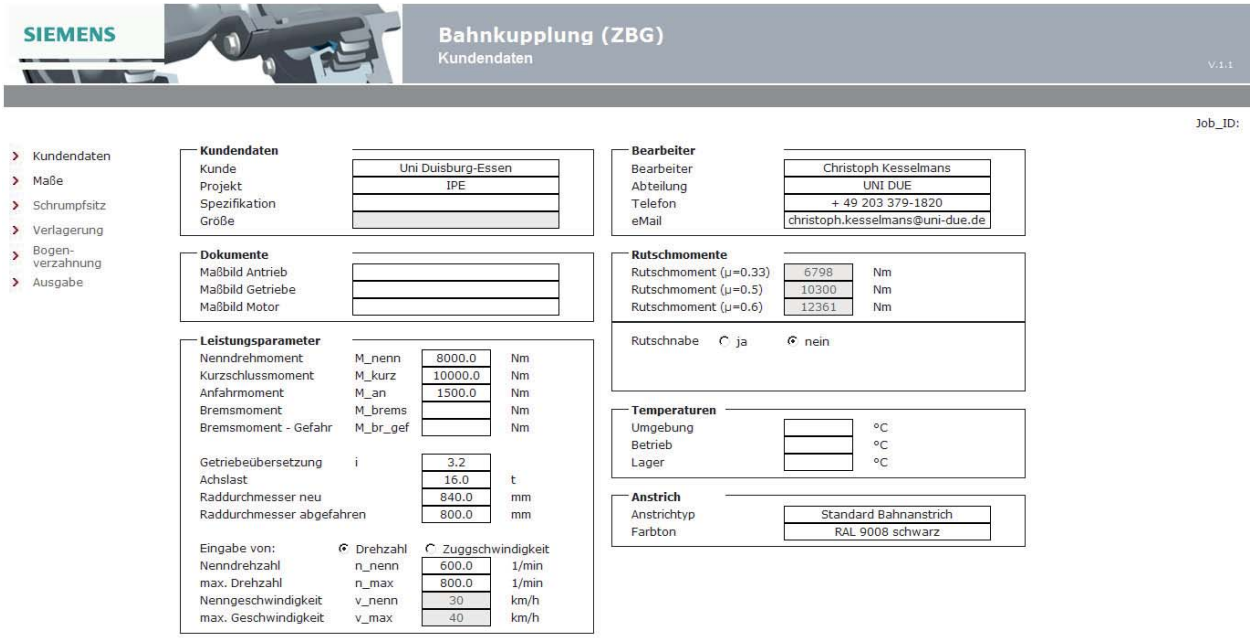
Die folgenden Abbildungen enthalten die Dialogelemente des Konfigurationssystems der Balligzahnkupplung ZBG. Die Werteingaben sind zufallsbedingt festgelegt worden und daher exemplarisch zu verstehen.

Projektübersicht



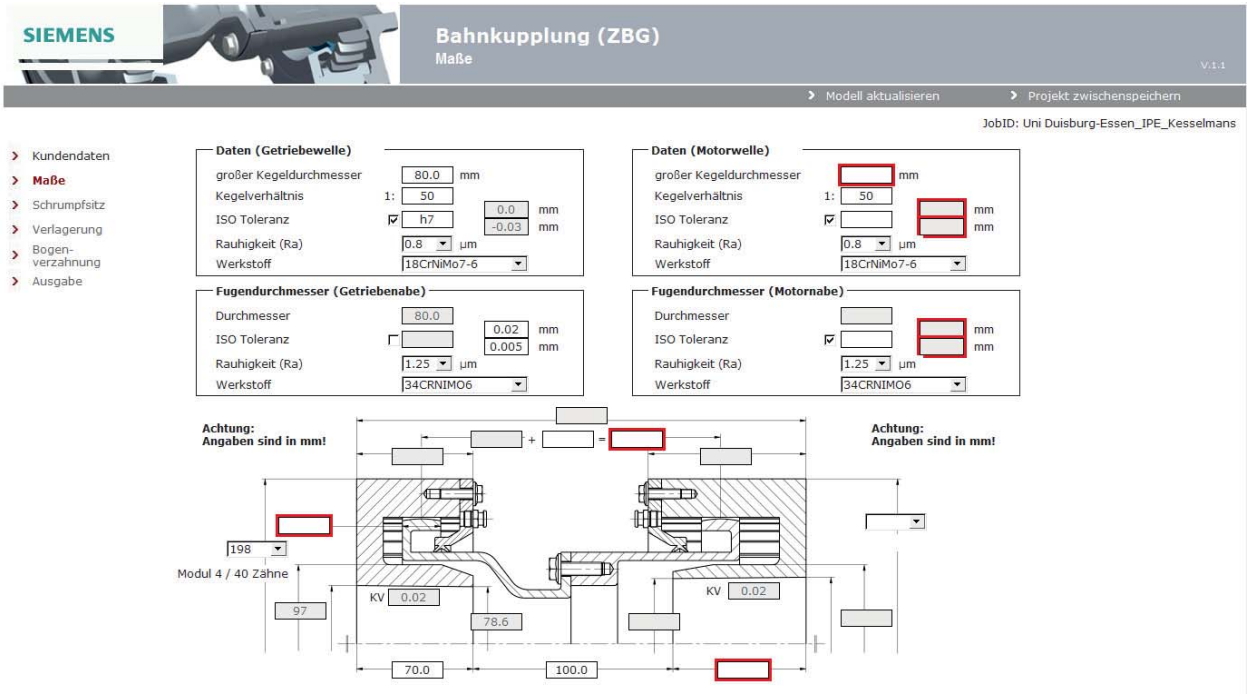
Kunde	Projekt	Bauart	Größe	Gesamtlänge	Anfahrmoment	Kurzschlussmoment	Rutschmoment (0.33)	Rutschnabe	Bearbeiter	Datum
Uni Duisburg-E	IPE	ZBG		240.0	1500.0	10000.0	6798	nein	Kesselmans	01.0
Siemens AG	Testprojekt	ZBG	198 / 195	255.0	1520.0	10000.0	3442	nein	Kesselmans	31.0
Uni DUE	TEST	ZBG	198 / 195	255.0		10000.0	3442	nein	Kesselmans	01.0

Eingabedialog zur Erfassung der Kundendaten

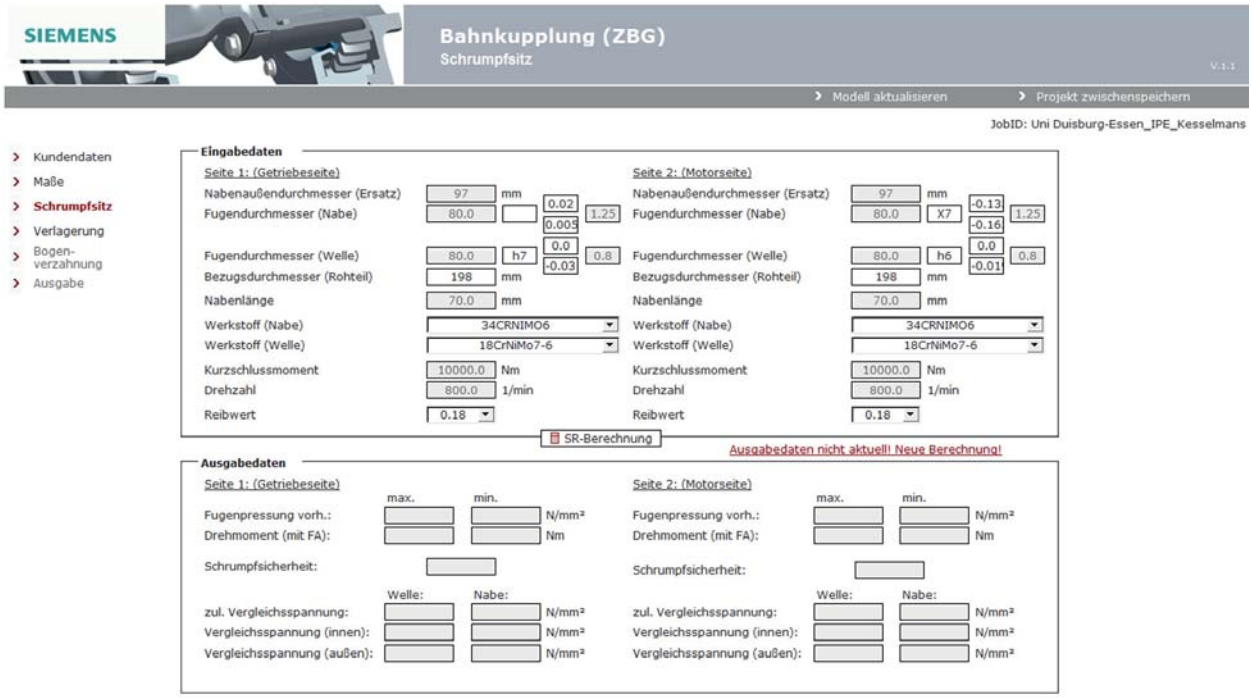


Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Eingabedialog zur Erfassung der Abmaße

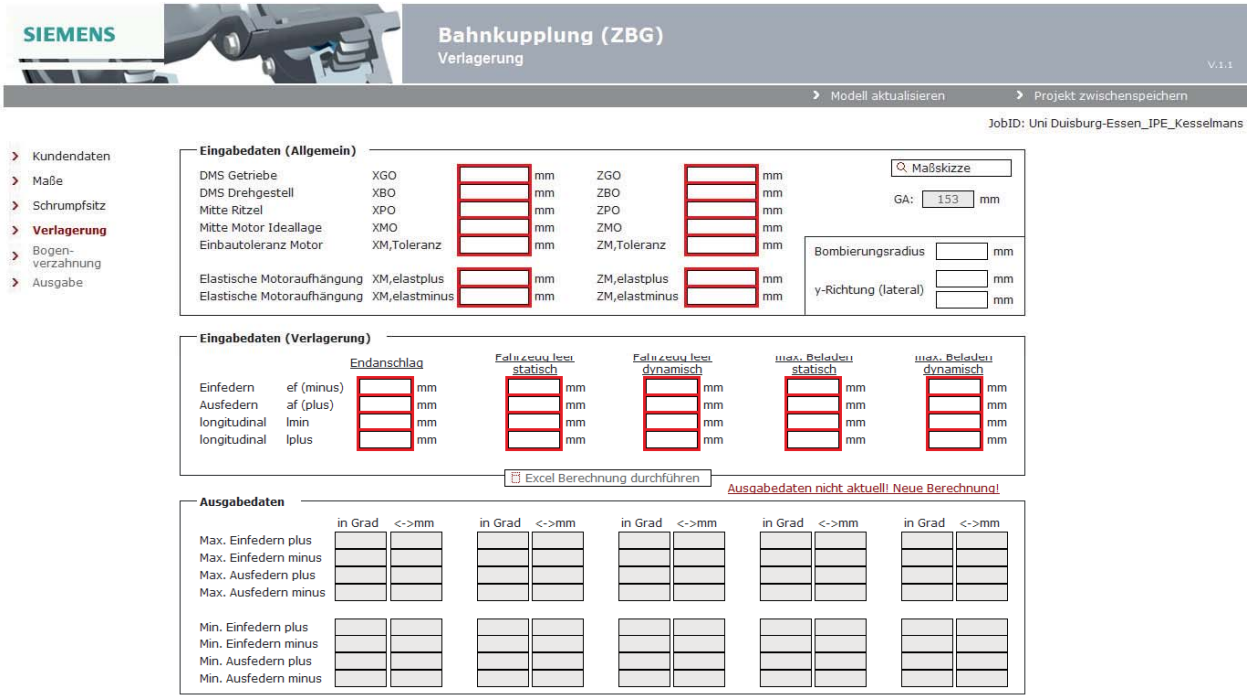


Eingabedialog zur Berechnung der Kegelquerpressverbindung

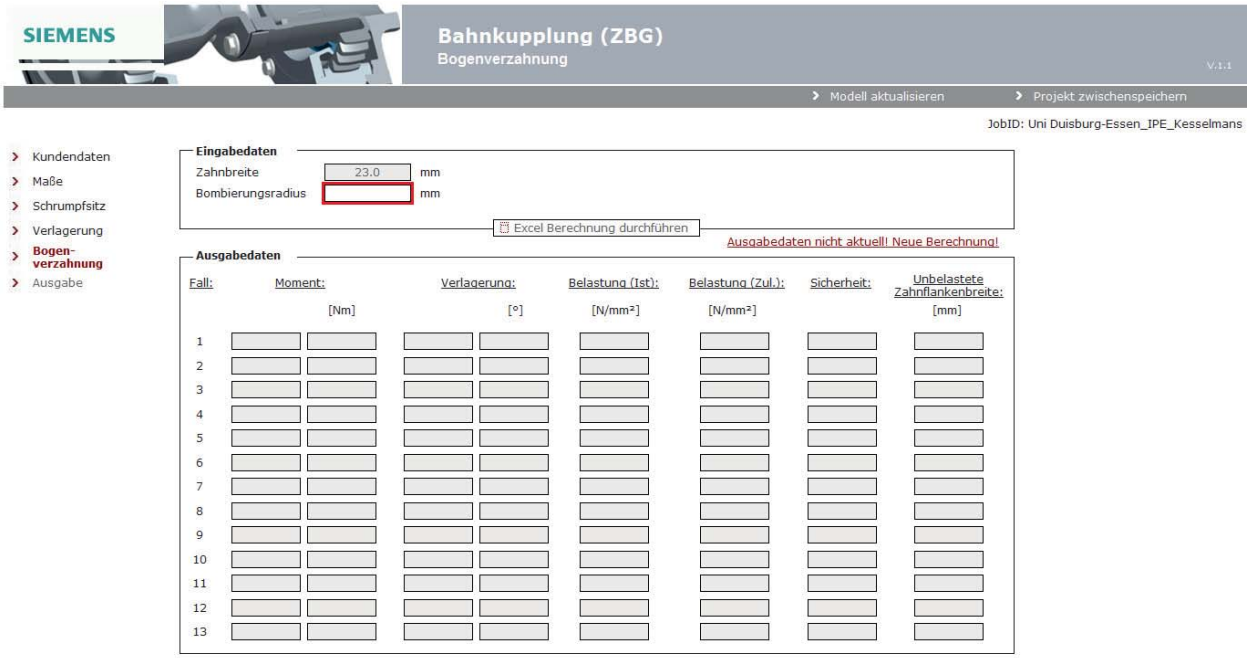


Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Eingabedialog Verlagerungsberechnung

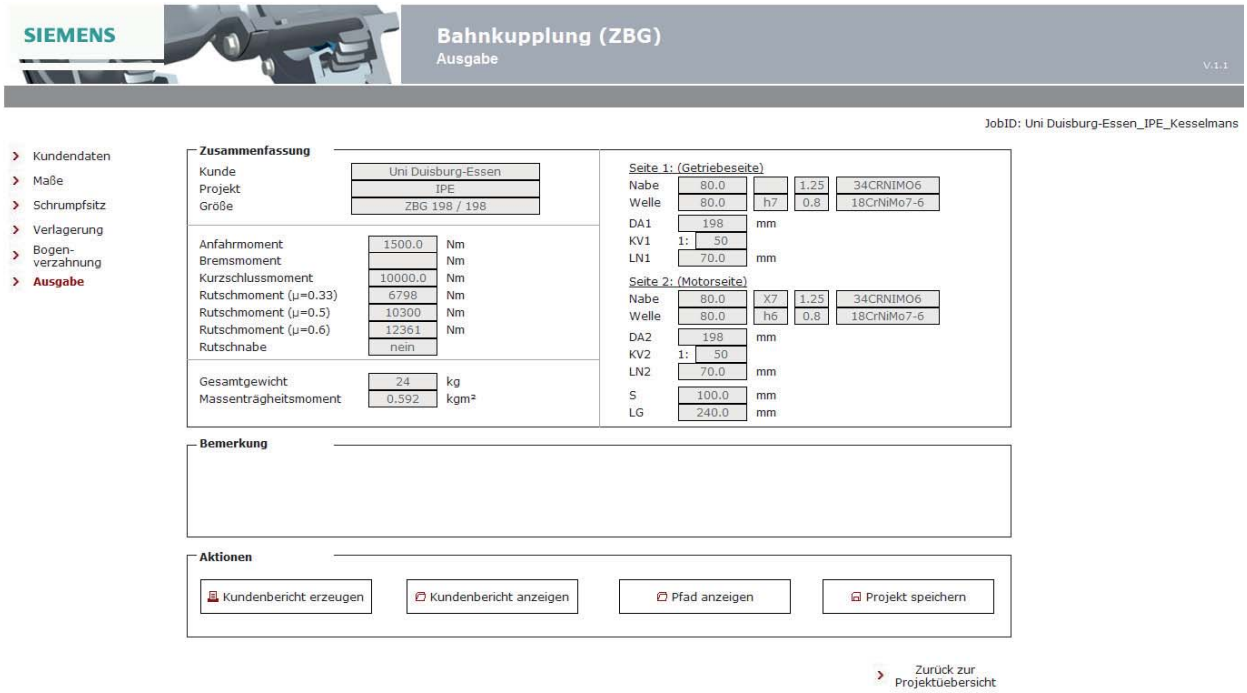


Eingabedialog zur Verzahnungsberechnung



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zusammenfassung



SIEMENS

Bahnkupplung (ZBG)
Ausgabe

V.1.1

JobID: Uni Duisburg-Essen_IPE_Kesselmans

- Kundendaten
- Maße
- Schrumpfsitz
- Verlagerung
- Bogen-verzahnung
- Ausgabe

Zusammenfassung

Kunde	Uni Duisburg-Essen
Projekt	IPE
Größe	ZBG 198 / 198

Anfahrmoment	1500.0	Nm
Bremsmoment		Nm
Kurzschlussmoment	10000.0	Nm
Rutschmoment (μ=0.33)	6798	Nm
Rutschmoment (μ=0.5)	10300	Nm
Rutschmoment (μ=0.6)	12361	Nm
Rutschnabe	nein	
Gesamtgewicht	24	kg
Massenträgheitsmoment	0.592	kgm²

Seite 1: (Getriebeseite)

Nabe	80.0		1.25	34CRNIMO6
Welle	80.0	h7	0.8	18CrNiMo7-6
DA1	198	mm		
KV1	1: 50			
LN1	70.0	mm		

Seite 2: (Motorseite)

Nabe	80.0	X7	1.25	34CRNIMO6
Welle	80.0	h6	0.8	18CrNiMo7-6
DA2	198	mm		
KV2	1: 50			
LN2	70.0	mm		
S	100.0	mm		
LG	240.0	mm		

Bemerkung

Aktionen

Kundenbericht erzeugen | Kundenbericht anzeigen | Pfad anzeigen | Projekt speichern

Zurück zur Projektüebersicht

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Iterationsschleifen durch abwechselndes Gestalten und Bewerten 6
Abbildung 2-2: Abhängigkeitsdiagramm: Komplexität des Konstruktionsprozesses 7
Abbildung 2-3: Entwicklung der Konstruktionsmethodik nach Heymann [He05] 11
Abbildung 2-4: Vergleich Funktions- und Produktstruktur am Beispiel eines Walzwerkgetriebes 13
Abbildung 2-5: Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen 16
Abbildung 2-6: Lebensphasen eines technischen Produktes [VDI03b] 18
Abbildung 2-7: Abbildung der realen Konstruktionsobjekte über Modelle 21
Abbildung 2-8: CAD-System als Produktentwicklungswerkzeug 22
Abbildung 2-9: Modellieren mit Wirkkomplexen 24
Abbildung 2-10: Anwendungsbeispiel für die Abbildung einer Kurve über die Parametrik 27
Abbildung 2-11: Grundfunktionalität parametrischer CAD-Systeme 27
Abbildung 2-12: Integration von Gestaltung und Berechnung in Anlehnung an [LiAm00] 36
Abbildung 2-13: Gestalt- und Berechnungsmodell mit unterschiedlichem Informationsgehalt 39
Abbildung 2-14: Wissenstreppe (in Anlehnung an North [No12]) 40
Abbildung 2-15: Entwicklung des computergestützten Konstruktionsprozesses nach [DaLu08] 44
Abbildung 2-16: Entwicklung der KBE-Systeme verschiedener CAD-Systeme [La12] 45
Abbildung 3-1: Vergleich der Konstruktionsarten am Beispiel Zahnkupplung 50
Abbildung 3-2: Getriebeverdichter (Bildquelle: Siemens AG) 53
Abbildung 3-3: Gestaltmodell eines Walzwerkgetriebes 54
Abbildung 3-4: Verlagerungsarten von Zahnkupplungen, herkömmliche Bauweise 55
Abbildung 3-5: Balligzahnkupplung, Bauweise Siemens AG 56
Abbildung 3-6: Konfigurationssystem für Getriebe 60
Abbildung 3-7: Informationsanreicherung im Konfigurationssystem Kupplungen 61
Abbildung 3-8: Schritte zur Automatisierung eines Konstruktionsprozesses 62
Abbildung 3-9: Verteilung der Informationen über das Konfigurationssystem 65
Abbildung 3-10: Variation der Funktionsstruktur 68
Abbildung 3-11: Erstes Konzept; a) Funktionsstruktur b) Planetengetriebe mit integriertem Nabenmotor 69
Abbildung 3-12: Auslegungskreislauf, Wechselwirkungen aufgrund der Abhängigkeiten 70
Abbildung 3-13: Detailliertes Konzept, Nabenmotor und Planetengetriebe in Integralbauweise 72
Abbildung 3-14: Frühzeitige Erkennung des „richtigen“ Lösungsweges 73
Abbildung 3-15: Entwerfen eines Kettentriebs 74
Abbildung 3-16: Wechselspiel zwischen Gestalt- und Berechnungsmodell 76
Abbildung 3-17: Nachführen von Änderungen 77
Abbildung 3-18: Gleitlagerberechnung in *Kisssoft(Kisssoft)* 78
Abbildung 3-19: Auswirkungen auf angrenzende Bauteile nach Einbau oder Austausch einer Komponente 79
Abbildung 4-1: Schnittstellenkommunikation über das API 85
Abbildung 4-2: Objekthierarchie am Beispiel der *CREO 2.0(PTC)* VB-API 86
Abbildung 4-3: Zuordnung von Parametern im Gestalt- und Berechnungsmodell 87
Abbildung 4-4: CAD integrierte Berechnung am Beispiel einer Gleitlagerung 88
Abbildung 4-5: Möglichkeiten zur Kopplung von Berechnungen an das CAD-System 90
Abbildung 4-6: CAD-PlugIn: *EAssistant(GWJ)* für *SolidWorks(Dassault Systèmes)* 93
Abbildung 4-7: Einbindung der Kegelquerpressverbindung in den Auslegungsablauf 94
Abbildung 4-8: Kopplung von Behältergestaltung und -berechnung 95
Abbildung 4-9: Automatisierter Einbau von Stutzen in einen Druckbehälter 96
Abbildung 4-10: a) unidirektionale Kopplung, b) bidirektionale Kopplung 98

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abbildung 4-11: Bidirektionale Kopplung, Richtungsumkehr 98
Abbildung 4-12: Bidirektionale Kopplung, zeitliche Abhängigkeit 99
Abbildung 4-13: Unterschiedliche Berechnungsziele bei der Kegelquerpressverbindung 100
Abbildung 4-14: Datenfluss mit unterschiedlichen Berechnungszielen 101
Abbildung 4-15: Variation von Berechnungsergebnissen 102
Abbildung 4-16: Entwurfsmodell Gleitlagerung und Gleichungslöser im CAD-System 103
Abbildung 4-17: Auslegung hinsichtlich verschiedener Zielgrößen in *Kisssoft(Kisssoft)* 104
Abbildung 4-18: Parameterdefinition, Plausibilitätskontrolle und Formularelement in *Spyydmaxx(Acatec)* 105
Abbildung 4-19: Randbedingungen, Zahnkupplung ZBG 106
Abbildung 4-20: Ermittlung zulässiger Wertebereiche nach Wertvorgabe 107
Abbildung 4-21: Zahnkupplung ZBG, Abhängigkeiten im Auslegungsablauf 108
Abbildung 4-22: Verschiedene, nicht zulässige Konfigurationsausprägungen 109
Abbildung 4-23: Abhängigkeiten zwischen den Modellen am Beispiel des Walzwerkgetriebes 110
Abbildung 4-24: Abhängigkeiten zwischen den Modellen 111
Abbildung 4-25: Konstruktionsvorschrift und Produktlogik am Beispiel der Antriebswelle 112
Abbildung 5-1: Konstruktionskomponenten, Verwendung in Vorgänger- Nachfolgerkonstruktionen 114
Abbildung 5-2: Höherwertige Konstruktionsobjekte 116
Abbildung 5-3: Komponentenübergreifende Abhängigkeiten 119
Abbildung 5-4: Steigerung der Unterstützung beim Komponenteneinbau 122
Abbildung 5-5: Austausch eines höherwertigen Konstruktionsobjektes 124
Abbildung 5-6: Systemunterstützung während des Einbaus eines HKO 127
Abbildung 5-7: Parameterzuordnung am Beispiel der Gleitlagerung 128
Abbildung 5-8: Unterstützung durch HKO bei der Verknüpfung von Abhängigkeiten 129
Abbildung 5-9: Unterstützung durch HKO beim Ersetzen von Abhängigkeiten 130

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Literaturverzeichnis

[AlDe12] Albers, A.; Denkena, B.; Matthiesen, S.: Faszination Konstruktion. Berlin u.a.: Springer, 2012.

[AlMa02] Albers, A.; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme. In: Konstruktion 54, Ausg. 7/8, 2002.

[Am02] Amft, M.: Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung. Dissertation. Techn.-Univ. München, 2002.

[AnLi03] Anderl, R.; Liese, H.: Wissensbasierte agentengestützte Modellierung in parametrischen 3D-CAD-Systemen. Knowledge-based and agent-supported modelling in the field of parametric 3D-CAD systems. In: Industrie Management Nr. 3, 2003, S. 18–21.

[Au13] Autodesk: Konstruktions-Assistent. http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/deu/2013/Help/1309-Autodesk1309/1654-Baugrupp1654/1737-Funktion1737/1739-Konstruk1739, zuletzt geprüft am: 24.09.2013.

[Au14] Autodesk: Design and Mobile Apps. http://www.autodesk.com/mobile-apps, zuletzt geprüft am: 01.02.2014.

[Be05] Beckmann, R.: Beitrag zur Auslegung und Konstruktion von Balligzahn-Kupplungen. Dissertation. Techn.-Univ. Chemnitz, 2005.

[Be06] Beermann, S.: Integration von Berechnungen im CAD. In: CAD-CAM Report Nr. 3/4, 2006, S. 58–60.

[Be12] Beermann, S.: Alles Berechnung – 40 Jahre Berechnungsprogramme im Maschinenbau. In: Antriebstechnik Nr. 11, 2012, S. 34–39.

[BeKi01] Beermann, S.; Kissling, U.: Entwicklung der Berechnungsprogramme für den Maschinenbau. In: Antriebstechnik Nr. 7, 2001, S. 47–51.

[Bi10] Bitter, H.: Kundenindividuell geht auch wirtschaftlich. In: CAD-CAM Report Nr. 1/2, 2010.

[Bi11] Birkhofer, H.: Konstruktionsmethodik – ein Auslaufmodell? In: Konstruktion 63, Ausg. 11/12, 2011, S. 3.

[BöLi12] Böhme, C.; Lieberwirth, C.; Brökel, K.: Konzept zum Parameteraustausch zwischen unterschiedlichen CAD/CAE-Plattformen. In: Tagungsband 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 14. und 15. Juni, 2012, S. 655–663.

[Br13] Brinkop Consulting: Marktführer Produktkonfiguration. Firmenschrift, 2013.

[Br99] Brinkop, A.: Variantenkonstruktion durch Auswertung der Abhängigkeiten zwischen den Konstruktionsbauteilen. Dissertation. Universität Karlsruhe, 1999.

[BrGo00] Brunetti, G.; Golob B.: A feature-based approach towards an integrated product model including conceptual design information. In: Computer-Aided Design 32, 2000, S. 877–887.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[BrGo12] Brecher, C.; Gorgels, C.; Ingeli, J.: FE-basierte Zahnkontaktanalyse zur anwendungs- und fertigungsgerechten Auslegung und Topologiekorrekturen asymmetrischer Verzahnungen. In: Tagungsband Schweizer Maschinenelemente Kolloquium 9. und 10. November, 2012, S. 101–114.

[Ca14] Cadenas: Der Elektronische CAD Produktkatalog – Weit mehr als nur 3D CAD Modelle, CADENAS eCATALOG solutions_Produktflyer_DE. http://www.cadenas.de/tl_files/cadenas/Downloads/PDF/Produktflyer/DE/CADENAS_eCATALOGsolutions_Produktflyer_DE.pdf, zuletzt geprüft am: 10.12.2013.

[Ch99] Christ, M.: Rechnersoftware für die integrierte Gestaltung und Berechnung von Planetengetrieben. Dissertation. Universität Bochum, 1999.

[ChZh10] Chen, H.; Zhao, J.; Sun, B.: A Model for Cooperative Design Based on Multi-Agent System. In: AICI 2010 Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2010, S. 349–356.

[ClRo13] Claussen, U.; Rodenacker, W.: Maschinensystematik und Konstruktionsmethodik. Grundlagen und Entwicklung moderner Methoden. Berlin u.a.: Springer, 2013.

[Co13] Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik. 6. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2013.

[CR13] CREAX Projects NV: CREAX – Function Database. http://www.productioninspiration.com/, zuletzt geprüft am: 17.07.2013.

[DaLu08] Danjou, S.; Lupa, N.; Koehler, P.: Approach for automated product modeling using knowledge-based design features. In: Computer-Aided Design & Applications No. 5, 2008, S. 622-629.

[De11] Decker, K.-H.: Maschinenelemente. Funktion, Gestaltung und Berechnung. München: Hanser, 2011.

[DIN13] DIN 7190 – Teil 2 (Entwurf): Pressverbände – Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für kegelige, selbsthemmende Pressverbände. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2013.

[Dy02] Dyla, A.: Modell einer durchgängig rechnerbasierten Produktentwicklung. Dissertation. Techn.-Univ. München, 2002.

[EhMe13] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2013.

[EiHa10] Eigner, M.; Hanschuh, S.; Gerhardt, F.: Concept to Enrichen Lightweight, Neutral Data Formats with CAD-based Feature Technology. In: Computer-Aided Design and Applications No. 1, 2010, S. 89–99.

[Fe13] Feldhusen, J.: Vorlesung Konstruktionslehre 1, RWTH-Aachen 14. Oktober 2013, 2013.

[FeGr13] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 8. vollst. überarb. Auflage. Berlin u.a.: Springer, 2013.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[Fo03] Forsen, J.: Ein systemtechnischer Ansatz zur methodisch parametrisch-assoziativen Konstruktion am Beispiel von Karosseriebauteilen. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2003.

[FrKi94] Franke, H.-J.; Kickermann, H.: FUZZY-Logik bei der Verarbeitung von Anforderungen. In: Tagungsband Produktdatenmodellierung und Prozessmodellierung als Grundlage neuer CAD-Systeme, CAD'94. München, Wien: Carl Hanser-Verlag, 1994, S. 523–543.

[Ga02] Gaese, U.: Einfluss der Zahngeometrie und des Gehäuseinnendruckes auf die Leerlaufverluste schnellaufender einspritzgeschmierter Stirnradgetriebe. Dissertation. Universität Stuttgart, 2002.

[Ga11] Gall, L.: Kopplung von 3D-CAD und Systemsimulation am Beispiel CATIA und Dymola. In: Tagungsband ASIM 24. und 25. November, 2011, S. 27–30.

[GaGr99] Gausemeier, J.; Grasmann, M.; Kespohl, H. D.: Verfahren zur Integration von Gestaltungs- und Berechnungssystemen. In: VDI Berichte, Band 1487, Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999, S. 71–87.

[GrAn90] Grabowski, H.; Anderl, R.: Produktdatenaustausch und CAD-Normteile. Für Konstruktionsleiter, Normstellenleiter, CAD-Projektleiter, DV-Leiter. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verlag, 1990.

[Ha00] Haderer, G.: Integration von Gestaltung und Berechnung mittels CORBA. Dissertation. Techn.-Univ. Berlin, 2000.

[Ha10] Hauser, T.: XML Standards. Schnell+kompakt. Frankfurt: Entwickler.press, 2010.

[HaHu11] Handschuh R.; Hurrell M.: Initial Experiments of High-Speed Drive System Windage Losses. In: National Aeronautics and Space Administration, Cleveland, OH. NASA, 2011.

[He05] Heymann, M.: "Kunst" und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts. Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft. Zürich: Chronos Verlag, 2005.

[He07] Herfeld, U.: Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation. Dissertation. Techn.-Univ. München, 2007.

[He14] Helms, B.: Object-Oriented Graph Grammars for Computational Design Synthesis. Dissertation. Techn.-Univ. München, 2014.

[Ho01] Hoffmann, R.: Integration höherwertiger Feature-Elemente in den rechnergestützten Konstruktionsprozeß. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2001.

[Ho02] Hochmuth, R.: Methoden und Werkzeuge als Teil eines Assistenzsystems zur rechnergestützten Analyse und Optimierung robuster Produkte. Dissertation. Universität Erlangen, 2002.

[HoMe10] Hoenow, G.; Meissner, T.: Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau. Bauteile – Baugruppen – Maschinen. 3. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010.

[HoMe12a] Hoenow, G.; Meissner, T.: Konstruktionspraxis im Maschinenbau. Vom Einzelteil zum Maschinendesign. 3. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2012a.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[HoMe12b] Holzmann, G.; Meyer, H.; Schumpich, G.: Technische Mechanik Festigkeitslehre. 10. Auflage. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2012b.

[Hu81] Hubka, V. et al.: Proceedings au ICED 1981-1995. Schriftenreihe WDK 7, 10, 12, 13, 16, 18, 19, 20, 22, 23. Zürich: Heuristika, 1981-1995.

[IK13] IKTD Universität Stuttgart: Intelligente Konstruktionssysteme (PROKON). http://www.iktd.uni-stuttgart.de/forschung/mpe/ProKon/, zuletzt geprüft am: 18.11.2013.

[Ja07] Jaroš, M.: Integration des STEP-Produktmodells in den Getriebeentwicklungsprozess. Dissertation. Techn.-Univ. München, 2007.

[JøAn08] Jørgensen, F.; Andersen, T.; Rasmussen, P.: The Cycloid Permanent Magnetic Gear. In: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 6, 2008, S. 1659–1665.

[Ju13] Jung, D.: Adaptive Relaxation zur Stabilisierung und Beschleunigung partitionierter Multiphysiksimulationen. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2013.

[KaJö02] Kaufhold, M.; Jöckel, A.: Permanenterregte Großmaschinen: Potential in der Oberklasse. In: etz Elektrotechnik und Automation Heft 20, 2002, S. 8–13.

[KI13] KISSsoft: Getriebeauslegung und Nachrechnung mit System. Firmenschrift, verfasst von H. Dinner, 2013.

[KiMu10] Kim, B. C.; Mun, D.; Han, S.: Retrieval of CAD model data based on Web Services for collaborative product development in a distributed environment. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology No. 50, 2010, S. 1085–1099.

[KlKr12] Kleiner, S.; Kramer, C.: Entwerfen und Entwickeln mit Systems Engineering auf Basis des RFLP-Ansatzes in V6. In: Tagungsband 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 14. und 15. Juni, 2012, S. 459–474.

[KlRo97] Klose, J.; Roemer, S.; Steger, W.; Zetzschke, T.: Methode zur Integration von Berechnungsverfahren in Konstruktionsprozesse. In: VDI Berichte, Band 1357, Neue Generation von CAD/CAM-Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, S. 143–159.

[Kö02] Köhler, P.: Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau. Würzburg: Vogel-Fachbuch, 2002.

[Ko13] Konstruktionspraxis: Arbeitsblatt-Sammlung für Mathcad von PTC. Verfasst von J. Schulze. http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/digitale_konstruktion/dokumentation/articles/288091, zuletzt geprüft am: 17.08.2013.

[Ko91] Koller, R.: Expertensysteme der Konstruktion. In: Konstruktion 43, 1991, S. 339–343.

[Ko98] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. 4. Auflage. Berlin u.a.: Springer, 1998.

[KöDa06] Köhler, P.; Danjou, S.: Herausforderungen an das Konstruktionsmanagement. In: Konstruktion 58, Ausg. 10, 2006, S. 78–82.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[KöDa08] Köhler, P.; Danjou, S.; Lupa, N.: Einsatz KBE-basierter Konstruktionsfeature. In: Konstruktion 60, Ausg. 11, 2008, S. 56–60.

[KöDu06] Köhler, P.; Dungs, S.; Lupa, N.: Das Mastermodell als Basis teilautomatisierter Simulation. In: ProduktDaten Journal. Nr. 1 ProSTEP, 2006.

[KoKa98] Koller, R.; Kastrup, N.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin u.a.: Springer, 1998.

[KoMe01] Koch, M.; Meerkamm, H.: Ein Konstruktionsassistenzsystem für komplexe Produkte auf Basis eins hybriden Produktmodells. In: VDI-Berichte, Band 1614, Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung, Effiziente 3D-Produktmodellierung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001, S. 217–231.

[Kr11] Kratzer, M.: Proaktive Unterstützung von Konstrukteuren bei der Arbeit mit Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 durch ein agentenbasiertes Konstruktionssystem. In: Vortrag anlässlich PlanetPTC 16. – 17. November, 2011.

[Kr97] Krause, F.-L.: Auf dem Weg zur virtuellen Produktentwicklung. In: VDI Berichte, Band 1357, Neue Generation von CAD/CAM-Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, S. 17–23.

[KrCi94] Krause, F.-L.; Ciesla, M.; Rieger, M.; Ulbrich, A.: Featureverarbeitung – Kernkomponente integrierter CAE-Systeme. In: Tagungsband Produktdatenmodellierung und Prozessmodellierung als Grundlage neuer CAD-Systeme, CAD'94. München, Wien: Carl Hanser-Verlag, 1994, S. 421–441.

[Ku92] Kuttig, D.: Die Funktionsstruktur als integraler Bestandteil des rechnerunterstützten Konstruktionsprozesses. In: Konstruktion 44, 1992, S. 183–192.

[KuHi08] Kurz, U.; Hintzen, H.; Laufenberg, H.: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008.

[KuLa11] Kuecuekyavuz, A.; Langenbeck, B.: Integrierter Vertikalmühlenantrieb EMPP. In: Tagungsband IME-Aachen 29.-30. März, 2011, S. 239–250.

[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 Number 26, 2012, S. 159–179.

[LeKe97] Leidich, E.; Kertscher, U.: Integration von Berechnung und Gestaltung in eine netzorientierte Nutzerumgebung. In: Tagungsband Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit durch CAD, 1997, S. 84–90.

[Li09] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin u.a.: Springer, 2009.

[Li13] Lifecycle Insights: Keine Kompromisse mehr bei Konstruktionsberechnungen. White Paper, 2013.

[LiAm00] Lindemann, U.; Amft, M.: Rechnergestützte Integration von Gestaltung und Berechnung im Konstruktionsprozess. In: Konstruktion 52, Nr. 10, 2000, S. 78–82.

[Lo04] Lobeck, F.: Konzept zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen einschließlich Simulation und Rapid Prototyping unter Verwendung eines neuen PLM-CAD-Integrationsmoduls. Habilitationsschrift. Universität Duisburg-Essen, 2004.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[Lu09] Lupa, N.: Einsatz wissensbasierter Features für die automatische Konfiguration von Produktkomponenten. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2009.

[Lu12] Lutz, C.: Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte. Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme in die Konstruktion. Dissertation. Universität Wien, 2012.

[Ma12] Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation. Universität Karlsruhe, 2012.

[Ma13] Manoharan, T.: Ansatz zur automatisierten Konfiguration von modular aufgebauten Stahlbaukonstruktionen. Unveröffentlichte Masterarbeit. Universität Duisburg-Essen, 2013.

[MD13] MDESIGN Vertriebs GmbH: MDESIGN Partner, Kooperationen & Mitgliedschaften. http://www.mdesign.de/ueber-mdesign/mdesign-partner/, zuletzt geprüft am: 17.08.2013.

[Me10] Meimann, V.: Ein Beitrag zum ganzheitlichen Know-How-Schutz von virtuellen Produktmodellen in Produktentwicklungsnetzwerken. Dissertation. Universität Bochum, 2010.

[Me99] Mertens, H.: DFG-Schwerpunktprogramm "Innovative, rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse – Integration von Gestaltung und Berechnung". In: VDI Berichte, Band 1487, Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999, S. 13–30.

[MeHe99] Meerkamm, H.; Heynen, C.; Schweiger, W.: Integration von Berechnungen in den frühen Entwurfsprozess. In: VDI Berichte, Band 1487, Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999, S. 103–122.

[Mi13] Microsoft: COM: Component Object Model Technologies. http://www.microsoft.com/com/default.mspx, zuletzt geprüft am: 14.10.2013.

[Mi14a] Microsoft: XML-Dateien lesen und schreiben mit VB.NET. http://msdn.microsoft.com/de-de/library/bb979298.aspx, zuletzt geprüft am: 31.01.2014.

[Mi14b] Microsoft: XML-Dokumentobjektmodell (DOM). http://msdn.microsoft.com/de-de/library/hf9hbf87(v=vs.110).aspx, zuletzt geprüft am: 31.01.2014.

[Na11] Nahrstedt, H.: Excel + VBA für Maschinenbauer. Programmieren erlernen und Problemstellungen lösen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.

[NiBe11] Nickel, A.; Benke, K.: ParaFEM – innovative Zukunftsstrategie zur effektiven Nutzung von numerischen Methoden mit integrierter Parametrisierung für Konstruktionsaufgaben. In: Tagungsband 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2011, S. 115–122.

[No12] North, P.: Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2012.

[NoTa97] Nonaka, I.; Takeuchi, H.: Die Organisation des Wissens: Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen. Frankfurt, New York: Campus Fachbuch, 1997.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[PaBe07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Berlin u.a.: Springer, 2007.

[PaLi01] Pache, M.; Lindemann, U.; Römer, A.; Hacker, W.: Skizzieren mit dem CAD-System. In: CAD-CAM Report Nr.3, 2001, S. 98–103.

[PaSu91] Paul, R.; Sutter, B.: Technisches Modellieren – Ein Zugang zur integrierten Produktdatenverwaltung. In: Fachtagung Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft, 1991.

[Po12] Pollmann, P.: Konfiguration von Flanschkupplungen. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Universität Duisburg-Essen, 2012.

[Po13] Pollmann, P.: Konfiguration drehstarrer Kupplungen mit ERP-Systemabgleich. Unveröffentlichte Masterarbeit. Universität Duisburg-Essen, 2013.

[Pr11] Prostep AG: 3D-Formate im Engineering-Umfeld – ein Vergleich. Whitepaper, 2011.

[Pr13] Prüfer, H.-P.: FEM und die Normen – Parallelwelten? In: Tagungsband 11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2013, S. 169–178.

[Pr14a] Prazcka, S.: Bidirektionale Kopplung von Gestalt- und Berechnungsmodellen. Unveröffentlichte Masterarbeit. Universität Duisburg-Essen, 2014a.

[Pr14b] ProSTEP iViP: ProSTEP iViP Association | STEP AP 242. http://www.prostep.org/de/projekte/step-ap-242.html, zuletzt geprüft am: 04.02.2014.

[PrRa06] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2006.

[Ra06] Radev, N.: Individuelle Anpassung von CAD-Systemen und Modellierung eines Pre-Prozessors für spezielle Berechnungs-Software. Dissertation. Universität Rostock, 2006.

[Ro00] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. 3. Auflage. Berlin u.a: Springer, 2000.

[Ro01] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Konstruktionskataloge. 3. Auflage. Berlin u.a: Springer, 2001.

[RuNo12] Russell, S. J.; Norvig, P.: Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz. 3. Auflage. München u.a.: Pearson, 2012.

[RzSk10] Rzydzik, S.; Skarka, W.: Multiagent System for Aiding Designing Process. In: New World Situation – New Directions in Concurrent Engineering, 2010, S. 275–282.

[Sc07] Schlecht, B.: Maschinenelemente 1. Festigkeit, Wellen, Verbindungen, Federn, Kupplungen. München: Pearson, 2007.

[Sc09] Schlecht, B.: Maschinenelemente 2. Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen. München: Pearson, 2009.

[Sc89] Schneider, J.: Stand und Entwicklungstrends von Expertensystemen für Entwicklung und Konstruktion. In: VDI Berichte, Band 775, Expertensysteme in Entwicklung und Konstruktion. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989, S. 323–342.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[Sc97] Schneider, T.: Personenabhängiges und permanent verfügbares Wissen in der Konstruktion mit Hilfe von intelligenten Applikationen für CAD-Programme. In: VDI Berichte, Band 1357, Neue Generation von CAD/CAM-Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, S. 577–597.

[ScHe12] Schubert, S.; Heller, J. E.; Feldhusen, J.: Produktmerkmale in der Entwicklung von kundenindividuellen Produkten. In: Tagungsband 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 14. und 15. Juni, 2012, S. 459–474.

[ScMa10] Schulte, R.; Mantwill, F.: Variantenreduzierung durch Nutzung von Normteile-Assistenzen. In: ZWF, Jahrg. 105. München: Carl-Hanser Verlag, 2010.

[SpKr97] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. München: Hanser, 1997.

[St06] Steiner, R.: Kompetenzzellenbasierte Produktentwicklung. Dissertation. Universität Chemnitz, 2006.

[St11] Straßmann, T.: Die richtige CAD-Strategie. Wege zur Entscheidungsfindung. Vortrag anlässlich Planet PTC Stuttgart 16. - 17. November, 2011.

[St12] Steiner, R.: Kopplung von CAD-Modellierung und Druckbehälterberechnung. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Universität Duisburg-Essen, 2012.

[StHü01] Staberoh, U.; Hüber, N.; Seliger, J.: 3D-CAD-Einsatz im Spannungsfeld der frühen Produktentwicklungsphase. In: VDI-Berichte, Band 1614, Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung, Effiziente 3D-Produktmodellierung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001, S. 61–78.

[StRi13] Steinhilper, R.; Rieg, F.: Handbuch Konstruktion. München: Hanser, 2013.

[Tr14] Traceparts: Kostenfreie CAD Bauteilebibliothek mit 2D-Zeichnungen und 3D-Modellen. http://www.tracepartsonline.net/(S(w3tlilejgrursoauevfemy55))/content.aspx?lang=de, zuletzt geprüft am: 05.01.2014.

[Ul02] Ullman, D. G.: Toward the Ideal Mechanical Engineering Design Support System. In: Research in Engineering Design No. 13, 2002, S. 55–64.

[VD09] VDMA-Einheitsblatt 23900: Empfehlung eines Produktmodells für Getriebe. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2009.

[VD13] VDMA: Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau. Verfasst von Susanne Krebs, id:648216. http://www.vdma.org/article/-/articleview/648216#Industrieller%20Mittelstand, zuletzt geprüft am: 01.08.2013.

[VDI03a] VDI-Richtlinie 2249: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – CAD-Benutzungsfunktionen. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2003a.

[VDI03b] VDI-Richtlinie 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature-Technologie. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2003b.

[VDI03c] VDI-Richtlinie 2211: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Berechnungen in der Konstruktion. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2003c.

[VDI04] VDI-Richtlinie 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2004.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[VDI09a] VDI-Richtlinie 5610: Wissensmanagement im Ingenieurwesen: Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2009a.

[VDI09b] VDI-Richtlinie 2209: 3D-Produktmodellierung. Technische und organisatorische Voraussetzungen. Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen. Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2009b.

[VDI11] VDI-Richtlinie 2230 (Entwurf): Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 2011.

[VDI89] VDI-EKV Hrsg.: Expertensysteme in Entwicklung und Konstruktion. Bestandsaufnahme und Entwicklungsrichtungen: VDI-Berichte 775. Düsseldorf, 1989.

[VDI93] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 1993.

[VDI97] VDI-Richtlinie 2222: Konstruktionsmethodik. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Blatt 1. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 1997.

[We07] Weser, G.: Kosteneffektives web-based Engineering und intelligente CAD-Bauteile. In: Tagungsband SimPEP / Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess 14. und 15. Juni, 2007, S. 21–28.

[WeBr97] Welp, E. G.; Braun, P.: Semantische und systemtechnische Kopplung kommerzieller CAD- und Berechnungssysteme durch einen objektorientierten Integrationsprozessor. In: VDI Berichte, Band 1357, Neue Generation von CAD/CAM-Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, S. 125–141.

[WeDa97] Weck, M.; Dammer. M.; Cramer, E.: Integration von Gestaltung und Berechnung – mit geeignetem Informationsmanagement zum integrierten Konstruktionsarbeitsplatz. In: VDI Berichte, Band 1357, Neue Generation von CAD/CAM-Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, S. 105–124.

[WeMu99] Weber, C.; Muth, M.; Baer, T.; Werner, H.: Intelligente Kopplung von Gestaltung und Berechnung. In: VDI Berichte, Band 1487, Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999, S. 47–70.

[WiMu13] Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. 21. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2013.

[WoSa09] Wortberg J.; Saul K.; Lupa N.; Köhler, P.: Automatisierte Optimierung von Strömungskanälen zur Verbesserung des Spülverhaltens von Kunststoff-Extrusionswerkzeugen. In: WAK-Zeitschrift Kunststofftechnik Nr. 5, 2009, S. 131–152.

[Wü04] Wüst, C.: Dellen im Dach – Fahrzeugbau. In: Der Spiegel Nr. 14, 2004, S. 170–172.

[XuZh09] Xu, L.; Zhu, X.: Magnetic planetary gear drive. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE, 2009, S. 2167–2181.

[Zw05] Zwintzscher, O.: Software-Komponenten im Überblick. Einführung, Klassifizierung & Vergleich von JavaBeans, EJB, COM+, Net, CORBA, UML 2. Herdecke, Bochum: W3L-Verlag, 2005.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Eigene Publikationen:

Kesselmans, C.; Humpa, M.; Köhler, P.: Die Visual Basic Programmierschnittstelle – eine experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten. Vortrag anlässlich PlanetPTC-Anwendertagung, Stuttgart, 2010.

Kesselmans, C.; Köhler, P.: Einbindung bewährter Auslegungssysteme in den Aufbau von Getriebemodellen auf Basis parametrischer CAD-Systeme – Teil 1. In: CAD-CAM Report Nr. 10 10, 2010, S. 34–37.

Kesselmans, C.; Köhler, P.: Einbindung bewährter Auslegungssysteme in den Aufbau von Getriebemodellen auf Basis parametrischer CAD-Systeme – Teil 2. In: CAD-CAM Report Nr. 10 11, 2010, S. 30–32.

Köhler, P.; Danjou, S.; Strohmeier, O.; Meister, B.; Kesselmans, C.; Klemme, U.: Pro-ENGINEER-Praktikum. Einführende und fortgeschrittene Arbeitstechniken der parametrischen 3D-Konstruktion mit Wildfire 5.0. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

Kesselmans, C.; Köhler, P.: Intelligente CAD-Modelle für Entwurfsprozesse im Maschinen- und Anlagenbau. In: Tagungsband 11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2013, S. 229–238.

Kesselmans, C.; Köhler, P.: Komponentenübergreifende Abhängigkeiten in Gestaltungs- und Berechnungsprozessen. In: Konstruktion Nr. 10, 2013, S. 87–90.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Christoph Kesselmans
Anschrift:	Nette 162 41751 Viersen - Dülken
Geburtsdatum:	11. April 1980
Geburtsort:	Viersen
Familienstand:	verheiratet, zwei Kinder

Berufstätigkeit

09/2008 – heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung der Universität Duisburg-Essen, Professur für Rechnereinsatz in der Konstruktion, Leitung Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler
10/2006 – 03/2007	Werkstudent bei der Fa. Bosch Packaging Technology – Viersen, Produktbereich Süßwaren, Konstruktions- und Entwicklungsabteilung
02/2000 - 09/2004	Angestellter der Fa. NIKO – Nahrungsmittelmaschinen GmbH – Nettetal, tätig in den Bereichen: Fertigung, Montage, Entwicklung und Konstruktion sowie Technische Redaktion

Studium

09/2004 – 08/2008	Hochschule Niederrhein – Krefeld, Diplomstudiengang Maschinenbau, Abschluss: Dipl.-Ing. (FH) Maschinenbau

Zivildienst

08/2000 - 06/2001	Landessportbund Nettetal, Zivildienstleistender im technischen Bereich

Schul- und Berufsausbildung:

08/2000 - 07/2004	Berufskolleg Platz der Republik – Mönchengladbach, Abendschule, Abschluss: Staatlich geprüfter Maschinenbautechniker Fachrichtung Fertigungstechnik, Fachhochschulreife
08/1996 - 01/2000	NIKO – Nahrungsmittelmaschinen GmbH, IHK-Abschluss zum Industriemechaniker Fachrichtung Maschinen und Systemtechnik
1990 – 1996	Städt. Gemeinschaftshauptschule am Ingenhovenpark, Abschluss Fachoberschulreife

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.