

Markus Walch

Variantenentwicklung im ZHO-Modell im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung – Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase auf Basis abgeleiteter Varianten

Variant Development using the System Triple Approach in the Context of PGE - Product Generation Engineering – Method for Decision Support during Concept Development in the Offering Phase based on Derived Variants

Band 103

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Markus Walch

**Variantenentwicklung im ZHO-Modell im Kontext
der PGE - Produktgenerationsentwicklung –
Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der
Konzeptentwicklung in der Angebotsphase auf
Basis abgeleiteter Varianten**

Variant Development using the System Triple
Approach in the Context of PGE - Product Generation
Engineering – Method for Decision Support during
Concept Development in the Offering Phase based
on Derived Variants

Copyright: IPEK ■ Institut für Produktentwicklung, 2017
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

**Variantenentwicklung im ZHO-Modell im Kontext der
PGE - Produktgenerationsentwicklung – Methode
zur Entscheidungsunterstützung bei der
Konzeptentwicklung in der Angebotsphase auf
Basis abgeleiteter Varianten**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Markus Walch
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:	24. Juli 2017
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe¹ am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie und Monitoring von Lager- und Funktionsreibsystemen, die NVH mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und am Gesamtfahrzeug, die Mikrosystemtechnik mit dem Fokus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

¹ Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 103

Die moderne Produktentwicklung ist heute gekennzeichnet durch einen Zwang zur Reduzierung der Entwicklungszeiten und zu einer Erhöhung der Produktvarianten, da Käufermärkte nur über eine gesteigerte Variantenzahl zu entsprechenden Kaufanreizen geführt werden können. Dieser Zwang zur Variantenvielfalt ist gleichzeitig verbunden mit der notwendigen Kostenorientierung, sowohl auf der Produktseite als auch auf der Produktentwicklungsprozess-Seite. Produkte müssen kostengünstig dargestellt werden, um wettbewerbsfähig zu sein. Die dazu notwendigen Produktentwicklungsprozesse müssen effizient und effektiv sein, um den Entwicklungskostenanteil zu kontrollieren. Gerade im Kontext der Automobilentwicklung, in der Beziehung zwischen Fahrzeugherstellern (OEM) und Zulieferern gilt der Zwang zur Effizienz und Effektivität in der Produktentwicklung ganz besonders. Die Geschäftsprozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass auf der Basis von sehr generischen Anfragen der OEM in kurzer Zeit Angebote mit hohem Detaillierungsgrad, insbesondere hinsichtlich der Produktkosten erfolgen müssen. Um dies mit einer notwendigen Sicherheit durchführen zu können, wird bei vielen Zulieferunternehmen bereits in der Angebotsphase eine umfangreiche Konstruktion des angefragten technischen Systems erforderlich. Dies verursacht Kosten und wird natürlich bei einer Nichtannahme des Angebotes im Zuliefererwettbewerb nicht vergütet. Es ist also auf Seiten der Zulieferer ein klarer Zwang zur schnellen Reaktion mit hoher Qualität bezüglich der Kosten- und Funktionsaussage bei allen Teilsystemen in der Fahrzeughersteller-Zulieferer-Beziehung vorhanden. Um hier voran zu kommen, wird insbesondere dem Aspekt der Variantenkonstruktion und des Variantenmanagements eine hohe Bedeutung zugemessen.

Das neue Konzept der PGE - Produktgenerationsentwicklung von ALBERS eignet sich hervorragend zur Beschreibung der realen Produktentwicklungsprozesse unter diesen extremen Randbedingungen. Dabei kann die PGE - Produktentwicklung sowohl gänzliche, ja radikale Neuentwicklungen, als auch hochgradige Adaptionentwicklungen in einem geschlossenen Modell beschreiben. Die Komplexität und auch Kompliziertheit der Produktlösungen, auch im Bereich der Komponenten ist dabei allerdings enorm. Es müssen vielfältigste Wechselwirkungen und Beziehungen abgeklärt werden, um auf der Detailebene zu entsprechenden Aussagen zu kommen, um valide Lösungen in der Angebotsphase vorschlagen zu können. Diesen Prozess nachhaltig und methodisch zu unterstützen, ist die Herausforderung, der sich Herr Dr.-Ing. Markus Walch in seiner Arbeit gestellt hat. Dabei kommt ihm zugute, dass er als Produktkonstrukteur in einem Unternehmen der Automobilzulieferer-Industrie umfangreiche Erfahrung in der realen Konstruktion und Produktentwicklung mit in die Forschungstätigkeit einbringen kann. Die Herausforderung der wissenschaftlichen

Arbeit ist extrem hoch, da sie ja im Kontext einer realen Produktentwicklung in der Zuliefererkette des Fahrzeugbaus angeordnet ist. Die Konstellation als kooperative Arbeit zwischen der Wissenschaft in Form des IPEK - Instituts für Produktentwicklung und dem Unternehmen ist eine ausgezeichnete Basis, um zu realistischen Einschätzungen der Fragestellung der heutigen Produktkonstruktion zu kommen. Dieses Umgehen mit der realen Komplexität lassen viele wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet der Produktentwicklung, insbesondere auch im internationalen Kontext, vermissen. Nur diese Herangehensweise kann aber letztendlich die tatsächliche Eignung und Methodenakzeptanz in den Unternehmen erreichen, da nur sie dafür sorgt, dass die realen Randbedingungen auch in der Entwicklung der Methoden von Anfang an berücksichtigt werden. Dies hat Herr Dr.-Ing. Markus Walch in ganz ausgezeichneter Weise belegt.

Juli, 2017

Albert Albers

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die Konstrukteure in der Angebotsphase beim Ableiten, Bewerten und Auswählen kunden- und anbietergerechten Varianten auf Basis von Referenzprodukten eines bestehenden Baukastens unterstützt. Die Verwendung von Referenzprodukten für neue Kundenanfragen gewinnt für automobiler Zulieferunternehmen zunehmend an Bedeutung, um innerhalb der geforderten Fristen Angebote erstellen zu können. Die Angebotserstellung wird ferner erschwert durch steigende Variantenvielfalt und zunehmend komplexere Produkte zur Abdeckung immer vielfältiger Kundenanforderungen. Hinzu kommt, dass vielfach in der Angebotsphase Zielvorgaben variiert werden. Die Variantenentwicklung in der Angebotsphase ist damit ein stark unsicherheitsbehafteter Prozess der häufig hohe Konstruktionsaufwände bedingt, um fallspezifisch zielführende Varianten ableiten, bewerten und auswählen zu können.

Die Problem- und Bedarfssituation resultiert aus den Erfahrungen des Autors, der seit mehr als zehn Jahren als Konstrukteur für Ventiltriebkomponenten im Entwicklungsbereich eines Tier-1-Automobilzulieferers tätig ist. Durch eine Fragebogenstudie in drei Konstruktionsabteilungen des fallgebenden Zulieferunternehmens sowie durch eine begleitende Konstruktionsdatenanalyse von abgeschlossenen Anfrage- und Serienprojekten wird die Problem- und Bedarfssituation bestätigt. Hieraus ergibt sich der primäre Bedarf, zu einem frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase die Konstruktionsaktivitäten auf die zielführenden Varianten fokussieren zu können. Hiermit sollen die nicht zielführenden Aktivitäten minimiert werden, um die Zeitvorgaben des Kunden einhalten und Entwicklungskosten reduzieren zu können.

Die Methode wird praxisnah anhand einer detaillierten Produktanalyse zu gebauten Nockenwellensystemen entwickelt und wissenschaftlich auf Grundlage des erweiterten ZHO-Modells beschrieben. Mit den Analyseergebnissen wird die wissenschaftliche Methode verifiziert und im Rahmen eines Softwareprototyps operationalisiert. Mit Hilfe dieses Prototyps wird das Methodenpotential in einer Interview-Studie mit Konstrukteuren evaluiert. Der hieraus resultierende, zentrale Bedarf, die Firmenexpertise bei der Variantenbewertung zu berücksichtigen, wird durch die Einbeziehung der Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung für die Entscheidungsunterstützung abgedeckt und durch retrospektive Methodenapplication auf historische Projektdaten zweier angeschlossener Industrieprojekte evaluiert.

Die Methode leistet durch die Berücksichtigung der Firmenexpertise einen zentralen Beitrag zur systematischen Variantenbeurteilung. Mit der Methode kann variantenspezifisch Risiko, Aufwand und Potential ermittelt werden. Darüber hinaus lässt sich mit der Entscheidungsunterstützung erkennen, ob die Firmenexpertise für konkret angefragte Produkte ausreicht oder der aktuelle Baukasten erweitert werden muss.

Abstract

In this thesis, a method is introduced that, based on reference products of an existing construction kit, supports designers to derive, evaluate and select variants that fit customer and supplier requirements. Using reference products for new customer requests becomes more and more important for automotive suppliers in order to provide offers within the claimed periods. Moreover, increasing numbers of variants and rising product complexities are enhancing the difficulty during the offer preparation to meet customer requirements that are becoming more and more manifold. Additionally, in many cases objectives are modified during the offering phase. Thus, in this phase the development process of variants is characterized by uncertainty that frequently leads to remarkable design work in order to derive, evaluate and select appropriate variants.

In the first place, the problem and requirement situation is based on work experiences of the author who has been working as a design engineer in the development department of a Tier-1-Automotive-Supplier for more the ten years. By running a questionnaire study in three different design departments of the considered supplying company and analyzing the amount of produced design data of completed inquiry and serial projects the problem and requirement situation is being confirmed. Thus, the possibility to be able to focus design activities in the early stage of the offering phase on the most relevant variants appears as the main requirement. Herewith, not relevant activities can be minimized in order to meet customer deadlines and save development costs.

In order to tightly link the scientific and industrial perspective the method is developed based on a detailed product analysis of assembled camshaft systems and described scientifically by using the Advanced System Triple Approach. The results of the analysis are used to verify and to operationalize the scientific method by setting up a prototypical software tool. The software application is then used to evaluate the potential of the method by carrying out an interview study with design engineers. The resulting need of taking a companies' expertise into account is considered by integrating the parts of variation according to the product generation engineering in order to support the decision. The evaluation of the decision support is done by back-testing the method using historical data of two completed projects.

Taking a companies' expertise into account the method shows a central step forward regarding the systematic evaluation of variants. The method allows determining risk, effort and potential of each variant. Additionally, the decision support indicates whether a companies' expertise is sufficient regarding a requested product or whether the current construction kit has to be extended.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen dem IPEK Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der MAHLE GmbH. In dieser Zeit war ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK und als Konstruktionsingenieur für Ventiltriebkomponenten bei MAHLE tätig.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers möchte ich in besonderem Maße danken für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung meiner Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen, als Mitarbeiter des IPEK-Teams die Forschung am Institut mitgestalten zu dürfen. Herzlich danken möchte ich ihm für die sehr angenehmen und vor allem sehr konstruktiven wissenschaftlichen Gespräche, in denen er durch seine wertvollen Denkipulse entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer für die Übernahme des Korreferats sowie bei Frau Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinem Abteilungsleiter Herrn Dr.-Ing. Dieter Emmrich und meinem Gruppenleiter Herrn Christoph Steinmetz möchte ich dafür danken, dass sie mir über den ganzen Promotionszeitraum immer unterstützend zur Seite standen und mir die nötigen Freiräume gaben. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Falk Schneider, der insbesondere bei der initialen Ausgestaltung und Strukturierung meines Promotionsthemas einen wichtigen Beitrag geleistet hat. Herrn Burkhard Bülte danke ich für die programmtechnische Unterstützung bei der Realisierung des Softwareprototyps und die interessanten Diskussionen. Herrn Fritz Schlegel danke ich sehr für seine CAD-seitige Unterstützung und die angenehme Zeit als Tischgegenüber. Mein Dank gilt zudem meiner gesamten Konstruktionsgruppe, allen Studienteilnehmern und all denjenigen, die mich während meiner Promotionszeit bei MAHLE begleitet haben.

Vielen Dank an das gesamte IPEK-Team und insbesondere an die Kolleginnen und Kollegen der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management. Hierbei möchte ich Herrn Dr.-Ing. Eike Wintergerst sowie Herrn Dr.-Ing. Björn Ebel einen großen Dank aussprechen, da die zahlreichen wissenschaftlichen Gespräche mit ihnen meine Arbeit in besonderem Maße bereichert haben. Meinen besonderen Dank möchte ich auch an Herrn Dr.-Ing. Nikola Bursać richten, der mir in der entscheidenden Schlussphase meiner Arbeit eine sehr große Hilfe war.

Der entscheidende Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit wurde jedoch durch meine Frau Birgit und unsere drei Kinder Fabienne, Philipp und Raphael, sowie durch meine Eltern und Schwiegereltern erbracht. Ohne Euch hätte ich das nicht geschafft!

Meiner Familie

*„Große Werke vollbringt man nicht mit Kraft,
sondern mit Ausdauer.“*

Samuel Johnson (1709 - 1784),
englischer Sprachforscher, Lehrer, Journalist und
Herausgeber moralischer Wochenschriften, Literaturkritiker.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fokus der Arbeit	6
1.2	Aufbau der Arbeit.....	11
2	Grundlagen und Stand der Forschung	14
2.1	Angebotsphase in der Produktentstehung.....	14
2.1.1	PGE - Produktgenerationsentwicklung	14
2.1.2	Modellierung von Produktentstehungsprozessen	20
2.1.3	Konzeptentwicklung in der Angebotsphase.....	42
2.1.4	Zwischenfazit.....	58
2.2	Variantenvielfalt durch abgeleitete Varianten	62
2.2.1	Komplexitäts- und Variantenmanagement	65
2.2.2	Ursachen und Auswirkungen der Variantenvielfalt	69
2.2.3	Ansätze zum Umgang mit der Variantenvielfalt.....	74
2.2.4	Zwischenfazit.....	83
2.3	Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl	84
2.3.1	Entscheidungsgrundlagen	84
2.3.2	Rechnerunterstützung in der Konstruktion	96
2.3.3	Ansätze zur Entscheidungsunterstützung	110
2.3.4	Zwischenfazit.....	122
3	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	126
4	Forschungsdesign	131
4.1	Forschungshypothesen und Forschungsfragen	131
4.2	Forschungsvorgehen.....	133
5	Analyse der Konzeptentwicklung in der Praxis	139
5.1	Durchführung einer Fragebogen-Studie	141
5.1.1	Ergebnisse aus der Fragebogen-Studie.....	144

5.1.2	Bewertung der produktspezifischen Methodeneignung.....	159
5.1.3	Akzeptanz und Potential der Methode.....	162
5.2	Ermittlung von Konstruktionsaufwänden in der Angebotsphase.....	165
5.3	Fazit zur Konzeptentwicklung in der Praxis	168
6	Methode zur Entscheidungsunterstützung.....	171
6.1	Variantenentwicklung im erweiterten ZHO-Modell.....	172
6.2	Variantenentwicklung in der PGE	178
6.3	Produktanalyse zu gebauten Nockenwellen.....	187
6.3.1	Definition der relevanten, zu kombinierenden Elementtypen	188
6.3.2	Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen	199
6.3.3	Definition der produktspezifischen Assemblierungsregeln	206
6.3.4	Ermittlung der Anforderungsbeziehungen	214
6.3.5	Bestimmung emergenter Bewertungszielgrößen.....	218
6.3.6	Parametrisierung im Kontext der PGE	221
6.4	Entscheidungsunterstützungssystem (VDSS)	222
6.5	Fazit zur Methode zur Entscheidungsunterstützung.....	228
7	Entwicklungswerkzeug zur Entscheidungsunterstützung.....	230
7.1	Softwareprototyp zur Entscheidungsunterstützung	231
7.2	Mehraufwand für ein unternehmensweit einsetzbares Tool	236
7.3	Fazit zum Softwareprototyp.....	239
8	Evaluation der Methode in der industriellen Praxis	241
8.1	Durchführung einer semistrukturierten Interview-Studie.....	242
8.2	Evaluation des Methodenpotentials am Praxisbeispiel.....	250
8.2.1	Retrospektive Methodenanwendung für A-Projekt 1 (PKW).....	251
8.2.2	Retrospektive Methodenanwendung für A-Projekt 16 (NFZ).....	265
8.3	Fazit zur Evaluation des Methodenpotentials	270
9	Zusammenfassung und Ausblick	274
9.1	Zusammenfassung.....	274
9.2	Ausblick.....	281
10	Literaturverzeichnis	285

11 Anhang	296
11.1 Anhang zu Kapitel 5.....	296
11.1.1 Fragen zur Fragebogen-Studie	296
11.1.2 Basisfragebogen	299
11.1.3 Weitere Ergebnisse der Fragebogen-Studie (alle Gruppen)	310
11.1.4 Anmerkungen und Freitextantworten	315
11.1.5 Zielkriterien zur Bewertung der Methodeneignung	317
11.1.6 Tabellenblatt zur Bewertung der Methodeneignung	319
11.1.7 Bewertungsergebnis zur Methodeneignung	320
11.1.8 Weitere Ergebnisse der Fragebogen-Studie (Gruppe 2 und 3)	321
11.2 Anhang zu Kapitel 6.....	323
11.2.1 Zusammenhänge von Variationsarten und Variationstypen	323
11.2.2 Beziehungen zwischen Elementklassen und Eigenschaften	324
11.2.3 Geometrieparametrisierung der CAD-Daten	325
11.3 Anhang zu Kapitel 7.....	334
11.3.1 Auszug aus der Kurzübersicht (T11)	334
11.3.2 Datenbasis des Softwareprototyps	336
11.4 Anhang zu Kapitel 8.....	338
11.4.1 Fragebogen zu den semistrukturierten Mitarbeiterinterviews	338
11.4.2 Weitere Ergebnisse der quantitativen Auswertung	341
11.4.3 Methodenrelevante Daten für A-Projekt 1 (PKW).....	342
11.4.4 Ergebnisse der Methodenanwendung für A-Projekt 1 (PKW).....	344
11.4.5 Methodenrelevante Daten für A-Projekt 16 (NFZ)	346
11.5 Ergänzungen zum Glossar der KaSPro	348
11.6 Formenzeichen und Abkürzungen	348

1 Einleitung

Die globale Wettbewerbssituation in der Automobilindustrie fordert von den Automobilherstellern eine permanente Anpassung der Produktentstehungsprozesse an die aktuellen Herausforderungen. Diese ergeben sich aus den steigenden Kundenanforderungen, der zunehmenden Komplexität der Produkte, verkürzten Modellzyklen, dem Markteintritt von Wettbewerbern aus Fernost sowie gestiegenen gesetzlichen Umweltauflagen und dem zunehmenden Umweltbewusstsein der Endkunden.² Um die anspruchsvollen Kundenanforderungen und damit die Nachfrage nach kundenindividuellen Lösungen befriedigen zu können, haben viele Automobilhersteller begonnen, ihre Produktpalette zu erweitern. Als Folge daraus stieg die Variantenvielfalt im Fahrzeugbau im Zeitraum zwischen 1995 und 2005 um mehr als 400 Prozent, und die Zahl der Sonderausstattungen zwischen 1985 und 2005 um mehr als 200 Prozent.³

Die in vielen Bereichen gestiegenen Produktkomplexitäten in Verbindung mit einer notwendigen Erhöhung der Variantenvielfalt zur Abdeckung der zunehmenden Forderung nach kundenindividuellen Lösungen, haben direkte Auswirkungen auf die Produktentstehungsprozesse in der automobilen Zulieferindustrie, die im Falle einer Angebotsanfrage durch einen Automobilhersteller in der Lage sein muss, innerhalb der geforderten Fristen ein Angebot zu erstellen. Hinzu kommt, dass die Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Zulieferer einem deutlichen Wandel unterliegt, da die Automobilkonzerne versuchen mehr Systemverantwortung an deren Zulieferer zu übertragen.⁴ Dieser Trend lässt sich auch aus Sicht des fallgebenden Zulieferunternehmens für Ventiltriebkomponenten beobachten. In den vergangenen zehn Jahren konnte der Autor in seiner Tätigkeit als Konstruktionsingenieur⁵ eine stetig steigende Nachfrage der Automobilhersteller nach einbaufertigen Systembaugruppen beobachten, die direkt in Form von vormontierten Modulen an das Montageband beim Hersteller angeliefert werden.⁶ Die Studie FAST 2025 prognostiziert bis zum Jahr 2025 eine weitere Verschiebung von Wertschöpfungsanteilen und damit von Systemver-

² vgl. Schömann 2012

³ vgl. Becker 2005 S. 110

⁴ vgl. Becker 2005 S. 167 ff.

⁵ vgl. acatech 2012: Grundsätzlich führen verschiedene Bildungswege zum Beruf des Konstrukteurs. Im Falle des Autors basiert dieser auf einem Ingenieurstudium. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Einfachheit wegen der übergeordnete Begriff „Konstrukteur“ verwendet. Moderne Konstrukteure gestalten Systeme und kennen und berücksichtigen die Wechselwirkungen mit Sub- und Supersystemen. Für ihre Konstruktionstätigkeit benötigen sie das Verständnis für das Gesamtsystem und werden deshalb in dieser Arbeit als Systemkonstrukteure verstanden.

⁶ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

antwortung von den Herstellern auf die Zulieferunternehmen.⁷ Daneben erfordert die Entwicklung des Marktes noch stärker die Realisierung kundenindividueller Anforderungen, was sich in einer weiteren Forcierung der Vielfalt an Fahrzeugmodellen äußert. In den 90er-Jahren konnten Automobilhersteller wie Audi, BMW oder Mercedes-Benz die Kundenbedarfe noch mit 7 bis 8 Modellen abdecken, wohingegen sich die Zahl bis heute verdreifacht hat. Gleichzeitig sinken die Produktlebenszyklen weiter und erhöhen den Kostendruck sowie die Komplexität der unternehmensinternen Strukturen und Prozesse. Mit dieser Entwicklung müssen sich in besonderem Maße die Zulieferfirmen auseinandersetzen, denn die wachsende Nachfrage der Hersteller nach einbaufertigen Systembaugruppen führt zu einer Steigerung des organisatorischen und konstruktiven Aufwandes, da diese Forderung direkte Auswirkungen auf das Design der Bauteile mit sich bringt.⁸

Aufgrund des hohen Zeit- und Kostendruckes auf dem hart umkämpften Zuliefermarkt muss in der Angebotsphase⁹ häufig auf bereits bestehende Lösungen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten zurückgegriffen werden, die auf die Herstelleranfrage gegenüber den Referenzprodukten angepasst und neu kombiniert werden. Dabei sind in vielen Fällen mehrere abgeleitete Varianten auf Basis bestehender Bauteile und Bauteileigenschaften erforderlich, um die nötige Entscheidungsgrundlage für eine fundierte Lösungsauswahl zu schaffen. Der effizienten Auswahl der kunden- und anbiertergerechten Produktlösungen kommt dabei eine sehr hohe Bedeutung zu. Um konkurrenzfähig am Markt zu sein, müssen aufgrund der harten Wettbewerbssituation zusätzliche Iterationen durch Unsicherheiten¹⁰ bei der Konzeptentwicklung¹¹ in der Angebotserstellung minimiert werden.

Zur besseren Verdeutlichung der Problemstellung aus Sicht der automobilen Zulieferindustrie zeigt die folgende Abbildung 1-1 ein Beispielszenario eines Variantenauswahlprozesses. Häufig werden hierbei mehrere Varianten konstruiert, um die Sicherheit für die Auswahl der kunden- und anbiertergerechten Varianten zu steigern. Daher können durch die Unterstützung bei der Auswahl der richtigen Variante Konstruktionskapazitäten eingespart werden. Der Abstraktionsgrad ist derart gewählt, dass sich der aufgezeigte Prozess generisch auf eine Vielzahl von Zulieferunternehmen in der Automobilindustrie übertragen lässt. Auf der Seite des Zulieferunternehmens (ZUL) sind die Bereiche Vertrieb, Projektleitung, Konstruktions- und Kalkulationsabteilung unmittelbar an der Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotsphase beteiligt.

⁷ vgl. Oliver Wyman & VDA 2012

⁸ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

⁹ vgl. Definition 2-4: Angebotsphase in der PGE - Produktgenerationsentwicklung (S. 57)

¹⁰ vgl. Ebel 2015 S. 29 ff.

¹¹ vgl. Verständnis der Konzeptentwicklung als Teil der Angebotsphase (S. 58)

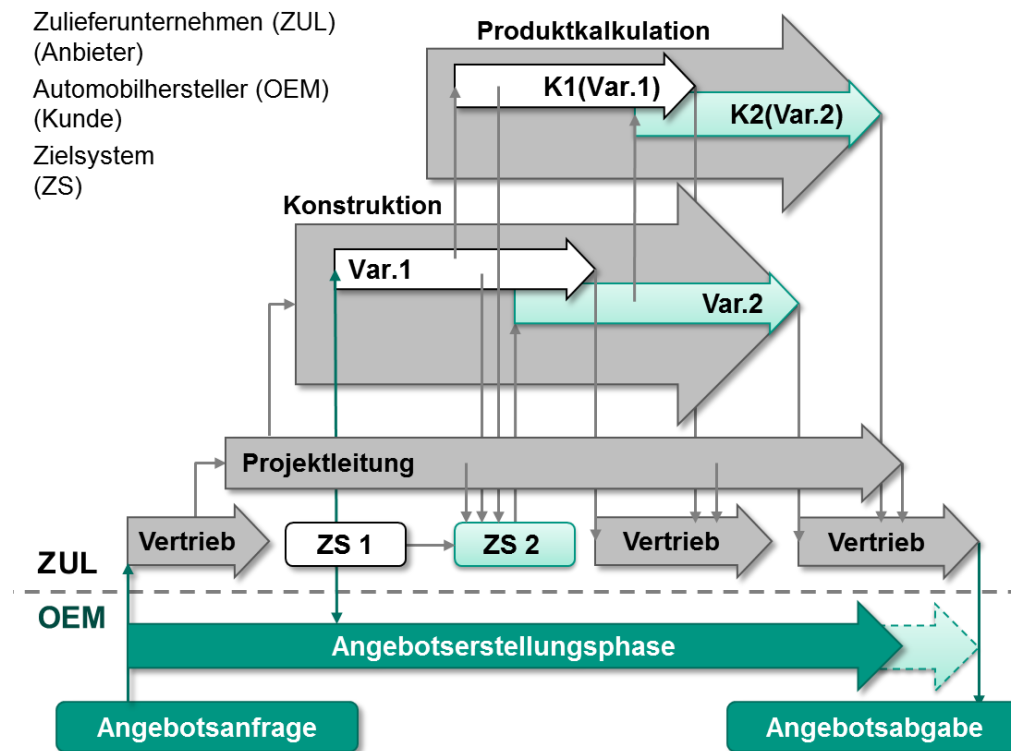


Abbildung 1-1: Schematischer Variantenauswahlprozess in der Angebotsphase¹²

Die Anfrage durch den Kunden (Automobilhersteller¹³) wird aus Sicht des fallgebenden Zuliefererunternehmens vom Vertrieb an die zuständigen Produktexperten der Projektleitung übermittelt, die eine erste grundlegende Prüfung der vorliegenden Informationen zur Angebotsanfrage vornehmen. Die vom Vertrieb protokollierten, kundenseitigen Informationen beinhalten neben den produktspezifischen Hauptkenngrößen auch allgemeine Informationen zum Projekt und den Projekthintergründen, den geforderten Stückzahlen über die Produktlaufzeit und den daran geknüpften Zielpreisen für das Serienprodukt, den Produktionsort des Kunden sowie die Haupttermine, wie beispielsweise der Angebotsabgabe, der Bereitstellung von ersten Musterteilen und dem SOP¹⁴. Der Datenstand in diesem Protokoll dient zudem als Grundlage für die Freigabe der Aktivitäten zur Erstellung eines Angebotes durch die Managementebene. An dem internen Termin zur Projektfreigabe sind neben dem Management und dem Vertrieb auch Vertreter aus den Entwicklungsbereichen und den produzierenden Werken erforderlich. Bei einer Entscheidung für die Erstellung eines Angebotes wird in der Konstruktionsabteilung die Machbarkeit der Kundenanfrage untersucht, indem die Kundenanforderungen mit den unternehmensspezifischen Standards abgeglichen werden. Da der gewährte Zeitraum für die Erstellung des Ange-

¹² Darstellung in Anlehnung an Walch & Albers 2014

¹³ Der Kunde kann aus Sicht des fallgebenden Zuliefererunternehmens für Motorkomponenten auch ein durch den Automobilhersteller beauftragter Motorenhersteller sein.

¹⁴ Beginn der Serienproduktion: (engl.) Start of Production (SOP) oder auch „Job No. 1“

bots oft sehr eng bemessen ist, sind die Zulieferunternehmen bestrebt zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase in wechselseitiger Absprache zwischen der Projektleitung, der Konstruktionsabteilung und dem Kunden ein erstes Zielsystem zu definieren (ZS1 in Abbildung 1-1), das in expliziter Form die kunden- und anbieterseitigen Ziele, inklusive deren Begründungen, wechselseitigen Abhängigkeiten und Randbedingungen¹⁵, beinhaltet. Auf Basis des aktuellen Zielsystems (ZS1) wird mit der Konstruktion der ersten Variante (Var.1 in Abbildung 1-1) begonnen. Für stark kundenspezifische und damit hochgradig individualisierte Produkte ist für die Kostenkalkulation häufig ein kompletter Zeichnungssatz, bestehend aus den Einzelteilzeichnungen für Roh- und Fertigteile sowie den Bearbeitungs- und Zusammenbauzeichnungen, zur Abbildung der Fertigungsabfolge, notwendig. Die Unsicherheit darüber, ob die derzeit favorisierte Variante am Ende zielführend für den Auftrag sein wird, muss häufig gerade bei komplexeren Baugruppen in Kauf genommen werden, damit den produzierenden Werken für deren Aktivitäten zur Erstellung der Produktkalkulation noch ausreichend Zeit bleibt. Deshalb wird die Produktkalkulationsabteilung in den Produktionswerken frühzeitig mit in den Konstruktionsprozess eingebunden, um die Herstellung des Produktes abzustimmen und hierfür die erforderlichen Zeichnungsstände mit möglichst wenigen Iterationen zu erstellen. Die Grundlage hierfür bildet die im jeweiligen Produktionsstandort angefertigte Prozessmachbarkeit zur Herstellbarkeit des Produktes, die auf der zuvor bereits erstellten Produktmachbarkeit basiert.

Während des Konstruktionsprozesses kann jedoch der Fall eintreten, dass mit zunehmendem Reifegrad der Konstruktion die anfängliche Unsicherheit weiter zunimmt. Ein Grund hierfür ist der Konflikt, dass sich gerade bei umfangreicheren Baugruppen relevante Bewertungszielgrößen (Bauteilmassen, Massenträgheiten, Steifigkeitskennwerte, Herstellkosten, etc.) nicht auf Subsystemebene sondern erst auf Gesamtsystemebene im Rahmen einer gültigen Bauteilkombination ergeben und somit zum Zeitpunkt der Variantenauswahl noch nicht zur Verfügung stehen. Deshalb wird vielfach in Abstimmung zwischen Konstruktion, Projektleitung und Produktionswerk eine weitere, interne Variante (Var.2 in Abbildung 1-1) mit einem neuen Zielsystems (ZS2) parallel zur ursprünglichen Variante konstruiert, um sich eine weitere Lösungsmöglichkeit bis zum finalen Entscheid offen zu halten. Dadurch werden aber nicht nur in der Konstruktionsabteilung, sondern eben auch in den an der Kalkulation des Produktes beteiligten Abteilungen sowie im Vertriebsbereich, der die ermittelten Bewertungszielgrößen zur Einbindung in das Kundenangebot aufbereiten muss, zusätzliche Kapazitäten gebunden. Der erforderliche Detaillierungsgrad der beiden Varianten für eine fundierte, kostenseitige Bewertung des späteren Serienproduktes, ist

¹⁵ vgl. Albers & Braun 2011a und Ebel 2015 S. 65

dabei hoch. In dem gezeigten Beispiel ist die Variante 2 (Var.2) für den aktuellen Auftrag als die zielführende Lösung bewertet worden. Der Abgabetermin liegt jedoch außerhalb der geforderten Frist, so dass rechtzeitig mit dem Kunden ein Aufschub des Abgabetermins verhandelt werden muss. Eine frühzeitige, methodengestützte Identifizierung der Variante 2 (Var.2) als die zielführende, kunden- und anbiertgerechte Lösung, hätte im vorliegenden Beispiel entsprechend Abbildung 1-2 zu einem zeitlichen Potential und damit zu einer fristgerechten Angebotsabgabe geführt.¹⁶

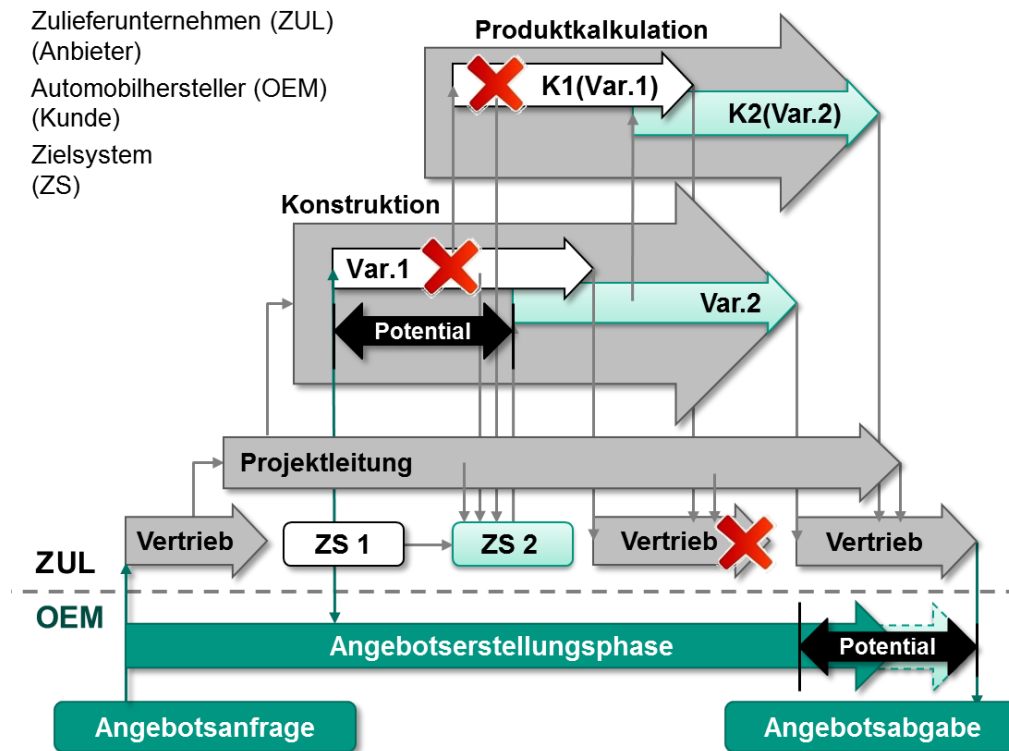


Abbildung 1-2: Zeitpotential am Beispiel des schematischen Variantenauswahlprozesses

Das in Abbildung 1-2 aufgeführte Beispiel zeigt schematisch eine unternehmensintern begründete, zusätzliche Variantenbildung. Daneben gibt es häufig auch unvorhersehbare Änderungen auf Kundenseite, auf die aus Sicht der Zuliefererentwicklungsmethodisch kaum Einfluss genommen werden kann. Diese Änderungen haben mitunter erhebliche Auswirkungen auf das Zielsystem der aktuellen Variante, so dass im ungünstigsten Fall keine bereits geleisteten Vorarbeiten übernommen werden können.¹⁷

Zur besseren Verdeutlichung der Bedarfssituation zeigt Abbildung 1-3 die prozentuale Verteilung der Konstruktionsaufwände auf die Phasen der Angebotserstellung, der Produkt- und Prozessentwicklung, auf die Produktionsvorbereitungsphase sowie die

¹⁶ vgl. Walch & Albers 2014

¹⁷ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

Phase des Serienanlaufs. Die Phasen orientieren sich dabei am Produktentstehungsprozess des fallgebenden Zulieferunternehmens für Motorkomponenten. Die dargestellte prozentuale Verteilung auf die vier Projektphasen basiert auf der Anzahl an neuerstellten Zeichnungen und Modelle für Einzelteile, Fertigungsstände und Baugruppen sowie der Anzahl an Modell- und Zeichnungsänderungen. Diese Konstruktionsaktivitäten wurden für sieben abgeschlossene Serienentwicklungsprojekte für gebaute Nockenwellen¹⁸ recherchiert und gemittelt.¹⁹

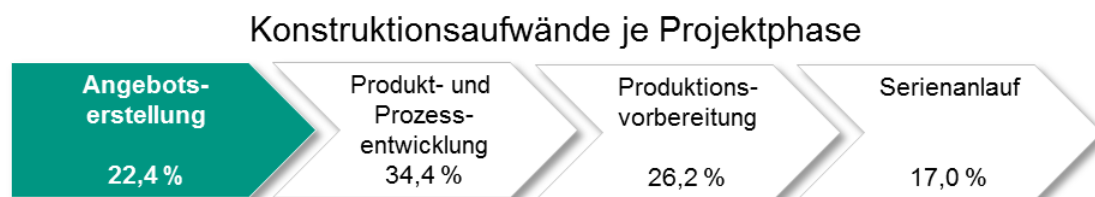


Abbildung 1-3: Gemittelte Konstruktionsaufwände je Projektphasen basierend auf sieben abgeschlossenen Serienprojekten für gebaute Nockenwellen²⁰

Die Abbildung 1-3 zeigt, dass im Mittel 22,4% der Konstruktionsleistung bereits in der Angebotsphase anfällt. Da nicht immer ein Serienzuschlag erteilt wird kommt der Wirtschaftlichkeit der Angebotserstellung eine große Bedeutung zu. Hier knüpft die Grundannahme der vorliegenden Arbeit an, dass die Effizienz der Angebotsphase durch Minimierung vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten gesteigert werden kann.

1.1 Fokus der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die Konstrukteure²¹ bei der Variantenauswahl auf Basis bestehender Referenzprodukte unterstützt. Der Fokus liegt damit auf der Analyse eines bestehenden Baukastens, d.h., der Baukasten wird durch die Methode nicht um neue Elemente erweitert. Vielmehr werden die aktuell zur Verfügung stehenden Elemente des Baukastens²² auf deren Eignung für neue Kundenanforderungen im Rahmen abgeleiteter Varianten geprüft. Hierzu werden die Baukastenelemente für neue Anfragen variiert und neu kombiniert. Zur Berücksichtigung der Firmenexpertise bei der Variantenauswahl werden die variantenspezifischen Anteile an Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation im Kontext der PGE -

¹⁸ vgl. Leitbeispiel gemäß Abbildung 1-5 auf S. 10

¹⁹ siehe Details in Kapitel 5.2

²⁰ vgl. Albers, Walch & Bursac 2016

²¹ Unter „Konstrukteur“ wird gleichermaßen auch „Konstrukteurin“ verstanden und stets mitgedacht. Der besseren Lesbarkeit wegen, wird jedoch in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Generisches Maskulinum: Verwendung der maskulinen Form für weibliche und männliche Personen (Duden-Online, <http://www.duden.de/rechtschreibung/generisch>, 02.09.2015, 9:00 Uhr)

²² vgl. Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015 und Bursac 2016 S. 48 ff.

Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS²³ mit in die Entscheidungsunterstützung einbezogen.²⁴ Die Entscheidung für ein Produktkonzept im Rahmen der Konzeptentwicklung basiert dann für die konkrete Kundenanfrage auf der Auswahl aus einer Menge an gültigen, abgeleiteten Varianten eines Baukastens.

Die Herausforderung bei der Variantenauswahl liegt dabei an dem Konflikt, dass sich Zielgrößen, wie z.B. Masse, Steifigkeit und Kosten, nicht auf Teilsystemebene der Baukastenelemente ermitteln lassen, sondern sich erst auf Gesamtsystemebene der abgeleiteten Varianten ergeben. Demnach erfordert die Ermittlung derartiger Bewertungszielgrößen eine iterative Beschreibung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Variantenauswahl (VDSS, engl. Variant Decision Support System).²⁵

In dieser Arbeit wird als **wissenschaftliches Erklärungsmodell** das erweiterte ZHO-Modell verwendet, das auf dem ZHO-Modell der Systemtechnik nach ROPHIL²⁶ aufbaut. Der systemtechnische Ansatz basiert auf der Allgemeinen Systemtheorie und beschreibt Produktentstehung durch drei miteinander wechselwirkender Systeme, dem Ziel-, Handlungs- und Objektsystem. Produktentstehung lässt sich hiermit als Überführung eines anfänglich vagen Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch das Handlungssystem beschreiben.²⁷ ALBERS, LOHMEYER & EBEL erweitern das Handlungssystem um die Subsysteme Wissensbasis und Lösungsraum und ermöglicht so eine detailliertere Betrachtung der Interaktion menschlichen Denkens und Handelns im System der Produktentstehung.²⁸ Das systemtechnische Modell stellt damit den Menschen in das Zentrum des iterativen Synthese- und Analyseprozesses von Zielsystem und Objektsystem. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode hat den Anspruch, geeignete Varianten für die aktuelle Anfrage zu empfehlen. Entscheiden muss aber letztlich der Entwickler selbst und steht damit im Zentrum der Produktentstehung.²⁹

Thema der Arbeit ist die Variantenentwicklung³⁰ im erweiterten ZHO-Modell im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS mit dem Fokus auf einem existierenden Baukasten. Die wissenschaftliche Ausrichtung der Methode zur Unterstützung der Variantenauswahl fokussiert darauf, wie die Elemente des

²³ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015a

²⁴ vgl. Kapitel zur Produktentwicklung aus Sicht der PGE - Produktgenerationsentwicklung im Stand der Forschung (S. 16 ff.) sowie Ausführungen zur Variantenentwicklung in der PGE in Kapitel 6.2

²⁵ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

²⁶ vgl. Ropohl 2009

²⁷ vgl. Albers 2010 Hypothese 2

²⁸ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012 und Lohmeyer 2013 S. 114 ff.

²⁹ vgl. Albers 2011

³⁰ vgl. Differenzierung zwischen der klassischen Variantenkonstruktion und der Variantenentwicklung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung im Unterkapitel „Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE“ (S. 64 f.)

Baukastens als korrespondierende Paare aus Objekten in Form von CAD-Modellbasen und deren Objektbegründungen zu beschreiben sind, um für neue Kundenanfragen, die mit neuen Zielsystemen beschrieben werden, geeignete Elementkombinationen zu ermitteln. Betrachtet wird dabei konkret die Variantenentwicklung im Rahmen der Angebotsphase unter Berücksichtigung der Randbedingungen, dass die Produkthanforderungen weitestgehend bekannt sind und nur in deren Ausprägungen variieren, und dass durch die Verwendung bestehender Lösungen auf bekannte Lösungsprinzipien zurückgegriffen werden kann. Im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung können in diesem Zusammenhang Varianten als eine Art von Entwicklungsgenerationen verstanden werden, die sich dadurch kennzeichnen, dass die Übernahmevariationsanteile deutlich über den Neuentwicklungsanteilen liegen.³¹ Hierzu belegen empirische Studien, dass über 90% aller Innovationsprojekte in der Produktentstehung auf bekannten Lösungsprinzipien zurückzuführen sind und der Lösungsraum ferner in vielen Bereichen restriktiv vorgegeben ist.³² Obwohl bewährte Lösungsprinzipien eingesetzt werden, stellen deren Neukombination und fallspezifische Gestaltvariation enorme Herausforderungen an die Analyse- und Syntheseprozesse dar und führen vielfach zu hoch komplexen und anspruchsvollen Entwicklungsaufgaben.

Anspruchsgruppe und Anwendungskontext der Ziele

Die Methode zur Variantenauswahl wird in Form eines unternehmensinternen Entwicklungswerkzeugs von Konstrukteuren angewendet und hierzu in die unternehmensspezifische Software- und Prozesslandschaft integriert. Für den Methodeneinsatz und damit der richtigen Interpretation der ermittelten Variantenempfehlungen ist produktspezifisches Erfahrungswissen unabdingbar, was das System zur Entscheidungsunterstützung (VDSS) zu einem Expertensystem macht.

Die Ziele der Arbeit werden im Kontext des fallgebenden, automobilen 1st-tier-Zulieferunternehmens für Motorkomponenten bearbeitet. Das Unternehmen verfolgt mit dem Einsatz eines derartigen Entscheidungsunterstützungssystems (VDSS) eine Effizienzsteigerung in der Angebotsphase, indem Entwicklungsschleifen reduziert werden, die bislang vielfach nötig werden, um zielführende Lösungen im Rahmen der Konzeptentwicklung zu finden. Dabei sollen Entscheidungen bei der Auswahl von Varianten in der Konzeptentwicklung stärker an der Unternehmensexpertise auszurichten werden, um Aufwand, Potential und Risiko variantenspezifisch beurteilen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierzu das Potential einer auf den Variationsanteilen der PGE - Produktgenerationsentwicklung basierenden Entscheidungs-

³¹ vgl. Kap. zum Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE (S. 64 f.)

³² vgl. Albers, Reiß, Bursac, Urbanec & Lüdcke 2014

terstützung im Kontext des fallgebenden 1st-tier-Zulieferunternehmens untersucht. Derartige Systemlieferanten stehen in direktem Kontakt mit ihren Kunden³³ und lassen sich mit Hilfe der Zulieferpyramide gemäß Abbildung 1-4 in der automobilen Wertschöpfungskette typisieren.

Die Lieferanten für einbaufertige Module stehen in der Zulieferpyramide direkt unter dem Hersteller (OEM). Hierbei wird unterschieden in Modullieferanten (1st-tier), die im Allgemeinen eine geringere Entwicklungsleistung, aber eine hohe Montageleistung erbringen. Der Modullieferant fügt die von untergeordneten Zulieferern gefertigten Teile zu einem montagefertigen Modul zusammen und übernimmt dabei die gesamte, logistische Verantwortung. Über dem Modullieferanten steht der Systemintegrator (1st-tier). Hier werden, neben der Montage, zusätzlich wesentliche Teile der Entwicklung für das einbaufertige Modul übernommen. In der Mitte der Hierarchie befindet sich der Systemspezialist, der über hohe technologische Entwicklungskompetenzen und geringe Montageleistung verfügt. Auf unterster Ebene befindet sich der Teile- und Komponentenlieferant (3rd-tier), der sich durch eine relativ geringe Montageleistung und eine geringe Entwicklungsleistung kennzeichnet. Produziert wird hier für gewöhnlich nach genauen Vorgaben des Abnehmers einer höheren Ebene.

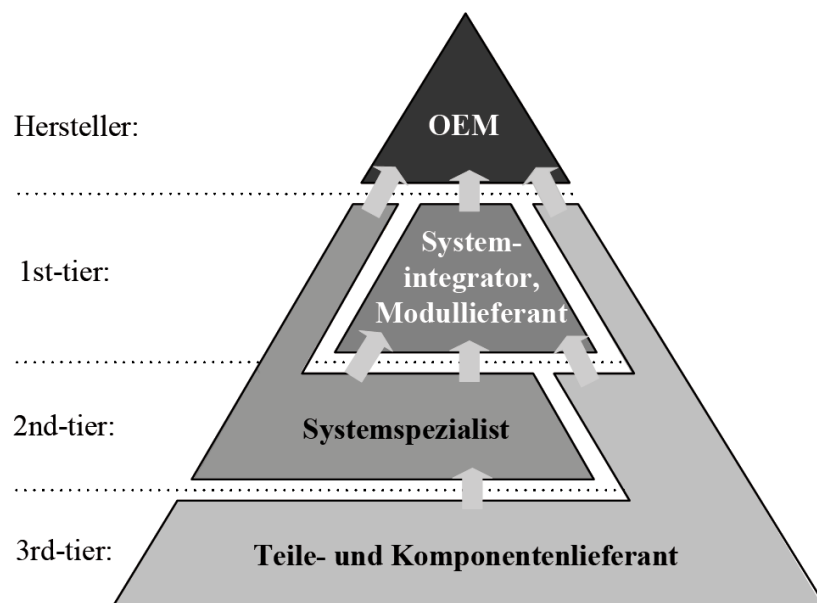


Abbildung 1-4: Zulieferpyramide³⁴

In dieser Arbeit wird mit Bezug auf Abbildung 1-4 aus Sicht eines automobilen 1st-tier-Zulieferunternehmens in der Ausprägung eines Systemintegrators die Problemstellung thematisiert, kunden- und anbiertgerechte Angebote innerhalb der gefor-

³³ Kunde aus Sicht des anbietenden Zulieferunternehmens ist der Hersteller (OEM)

³⁴ vgl. Becker 2005 S. 168

erten Zeiträume zu erstellen. Auf Grundlage der beschriebenen Situation in der Automobilindustrie muss deshalb häufig auf abgeleitete Varianten auf Basis eines bestehenden Baukastens zurückgegriffen werden. Dabei entscheidet häufig die effiziente Anpassung und Neukonfiguration der bestehenden Produkte an die neuen Kundenanforderungen darüber, ob der Zuschlag für einen Serienauftrag erteilt wird.³⁵

Leitbeispiel

Als Leitbeispiel für die in dieser Arbeit beschriebene Methode zur Entscheidungsunterstützung dienen Nockenwellen³⁶, die in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, um den Ladungswechsel³⁷ zu steuern. Hierzu wird die rotatorische Bewegung der Nockenwelle durch entsprechende Nockenprofile in eine oszillierende Bewegung der Nockenfolger³⁸ umgewandelt. Die Folger, wie beispielsweise Kipphebel, Schleppebel, Tassen- oder Rollenstößel, folgen der Nockenerhebungskurve und geben die Bewegung an die Ventile weiter. Konkret werden als Leitbeispiel Nockenwellen in der Ausprägung gebauter Nockenwellen³⁹ gemäß Abbildung 1-5 herangezogen.

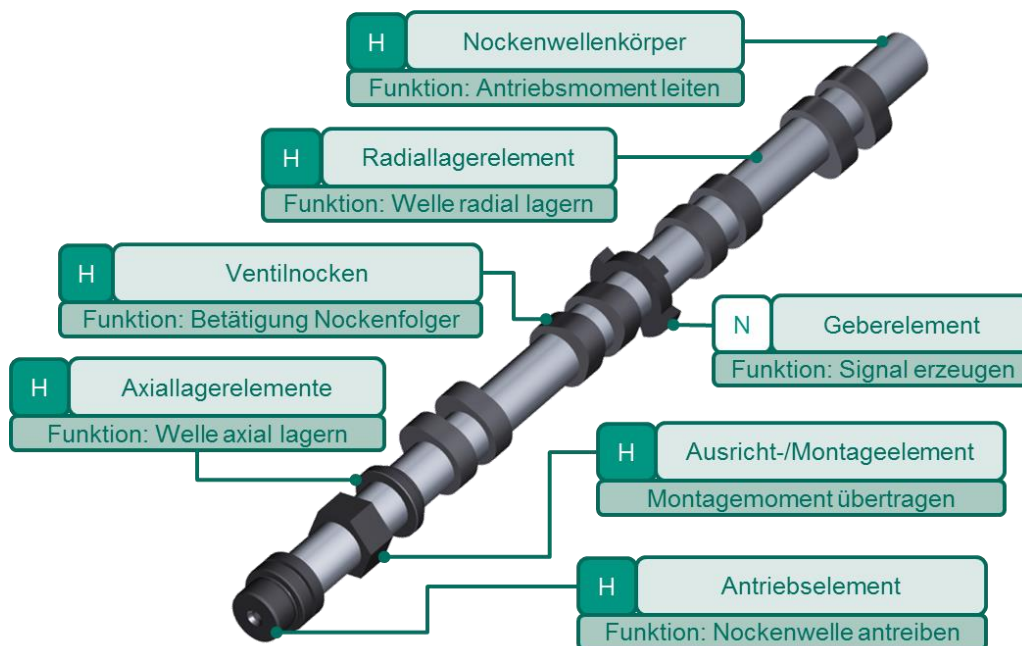


Abbildung 1-5: Beispiel einer modularen Struktur einer gebauten Nockenwelle⁴⁰

Die Abbildung 1-5 zeigt eine mögliche Ausprägung einer gebauten Nockenwelle. Nockenwellen müssen dabei die produktspezifischen Hauptfunktionen (H) erfüllen, die

³⁵ vgl. Walch & Albers 2014

³⁶ vgl. MAHLE 2013 S. 95 ff.

³⁷ Austausch von verbranntem Abgas durch Frischgas

³⁸ vgl. MAHLE 2013 S. 115 ff.

³⁹ vgl. MAHLE 2013 S. 102 ff.

⁴⁰ in Anlehnung an Albers, Walch & Lohmeyer 2012

durch unterschiedliche Komponenten erbracht werden können. Neben diesen Funktionen⁴¹ gibt es auch Nebenfunktionen (N), die von der Nockenwelle im Bedarfsfall übernommen werden können. Grundsätzlich gilt dabei das Verständnis nach ALBERS⁴², dass die Komponenten auf der Welle für sich alleine betrachtet noch keine Funktion besitzen, sondern diese erst in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung erfüllen. Diese Vorstellung wird in dem am IPEK Institut für Produktentwicklung entwickelten Contact and Channel Ansatz (C&C²-A)⁴³ fundiert beschrieben. Die Funktionen technischer Systeme können hierbei immer als Wechselwirkung von Wirkflächenpaaren (WFP) und den diese verbindenden Leitstützstrukturen (LSS) beschrieben werden.⁴⁴ In diesem Kontext können Radiallager Elemente nur in Wechselwirkung mit dem Lagergehäuse (nicht dargestellt in Abbildung 1-5) und, im Falle eines ölgeschmierten Geleitlagers, dem hydrodynamischen Schmierfilm als verbindende Leitstützstruktur die Funktion „Nockenwelle radial lagern“ erfüllen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich entsprechend der Abbildung 1-6 in neun Kapitel.

In **Kapitel 2** werden neben dem relevanten Stand der Forschung auch die notwendigen Grundlagen für das Verständnis der im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Methode zur Entscheidungsunterstützung erläutert. Auf Grundlage der Analyse des Stands der Forschung werden die im Forschungsumfeld etablierten Begrifflichkeiten und Definitionen hinsichtlich deren Gültigkeit im Anwendungskontext der vorliegenden Arbeit diskutiert. Dadurch wird ein einheitliches und durchgängiges Verständnis des verwendeten Vokabulars geschaffen. Zum anderen werden die in dieser Arbeit motivierten Bedarfe und korrespondierenden Forschungslücken herausgearbeitet.

In **Kapitel 3** wird die Gesamtmotivation der Arbeit formuliert, die sich aus den Bedarfen aus der Analyse des Stands der Forschung zusammensetzt. Aus der Motivation leiten sich die Ziele der Arbeit ab, die in der Zielsetzung beschrieben werden.

In **Kapitel 4** wird das gewählte Forschungsdesign vorgestellt und erläutert. Für die Bearbeitung der übergeordneten Ziele werden Hypothesen formuliert, die mit Hilfe korrespondierender Forschungsfragen durch entsprechende Methoden und Vorgehensweisen in den sich anschließenden Kapiteln bearbeitet werden.

⁴¹ vgl. Ebel 2015 S. 10

⁴² vgl. Albers 2010 Hypothese 5

⁴³ vgl. Albers & Sadowski 2014 sowie die Zusammenfassung zum Contact and Channel-Ansatz (C&C²-A) im Stand der Forschung in Kapitel 2.1.1 (S. 19 f.)

⁴⁴ vgl. Matthiesen 2002

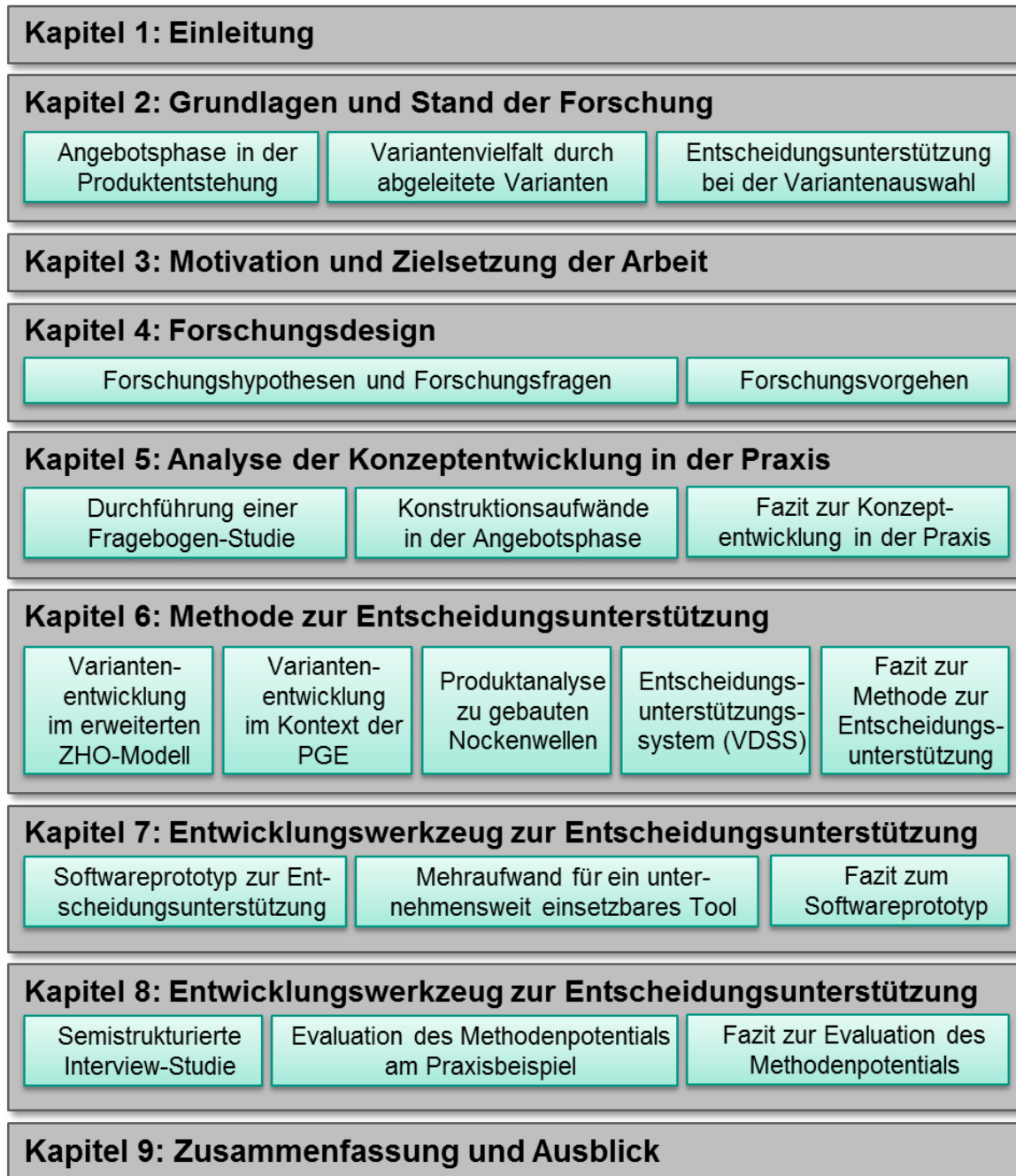


Abbildung 1-6: Aufbau und Struktur der Arbeit

In **Kapitel 5** werden die Bedarfe für eine situationsgerechte⁴⁵ Unterstützung bei der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase aus Sicht von Konstrukteuren aus drei Konstruktionsabteilungen des fallgebenden Zulieferunternehmens mittels einer Fragebogen-Studie untersucht. Ziel ist es, die Sicht der Konstruktionsmitarbeiter im Hinblick auf vermeidbare Iterationen im Rahmen der Konzeptentwicklung in der Angebotserstellungsphase zu erfassen, um daraus Schlüsse hinsichtlich der Bedarfssitua-

⁴⁵ Situationsgerecht bedeutet hier kunden- und anbietersgerecht und unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen (Gesetze, Verordnungen, Normen, etc.)

tion und den Effizienzsteigerungspotentialen zu ziehen. Die Bearbeitung der Arbeitsinhalte in diesem Kapitel dient dazu, die grundsätzliche Berechtigung des Vorhabens aus Sicht des fallgebenden Zulieferunternehmens für Motorkomponenten zu prüfen.

Die Inhalte in **Kapitel 6** orientieren sich an der im vorhergehenden Kapitel ermittelten Bedarfssituation. In diesem Kapitel wird der Variantenauswahlprozess auf Basis des favorisierten, wissenschaftlichen Erklärungsmodells, dem erweiterten ZHO-Modell⁴⁶, beschrieben. Für die Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl aus einer Menge an gültigen, abgeleiteten Varianten, werden für die konstruierten Varianten die Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS bestimmt. Zur besseren Veranschaulichung basiert die wissenschaftliche Methodenbeschreibung sowie die Herleitung der Neuentwicklungs- und Variationsanteile im Kontext der PGE auf dem Leitbeispiel dieser Arbeit, um die Methode aus wissenschaftlicher Sicht und aus Sicht der Praxis gemeinsam zu entwickeln. Die Grundlagen für die wissenschaftliche Methodenbeschreibung und die nachfolgende Operationalisierung der Methode durch einen anwendbaren Softwareprototyp resultieren hierzu aus einer detaillierten Produktanalyse.

Das **Kapitel 7** thematisiert die Umsetzung der wissenschaftlichen Methode in einen anwendbaren Softwareprototyp. In diesem Kapitel werden hierzu der Aufbau und die Vorgehensweise zur Anwendung des Prototyps beschrieben.

Die Anwendung des Prototyps am konkreten Anwendungsbeispiel wird in **Kapitel 8** beschrieben. Zusätzlich wird die Methode mit Blick auf einen zukünftigen Einsatz in der industriellen Konstruktionspraxis durch Experten im Rahmen von semistrukturierten Interviews evaluiert, um das Potential der Methode sowie die Anwenderakzeptanz im Unternehmenskontext zu bewerten.

Kapitel 9 fasst die Arbeit zusammen und zeigt Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten auf.

⁴⁶ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012 und Lohmeyer 2013 S. 114 ff.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und der relevante Stand der Forschung aufgezeigt und diskutiert. Durch die Analyse des Stands der Forschung werden die Bedarfe identifiziert, die diese Arbeit motivieren. Aus der Motivation leiten sich die Ziele ab, die mit Hilfe von Hypothesen und korrespondierenden Forschungsfragen durch entsprechende Vorgehensweisen und Methoden erarbeitet werden.

2.1 Angebotsphase in der Produktentstehung

In diesem Kapitel wird die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase in den Kontext der Produktentstehung eingeordnet. Dabei liegt dieser Arbeit das Verständnis zu Grunde, dass Produkte in Generationen entwickelt werden, weshalb zunächst die PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS⁴⁷ eingeführt wird. Hiernach werden in Kapitel 2.1.2 Modelle zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen vorgestellt, und hinsichtlich der Eignung zur Abbildung der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase diskutiert. Hieraus resultieren die in Kapitel 2.1.3 hergeleitete Definition der Angebotsphase sowie das Verständnis der Konzeptentwicklung für diese Arbeit.

2.1.1 PGE - Produktgenerationsentwicklung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode fokussiert auf die Unterstützung bei der Variantenentwicklung im Rahmen der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase. Die Variantenentwicklung wird dabei im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS verstanden, die in diesem Kapitel eingeführt wird. Dieses Erklärungsmodell beschreibt die Produktentwicklung aus der Perspektive der PGE und stellt dabei eine Weiterentwicklung der klassischen Ansätze aus der Konstruktionsmethodik und dem Innovationsmanagement dar.⁴⁸

Konstruktionsarten der klassischen Konstruktionsmethodik

In der klassischen Konstruktionsmethodik wird nach EHRENSPIEL generell in ein korrigierendes und generierendes Vorgehen unterschieden. Dabei fokussiert das korrigierende Vorgehen darauf, durch hohe Übernahmeanteile bei gleichzeitig geringen Änderungsaktivitäten den Konstruktionsaufwand zu minimieren. Das generierende Konstruieren hat hingegen mehrere neue Lösungen zum Ziel, aus denen ausgewählt

⁴⁷ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

⁴⁸ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

werden kann.⁴⁹ Diese Einteilung wird durch PAHL ET AL. durch die Differenzierung in die Konstruktionsarten Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion ergänzt.⁵⁰

Eine **Neukonstruktion** ergibt sich aus der Verwendung von neuen Lösungsprinzipien oder aus neuen Kombinationen bekannter Prinzipien unter veränderten Randbedingungen, wobei das Entwicklungsteam große Freiheiten bezüglich der Wahl der Mittel zur Umsetzung der Entwicklungsziele genießt.

Eine **Anpassungskonstruktion** setzt das Vorhandensein und die Verwendung bereits bekannter und umgesetzter Lösungsprinzipien unter neuartigen Randbedingungen voraus. Das Entwicklungsziel wird also durch den Einsatz bekannter Mittel auf neue Problemstellungen erreicht. Bei komplexen Konstruktionsproblemen kann darin auch eine partielle Neukonstruktion oder eine Integration von einzelnen Teilsystemen eingeschlossen sein.

Eine **Variantenkonstruktion** liegt vor, wenn unter vergleichbaren Randbedingungen bereits bekannte und umgesetzte Lösungsprinzipien wiederverwendet und auf das vorliegende Entwicklungsziel angepasst werden. In der Mechanik ist die Variation einzelner Parameter wie Abmessungen oder Anordnungen von Bauteilen und Baugruppen charakteristisch für eine Variantenkonstruktion. Ziel ist dabei die Erfüllung quantitativ geänderter Anforderungen bei minimalem Konstruktionsaufwand.

Produktentwicklung aus Sicht des Innovationsmanagements

Nach SCHUMPETER⁵¹ ist eine Innovation dann gegeben, wenn sich eine Invention, d.h., eine Erfindung, erfolgreich am Markt etabliert hat. Darauf aufbauen unterscheiden HENDERSON UND CLARK⁵² vier Arten der Produktinnovation.

Durch begrenzte, konstruktive Änderungsumfänge an Komponenten und deren Beziehungen zueinander, entstehen **inkrementelle Innovationen**, bei denen, neben einem geringen technischen und ökonomischen Risiko, auch das wirtschaftliche Potential vergleichsweise eingeschränkt ist. Inkrementelle Innovationen lassen sich dabei gut planen und steuern. Werden bereits bekannte und etablierte Funktionseinheiten neu konfiguriert, wird dies als eine **architekturellen Innovation** bezeichnet. Neben der Herausforderung, das unternehmensinterne Wissen neu zu strukturieren, können, bei moderaten, technischen Risiken, durch die andersartige Funktionserfüllung durchaus wirtschaftliche Potentiale entstehen. Werden hingegen, unter Beibehaltung der grundsätzlichen Systemstruktur einzelne Funktionseinheiten ausgetauscht, kann hierbei von einer **modularen Innovation** gesprochen werden. Die da-

⁴⁹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 265 ff.

⁵⁰ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007 S. 4

⁵¹ vgl. Schumpeter 1939

⁵² vgl. Henderson & Clark 1990

mit einhergehenden, erhöhten Potentiale zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit sind mit entsprechend erhöhten Risiken verbunden. **Radikale Innovationen** charakterisieren sich hingegen durch einen Austausch technischer Funktionseinheiten und durch eine neue Konfiguration der Systemstruktur. Hierzu muss neues Wissen umfangreich neu generiert oder akquiriert werden. Demzufolge sind Entwicklungsprozesse und Marktpotentiale entsprechend unsicherheitsbehaftet.

Produktentwicklung aus Sicht der PGE - Produktgenerationsentwicklung

Die Hauptvertreter der klassischen Konstruktionsmethodik PAHL ET AL. räumen ein, dass sich in der Konstruktionspraxis die Konstruktionsarten häufig nicht scharf gegeneinander abgrenzen lassen.⁵³ Aus ökonomischen und risikoanalytischen Gründen werden, in Abgrenzung zur klassischen Einteilung, in Entwicklungsprojekten nur die allerwenigsten Produkte komplett neu entwickelt. Vielmehr wird angestrebt, Funktionen und Eigenschaften des neu zu entwickelnden Produktes mit bekannten und etablierten Lösungen bei möglichst geringen Änderungsanteilen zu realisieren.⁵⁴ Nach ECKERT ET AL. sind darüber hinaus Verbesserungen an bestehenden Produkten die am häufigsten durchgeführte Art der Produktentwicklung. Demzufolge wird gerade bei komplexeren Produkten versucht, Übernahmeanteile in Form von zuverlässig funktionierenden Systemen und Teilsystemen aus Referenzprodukten unverändert für das neue Produkt zu verwenden, um Investitionen und potentielle Risiken zu minimieren.⁵⁵ Daneben ergibt sich aus der Einteilung der Produktentwicklung aus der Sicht des Innovationsmanagements die Problematik, dass die Beurteilung, ob sich eine Innovation am Markt aus einer Invention ergeben hat, nur retrospektiv durchgeführt werden kann, so dass die Misserfolge nicht erfasst werden.⁵⁶ Unternehmen müssen demzufolge für ihren Markterfolg dem Zielkonflikt begegnen, einerseits innovative Produkte zu entwickeln, die andererseits jedoch aus ökonomischen und risikoanalytischen Gründen möglichst geringe Anteile an neu entwickelten Teilsystemen beinhalten.⁵⁷

Aus der zuvor geschilderten Perspektive ist die Kategorisierung der Entwicklung eines Produktes als Ganzes im Sinne der klassischen Ansätze der Konstruktionsmethodik und des Innovationsmanagements wenig praktikabel. Mit dem Fokus auf der Entwicklungspraxis in Unternehmen schlägt ALBERS daher sein Erklärungsmodell der PGE - Produktgenerationsentwicklung vor und definiert es wie folgt:⁵⁸

⁵³ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2013

⁵⁴ vgl. Deubzer & Lindemann 2009

⁵⁵ vgl. Eckert, Alink & Albers 2010

⁵⁶ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

⁵⁷ vgl. Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova 2014

⁵⁸ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b und Bursac 2016 S. 38

Definition 2-1: PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS

Die Produktgenerationsentwicklung ist die Entwicklung einer neuen Generation eines technischen Produkts, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation als auch durch eine signifikante Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. Neu entwickelte Anteile technischer Produkte können durch Gestalt- und durch Prinzipvariation realisiert werden. Neue Produktgenerationen basieren immer auf Referenzprodukten, welche die grundsätzliche Struktur beschreiben.

Wie in der Definition 2-1 beschrieben beziehen sich die Entwicklungen neuer Generationen immer auf Referenzprodukte, diese wiederum im Rahmen eigener, unternehmensinterner Produktgenerationsentwicklungen oder auch in denen von Wettbewerbern entstanden sein können. ALBERS definiert diese Referenzprodukte im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung wie folgt:⁵⁹

Definition 2-2: Referenzprodukte im Kontext der PGE nach ALBERS

Referenzprodukte sind bestehende Produkte (z.B. Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte), auf deren Basis neue Produktgenerationen entwickelt werden. Dazu werden teilweise deren Struktur und Teilsysteme übernommen oder als Ausgangspunkt für Variationen zugrunde gelegt.

Durch die PGE wird der Neuheitsgrad eines Produkts nicht nur über die Anzahl neu entwickelter Teilsysteme definiert, sondern ebenso durch Verbesserungen von Funktionen und Eigenschaften bestehender Komponenten und Baugruppen oder einer Erweiterung deren Anwendungsspektren erzielt.⁶⁰ Deshalb gibt es einerseits Funktionseinheiten, die durch Prinzipvariation (PV) mit neuen Lösungsprinzipien realisiert werden, wohingegen andererseits Teilsysteme meist durch Gestaltvariation (GV) unter Beibehaltung der Lösungsprinzipien variiert werden. Innerhalb von Produktgenerationsentwicklungen fällt der Anteil an neu entwickelten Lösungsprinzipien erfahrungsgemäß wesentlich geringer aus als die Neuentwicklungsanteile durch Variation der Gestalt, wobei hieraus gleichermaßen innovative Produkte resultieren können. Daraus ergeben sich im Kontext der PGE die folgenden drei Variationsarten:⁶¹

Die Neuentwicklung von Teilsystemen einer neuen Produktgeneration durch **Prinzipvariation (PV)** kennzeichnet sich dadurch, dass gegenüber den Referenz-

⁵⁹ vgl. Klingler 2017 S. 13 nach Albers, Bursac & Wintergerst 2015a und Bursac 2016 S. 38

⁶⁰ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

⁶¹ nach Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

produkten, die in anderen Kontexten ähnliche Funktionen und Eigenschaften erfüllen, das Lösungsprinzip verändert wird. Die Menge an Prinzipvariation (PS_n) innerhalb der neuen, in der Entwicklung befindlichen Generation (G_n), umfasst derjenigen Teilsysteme (TS), die durch Prinzipvariation ($PV_{(TS)}$) neu entwickelt werden.

$$PS_n\{TS|PV_{(TS)}\} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Die Neuentwicklung durch **Gestaltvariation (GV)** charakterisiert sich dadurch, dass unter Beibehaltung der Lösungsprinzipien von Referenzprodukten die Gestalt variiert wird. Demzufolge umfasst die Menge an Gestaltvariation (GS_n) beim Übergang auf die neue Generation (G_n) diejenigen Teilsysteme (TS), die durch Gestaltvariation ($GV_{(TS)}$) neu entwickelt werden.

$$GS_n\{TS|GV_{(TS)}\} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Im Gegensatz zu den Teilsystemen, die durch Prinzip- und Gestaltvariation neu entwickelt werden, bezieht sich die Anpassung von Teilsystemen durch **Übernahmevariation (ÜV)** auf Teilsysteme von Referenzprodukten, die ohne Variation des Prinzips und der Gestalt durch möglichst geringe, konstruktive Anpassungen an Bauteilschnittstellen in die neue Produktgeneration (G_n) übernommen werden. Die Menge an Übernahmevariation ($ÜS_n$) der neuen Generation beinhaltet diejenigen Teilsysteme (TS), die durch Übernahmevariation ($ÜV_{(TS)}$) angepasst werden.

$$ÜS_n\{TS|ÜV_{(TS)}\} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Die Vereinigung der Mengen der drei Variationsarten überführt ALBERS in ein mathematisches Modell zur Definition der neuen Produktgeneration (G_n).⁶²

$$G_n = ÜS_n \cup GS_n \cup PS_n \quad \text{Gl. 2-4}$$

Daraus ergeben sich die Anteile der Variationsarten (δ) wie folgt:

$$\delta_{ÜV_n} = \frac{|ÜS_n|}{|G_n|} = \frac{|ÜS_n|}{|ÜS_n \cup GS_n \cup PS_n|} [\%] \quad \text{Gl. 2-5}$$

$$\delta_{GV_n} = \frac{|GS_n|}{|G_n|} = \frac{|GS_n|}{|ÜS_n \cup GS_n \cup PS_n|} [\%] \quad \text{Gl. 2-6}$$

$$\delta_{PV_n} = \frac{|PS_n|}{|G_n|} = \frac{|PS_n|}{|ÜS_n \cup GS_n \cup PS_n|} [\%] \quad \text{Gl. 2-7}$$

⁶² nach Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

Zur Klassifizierung der drei Konstruktionsarten kann der Contact and Channel-Ansatz (C&C²-A) der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung nach ALBERS verwendet werden.⁶³ Hierzu wird der Ansatz nachfolgend kurz beschrieben.

Contact and Channel-Ansatz (C&C²-A)

Der Contact and Channel-Ansatz (C&C²-A)⁶⁴ verbindet durch Funktionsgestaltelemente die abstrakte Funktionsbeschreibung mit der konkreten Gestaltbeschreibung. Als Funktionsgestaltelemente werden Wirkflächenpaare (WFP, engl. Contact), Leitstützstrukturen (LSS, engl. Channel) und Konnektoren (C, engl. Connector) verwendet. Am Beispiel einer Schraube und der Funktion „Schraube in die Wand drehen“ ist hierzu die Verwendung dieser Elemente in Abbildung 2-1 exemplarisch dargestellt.

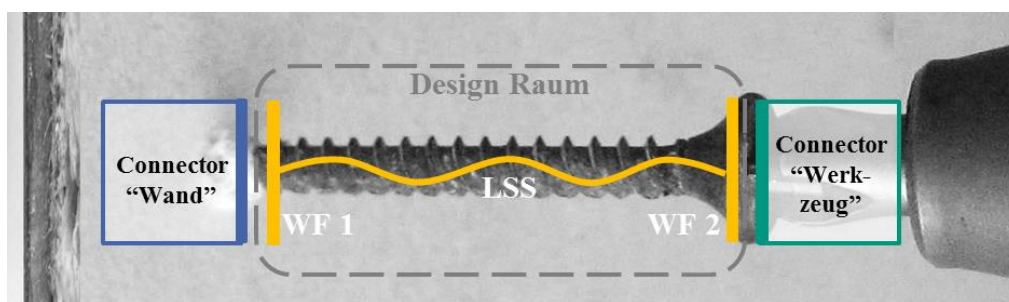


Abbildung 2-1: Beispiel einer mit dem C&C²-Ansatz modellierten Schraube⁶⁵

Mit Hilfe dieses Ansatzes kann die Analyse der abstrakten Funktion anhand der konkreten Gestalt und die Synthese durch Hinzufügen und Entfernen von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen zur konkreten Gestalt unterstützt werden. Zur Einbindung des betrachteten Systems in seine Systemumgebung, werden an den Systemgrenzen Konnektoren angebracht und, wie im Schraubenbeispiel die Schraube zwischen Wand auf der einen und Werkzeug auf der anderen Seite, mit den vorhandenen Wirkflächen verknüpft.

Dieser Ansatz kann die Einteilung in die Variationsarten der PGE - Produktgenerationsentwicklung wie folgt unterstützen:⁶⁶

- Das Hinzufügen und Weglassen scheint ein Indiz für Prinzipvariation zu sein.
- Die Änderung von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen scheint auf eine Variation der Gestalt hinzuweisen.
- Die Änderung an den Konnektoren scheint eine Übernahmevariation anzuzeigen.

⁶³ vgl. Albers, Walch & Bursac 2016 und Kapitel 6.2

⁶⁴ vgl. Albers & Sadowski 2014 und Matthiesen 2002

⁶⁵ vgl. Albers, Gladysz, Kniel, Aschoff & Meyer 2016; Albers & Sadowski 2014

⁶⁶ vgl. Albers, Walch & Bursac 2016, Bursac 2016 S. 38 f. und Kapitel 6.2

Die Fragestellung, auf welcher Grundlage die Klassifizierung in die Variationsarten der PGE durchgeführt werden kann, wird, neben der vorliegenden Arbeit, auch Thema künftiger Forschungsarbeiten sein.

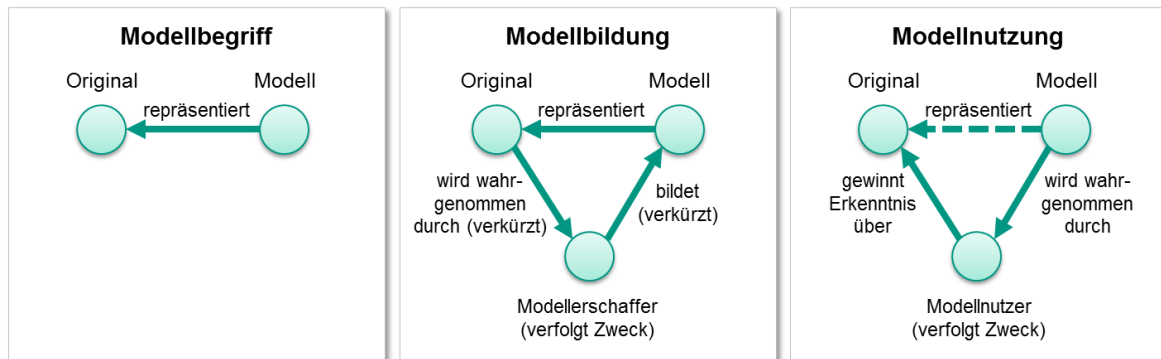
2.1.2 Modellierung von Produktentstehungsprozessen

Um Produkte erfolgreich am Markt anbieten zu können, muss einerseits der Kundennutzen aber gleichermaßen auch der Nutzen aus Sicht des anbietenden Unternehmens unter Berücksichtigung der Wettbewerbssituation des betrachteten Marktsegmentes sichergestellt werden. Für die Umsetzbarkeit der Kundenanforderungen in verkaufsfertige Produkte müssen zudem die Randbedingungen des eigenen Unternehmens mit Bezug auf verfügbare Kapazitäten und Ressourcen sowie hinsichtlich der unternehmensintern vorhandenen Expertise für die angefragten Produkte und die hierzu erforderlichen Produktionssysteme mit in die Betrachtung einbezogen werden. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, geben Modelle von Produktentstehungsprozessen Entwicklern methodische Hilfestellung bei der Organisation der Aktivitäten der Produktentstehung innerhalb einer Gesamtprozessstruktur. Für das Verständnis der in diesem Kapitel aufgeführten Ansätze zur Modellierung von Produktentstehungsprozessen sind Grundlagen der Allgemeinen Modell- und Systemtheorie erforderlich, die nachfolgend kurz erläutert werden.

Grundlagen der Modelltheorie

Die Allgemeine Modelltheorie nach STACHOWIAK definiert drei Hauptmerkmale des allgemeinen Modellbegriffs, das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal.⁶⁷ Diese Präzisierung des Modellbegriffs erlaubt insbesondere die Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Modell, Modellerschaffer und Modellnutzer. Hierzu beschreibt das **Abbildungsmerkmal**, dass Modelle stets Abbildungen und damit Repräsentationen von natürlichen oder künstlichen Originalen sind. Diese Abbildungen können dabei wiederum selbst Modelle darstellen. Dabei können die Originale natürlicher, technischer, symbolischer, imaginärer oder physischer Art sein. Das **Verkürzungsmerkmal** verdeutlicht, dass das Modell im Allgemeinen nicht über alle Attribute des Originals verfügt. Das Modell beinhaltet diejenigen Attribute, die aus Sicht des Modellerschaffers oder auch des Modellnutzers als relevant deklariert werden. Das Verkürzungsmerkmal bindet damit entsprechend Abbildung 2-2 den Menschen als Erschaffer und Nutzer des Modells mit in Beschreibung des Modellbegriffs ein.

⁶⁷ vgl. Stachowiak 1973 S. 128 ff.

Abbildung 2-2: Modellbegriff, Modellbildung und Modellnutzung⁶⁸

Der Modellerschaffer nimmt das Original subjektiv wahr und fokussiert dabei kontextabhängig auf die für ihn relevanten Attribute. Dabei entsteht eine verkürzte und demzufolge reduzierte Beschreibung des Originals. Diese Reduktion der Realität bildet das grundlegende Merkmal der Modelltheorie.

Das **pragmatische Merkmal** bezieht sich auf die Anwendbarkeit und den Zweck der Modellbildung. Entsprechend Abbildung 2-2 verfolgt die Repräsentation des Originals durch ein verkürztes Modell den Zweck durch dessen Nutzung neue Erkenntnisse zu gewinnen. Dabei erfüllen die Modelle ihre Ersetzungsfunktion unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen für bestimmte Subjekte und innerhalb bestimmter Zeitintervalle.

Grundlagen der Systemtheorie

Das heutige Systemverständnis beruht auf der Ende der 1940er-Jahre begründeten Allgemeinen Systemtheorie von BERTALANFFY.⁶⁹ In seiner Systemtheorie präzisiert er den Begriff der Ganzheitlichkeit aufgrund seiner Erkenntnis, dass die Eigenschaften und Verhaltensweisen höherer Systemebenen nicht durch einfache Summation der Eigenschaften und Verhaltensweisen derer Bestandteile zu erklären sind, solange die Bestandteile isoliert voneinander betrachtet werden. Vielmehr können erst durch die Kenntnis der Relationen zwischen den einzelnen Bestandteilen diese genutzt werden, um höhere Ebenen abzuleiten. Gemäß dem Verständnis von BERTALANFFY umfasst der Begriff der Ganzheitlichkeit die Summe der Einzelbestandteile inklusive deren Relationen untereinander. PULM greift diese von BERTALANFFY begründete **Emergenz der Systemeigenschaften** auf und definiert, dass emergente Produkteigenschaften nicht auf Grundlage der Systemelemente, sondern nur auf der betrachteten Systemebene erklärbar werden.⁷⁰ Ferner stellt PULM in seiner Forschung her-

⁶⁸ vgl. Lohmeyer 2013 S. 17

⁶⁹ vgl. Bertalanffy 1949

⁷⁰ vgl. Pulm 2004 S. 19

aus, dass, obwohl sich die Systemtheorie als disziplinübergreifend betrachtet, die Systemtheorie stets auf eine konkrete Disziplin ausgerichtet wird und damit immer eine kontextabhängige Ausprägung erfährt. Dies erschwert es eine disziplinäre, praktisch nicht vorkommende Systemtheorie von einer Allgemeinen Systemtheorie zu unterscheiden.⁷¹ Für die spezifische Ausprägung hat sich hieraus Anfang der 1960er-Jahre der Begriff des **Systems Engineering** in den Ingenieurwissenschaften etabliert.⁷² Ende dieses Jahrzehnts verfasst BERTALANFFY seine **General Systems Theory**⁷³, die das zusammenfassende Schlüsselwerk für das heutige Verständnis von Systemen darstellt.⁷⁴ Auf Grundlage der Allgemeinen Systemtheorie stellt ROPHOL heraus, dass der Systembegriff ein hierarchisches, struktureles und funktionales Systemkonzept entsprechen der nachfolgenden Abbildung 2-3 umfasst.⁷⁵

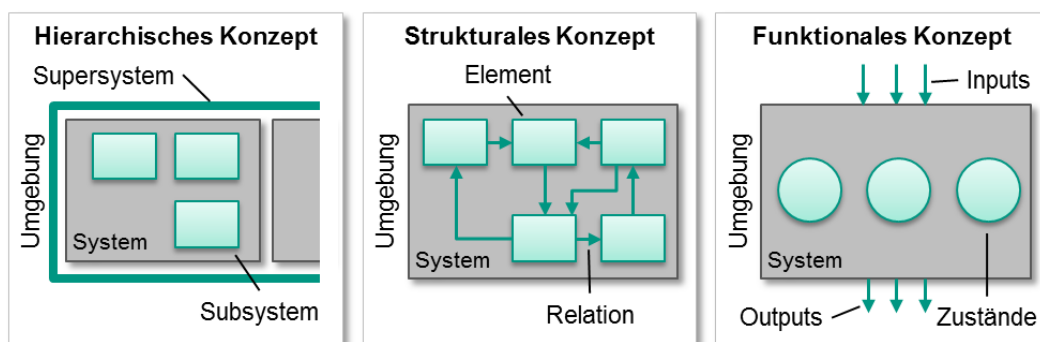


Abbildung 2-3: Konzepte der Systemtheorie⁷⁶

Mit dem **hierarchischen Systemkonzept** wird verdeutlicht, dass die Systemelemente als Subsysteme eines Systems verstanden werden können. Die Systeme können wiederum selbst Teil eines Supersystems sein. Um auf der einen Seite Erkenntnisse hinsichtlich einer detaillierten Erklärung des Systems zu erlangen und auf der anderen Seite Erkenntnisse zum tieferen Verständnis der Systembedeutung zu erhalten, kann das System in mehreren Hierarchiestufen betrachtet werden. Für die erste Erkenntnisstrategie wird die Hierarchie abwärts bewegt, für die zweite aufwärts.⁷⁷

Das **strukturele Systemkonzept** betrachtet die Systemelemente inklusive der unter ihnen bestehenden Verknüpfungen und beschreibt damit, dass zur Erfassung der Ganzheit eines Systems neben der Summe der Elemente auch die Summe der unter ihnen bestehenden Relationen zu berücksichtigen ist. Mit diesem Systemkonzept

⁷¹ vgl. Pulm 2004 S. 22 f.

⁷² vgl. Hall 1963

⁷³ vgl. Bertalanffy 1969

⁷⁴ vgl. Lohmeyer 2013 S. 14

⁷⁵ vgl. Ropohl 2009 S. 70 ff.

⁷⁶ vgl. Ropohl 2009 S. 76

⁷⁷ vgl. Ropohl 2009 S. 77

lässt sich die Emergenz von Systemeigenschaften erklären, die sich auf Basis vielfältiger Beziehungsnetze zwischen den Elementen auf Systemebene ergeben.⁷⁸

Das **funktionale Systemkonzept** fokussiert auf das Verhalten des Systems ohne Berücksichtigung des inneren Systemaufbaus. Mit diesem Konzept werden Systemzustände beschrieben und wie das System durch Input- und Output-Größen mit seiner Umgebung interagiert.⁷⁹

Diese drei Systemdeutungen rücken unterschiedliche Systemaspekte in den Mittelpunkt der Betrachtung. Dabei schließen sich diese drei Konzepte gegenseitig nicht aus sondern können entsprechend Abbildung 2-3 kombiniert eingesetzt werden.

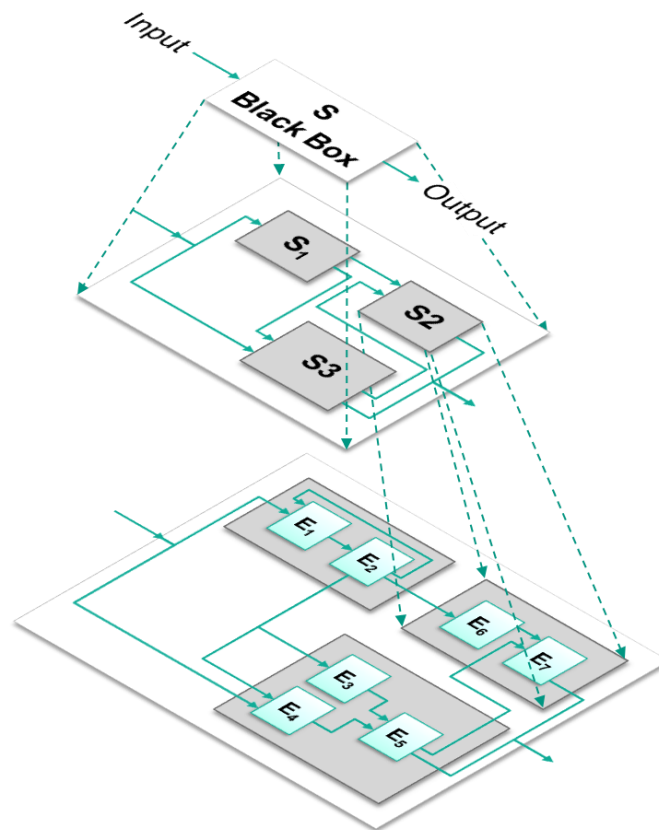


Abbildung 2-4: Die Struktur eines Systems in unterschiedlicher, hierarchischer Detaillierung⁸⁰

Die Allgemeine Systemtheorie beschreibt die Produktentstehung als eine ganzheitliche Betrachtung aller hierarchischen, strukturellen und funktionalen Aspekte. Entsprechend diesem Verständnis bildet das resultierende System der Produktentstehung die Komplexität der Realität vollständig ab. Dies steht jedoch im Widerspruch zur Allgemeinen Modelltheorie. Hiernach sind Modelle als Abbildungen eines Originals zu verstehen mit denen die komplexe Realität subjektiv verkürzt beschrieben

⁷⁸ vgl. Ropohl 2009 S. 75

⁷⁹ vgl. Ropohl 2009 S. 75 f.

⁸⁰ vgl. Patzak 1982 S. 51 und Ehrenspiel 2009 S. 21

wird, um hiermit aus Sicht des Modellnutzers zweckorientierte Erkenntnisse zu gewinnen.⁸¹ Der parallele Bedarf einer ganzheitlich-systemischen und reduziert-modellhaften Beschreibung der Produktentstehung kann als **Reduktions-Dilemma** bezeichnet werden.⁸² Durch die Verwendung von durchgängigen Produktmodellen kann dem Reduktions-Dilemma begegnet werden, indem durch ein System von Einzelmodellen ein konsistentes Gesamtbild des Produktes abgebildet wird.⁸³

Systemmodelle der Produktentstehung

Die Aufgabe des Ingenieurs besteht nach ROPHOL maßgeblich darin, technische Gebilde zu entwickeln, die er einem Sachsystem zuordnet.⁸⁴ Dabei sind Maßnahmen und Einrichtungen, die zum Hervorbringen der Sachsysteme im Rahmen entsprechender Ingenieurstätigkeiten erforderlich werden, einem Handlungssystem zugeordnet. Die Erstellung technischer Gebilde erfordert konkrete Zielvorgaben, die in einem Zielsystem zusammengefasst werden. Dabei können die Zielvorgaben in Teilen sowohl aus dem Handlungssystem selbst als auch aus dessen Umgebung hervorgebracht werden. Der Zusammenhang dieser drei Systemklassen wird durch ROPHOL anhand der Abbildung 2-5 beschrieben. Hiernach wird gemäß einem Zielsystem in einem Handlungssystem ein Sachsystem realisiert. Das Zielsystem wird dabei durch das Handlungssystem beeinflusst, während das generierte Sachsystem seinerseits auf das Handlungssystem zurückwirkt oder sogar zu einem Bestandteil des Handlungssystems wird. Dieser Ablauf orientiert sich an technischen Entwicklungsprozessen und wird maßgeblich durch die natürlichen, gesellschaftlichen und technischen Systemumgebungen beeinflusst.

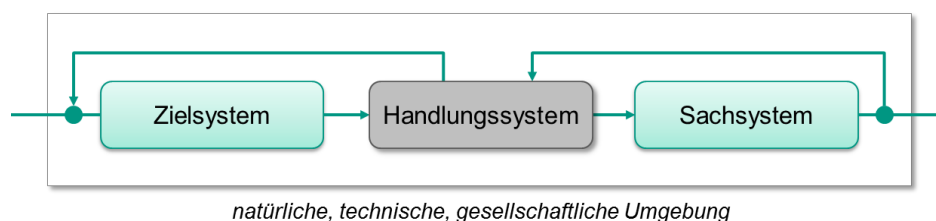


Abbildung 2-5: Die wichtigsten Systeme der Systemtechnik⁸⁵

Dieses Systemtripel aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem wird in der Systemtechnik nach PATZAK auf vier Systeme erweitert. Dabei bleiben das Zielsystem (Bedarfssysteme) und das Sachsystem erhalten, wobei PATZAK für letzteres den Begriff des Objektsystems (Ergebnisse und Problemlösungen) verwendet. Das Handlungs-

⁸¹ vgl. Abbildung 2-2 auf S. 21

⁸² vgl. Lohmeyer 2013 S. 20

⁸³ vgl. Albers & Lohmeyer 2012

⁸⁴ vgl. Ropohl 1975 S. 32 f.

⁸⁵ vgl. Ropohl 1975 S. 33

system wird hingegen unterteilt in ein abstraktes Programmsystem (Aufgabensysteme), das Projektinformationen, Vorgehenspläne, Programme und Prozesse enthält, und ein konkretes Wirksystem (Handlungssysteme und Arbeitssysteme), das die konkrete Organisation, die Handlungsträger, Instrumente und Sachmittel umfasst.⁸⁶

ZOPH-Modell

Basierend auf dem Ansatz von PATZAK leitet NEGELE Ende der 1990er-Jahre das ZOPH-Modell zur ganzheitlichen Modellierung von Produktentwicklungssystemen ab.⁸⁷ Die Systembenennungen nach PATZAK werden in diesem Zuge nochmals angepasst und das Programmsystem in Prozesssystem sowie das Wirksystem in Handlungssystem umbenannt. Die folgende Abbildung 2-6 zeigt das ZOPH-Modell der Produktentwicklung bestehend aus Ziel-, Objekt- Prozess- und Handlungssystem.

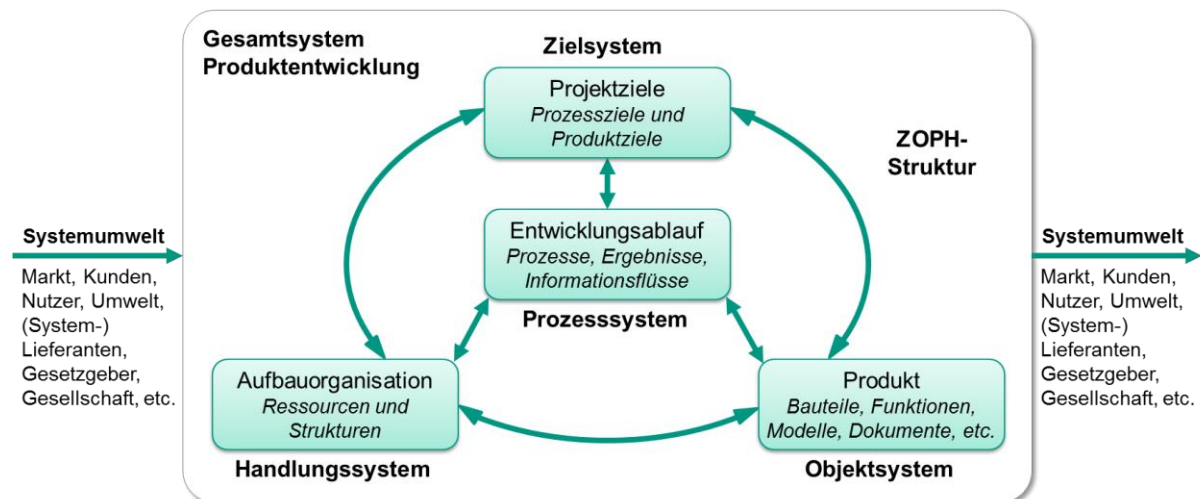


Abbildung 2-6: Das ZOPH-Modell der Produktentwicklung⁸⁸

ZHO-Modell nach ALBERS

Das ZHO-Modell basiert auf der Systemtechnik nach ROPHOL⁸⁹ und stellt, in Form des Systemtripels aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem, die Grundlage des von ALBERS UND MEBOLDT⁹⁰ entwickelten iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell⁹¹ dar. Nach MEBOLDT⁹² bietet das ZHO-Modell eine universelle Theorie, um Produktentstehungsprozesse umfassend zu beschreiben. Dabei sieht er konkret nachfolgende Vorteile:

⁸⁶ vgl. Patzak 1982 S. 30

⁸⁷ vgl. Negele 1998 S. 138 ff.

⁸⁸ vgl. Negele 1998 S. 139

⁸⁹ vgl. Ropohl 1975

⁹⁰ vgl. Albers & Meboldt 2007

⁹¹ vgl. iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE in Kap. 2.1.2 (S. 33)

⁹² vgl. Meboldt 2008 S. 157 f.

- Durch die systemtechnische Logik können die Zusammenhänge zwischen Zielen, Handlungen und Ergebnissen auf allen Ebenen der Produktentstehung beschrieben und modelliert werden.
- Es werden soziale Elemente gleichwertig zu technischen Elementen abgebildet.
- Es wird eine einheitliche Sprache geschaffen.
- Die ZHO-Systeme lassen sich in allen Disziplinen anwenden.
- Es wird ein formaler Modellstandard geschaffen.
- Das Modell erfüllt die Anforderung an Einfachheit und Komplexität.

Auf Basis der zweiten Hypothese nach ALBERS⁹³ lässt sich eine Produktentstehung auf Basis der Systemtheorie als die Überführung eines zunächst vagen Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem beschreiben. Dabei bestehen entsprechend Abbildung 2-7 zwischen den Zielen, den zu erschaffenden Objekten und den operativen und funktionalen Ressourcen im Handlungssystem zur Durchführung der Transformation starke, wechselseitige Abhängigkeiten.

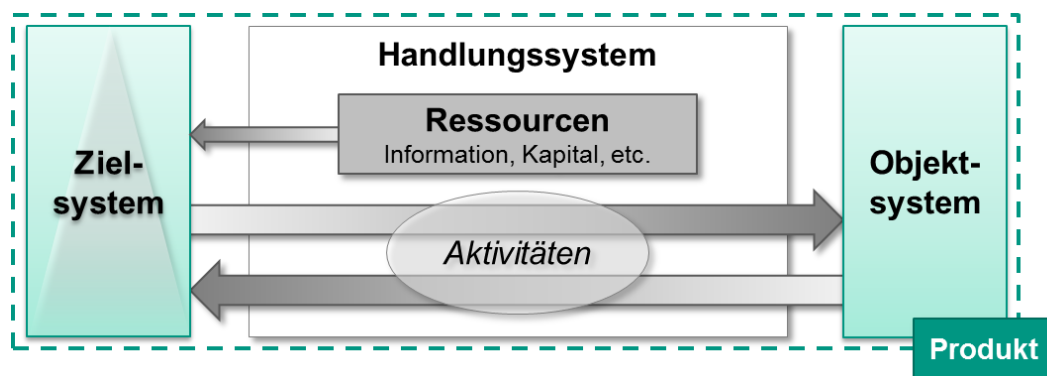


Abbildung 2-7: Das ZHO-Modell nach ALBERS⁹⁴

Das **Handlungssystem** ist ein sozio-technisches System, denn bei der Transformation von Zielvorgaben in konkrete Objekte ist es nicht zielführend die technischen Artefakte isoliert zu betrachten. Vielmehr müssen die menschlichen Handlungen bei der Erschaffung und Nutzung dieser Artefakte berücksichtigt werden.⁹⁵ Durch diesen zentralen Einfluss des Menschen auf die Produktentstehung sieht ALBERS den Menschen im Mittelpunkt der Produktentstehung.⁹⁶ Das sozio-technische Handlungssystem ist dabei aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut und enthält für die Realisierung einer Produktentstehung alle notwendigen Ressourcen

⁹³ vgl. Albers 2010

⁹⁴ vgl. Albers & Braun 2011a

⁹⁵ vgl. Ropohl 2009 S. 43 ff.

⁹⁶ vgl. Albers, Maul & Bursac 2013 und Albers 2010

(Entwickler, Budget, Einrichtungen, etc.). Das Handlungssystem erstellt das Ziel- und das Objektsystem, die über das Handlungssystem miteinander verbunden sind.⁹⁷

Das **Zielsystem** verfügt, sofern es vollständig ist, über alle relevanten Ziele, deren Wechselwirkungen, Randbedingungen und Begründungen, die für die Entwicklung des richtigen Produktes erforderlich sind.⁹⁸

Das **Objektsystem** beinhaltet alle Teillösungen, die in Form von Artefakten und Dokumenten während der Produktentstehung erschaffen werden. Von einer Vollständigkeit des Objektsystems kann erst dann gesprochen werden, wenn der im Zielsystem beschriebene Zustand erreicht wurde. Dabei ist das resultierende Produkt neben den Teillösungen und Zwischenergebnissen, auf denen dieses letztlich basiert, wiederum selbst ein Element des Objektsystems. Während des Produktentstehungsprozesses nimmt das Handlungssystem fortwährend Elemente des Objektsystems auf und leitet durch Analyse- und Validierungsschritte neue Ziele ab.⁹⁹

Erweitertes ZHO-Modell

Das erweiterte ZHO-Modell nach ALBERS, LOHMEYER & EBEL beschreibt den Entwickler als denkenden und handelnden Menschen im Mittelpunkt eines unsicherheitsbehafteten und iterativen Produktentstehungsprozesses.¹⁰⁰ Hierzu werden die Wissensbasis und der Lösungsraum als Subsysteme des Handlungssystems definiert.

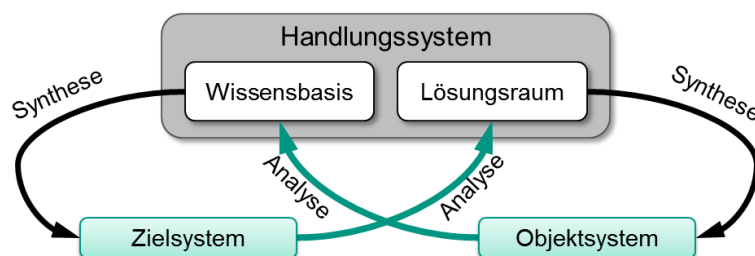


Abbildung 2-8: Erweitertes ZHO-Modell¹⁰¹

Dabei umfasst die Wissensbasis bestehendes, fallspezifisches Wissen, auf das innerhalb des Handlungssystems zurückgegriffen werden kann.¹⁰² Der Lösungsraum hingegen beinhaltet sämtliche Lösungsmöglichkeiten für eine gegebene Problemstellung und richtet damit die mentale, virtuelle und physische Modellierung der Objekte aus.¹⁰³ Die Wechselwirkungen zwischen der Wissensbasis und dem Lösungsraum

⁹⁷ vgl. Albers & Braun 2011a und Lohmeyer 2013 S. 24

⁹⁸ vgl. Albers & Braun 2011a und Ebel 2015 S. 65

⁹⁹ vgl. Albers & Braun 2011a und Lohmeyer 2013 S. 24

¹⁰⁰ vgl. Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

¹⁰¹ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012 und Lohmeyer 2013

¹⁰² vgl. Lohmeyer 2013 S. 91

¹⁰³ vgl. Lohmeyer 2013 S. 99

mit dem Ziel- und Objektsystem werden durch das iterative Prozessmodell mittels Analyse- und Syntheseprozesse modelliert. Dabei wird, ausgehend von der aktuellen Wissensbasis, das darin befindliche, fallspezifische Wissen dazu eingesetzt, ein initiales Zielsystem zu synthetisieren. Die Analyse des Zielsystems bestimmt den Lösungsraum, auf dessen Basis erste Objekte synthetisiert werden können. Die Zwischenergebnisse im Objektsystem beinhalten implizites Wissen, das durch Analyseprozesse in die Wissensbasis getragen wird und diese erweitert. Im sich anschließenden Syntheseprozess wird das neue, fallspezifische Wissen in das Zielsystem expliziert. Durch kontinuierliche Analyse- und Syntheseaktivitäten des Handlungssystems wird eine co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem erzielt.¹⁰⁴

Vorgehens- und Phasenmodelle

Um die Aktivitäten der Produktentstehung Zeitintervallen bzw. Phasen¹⁰⁵ zuzuordnen, kommen Vorgehens- und Phasenmodelle zum Einsatz. Nachfolgend werden zu dieser Kategorie drei der bekanntesten Produktentstehungsmodelle erläutert.

Stage-Gate-Prozess

Der State-Gate-Ansatz ist ein in der Industrie weit verbreitetes Modell zur Strukturierung unternehmensinterner Produktentstehungsprozesse.¹⁰⁶ Dieses sequentielle Prozessmodell wurde von COOPER¹⁰⁷ dazu entwickelt, die zeitliche und qualitative Durchführung von Entwicklungsprozessen sowie die Priorisierung von Zielvorgaben innerhalb der Prozesse zu optimieren. Dazu unterteilt der managementorientierte Ansatz Produktentstehungsprozesse in zeitlich aufeinanderfolgende Phasen, die durch entsprechende Gates streng voneinander separiert werden. Mit diesen als Meilensteine fungierenden Gates wird der Projektfortschritt gemessen, indem auf Managementebene die zum Zeitpunkt der Meilensteine vorliegenden Projektergebnisse mit zuvor definierten Kriterien verglichen werden, um hiernach Entscheidungen hinsichtlich des weiteren Projektverlaufs fällen zu können. Die Abbildung 2-9 zeigt hierzu die unterschiedlichen Generationen des Stage-Gate-Ansatzes.

Der Stage-Gate-Ansatz der 1. Generation betrachtet jede Phase als Kunde der vorhergehenden Phase. Dies hat eine strenge Fokussierung auf die Ergebnisse jeder Phase zur Folge. Erst wenn alle Kriterien aus Sicht des Managements erfüllt sind, wird die nächste Phase freigegeben. COOPER kritisiert, dass dadurch der Schwerpunkt der Betrachtung zu stark auf den technischen Aspekten liegt und das Warten auf die Erledigung aller geforderten Aufgaben zudem Zeitverzögerungen bedingt.

¹⁰⁴ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012 und Lohmeyer 2013 S. 101

¹⁰⁵ vgl. Sedchaicharn 2010 S. 11ff.: Begriff „Phase“ in Produktentstehungsprozessen

¹⁰⁶ vgl. Albers & Braun 2011a

¹⁰⁷ vgl. Cooper 1994

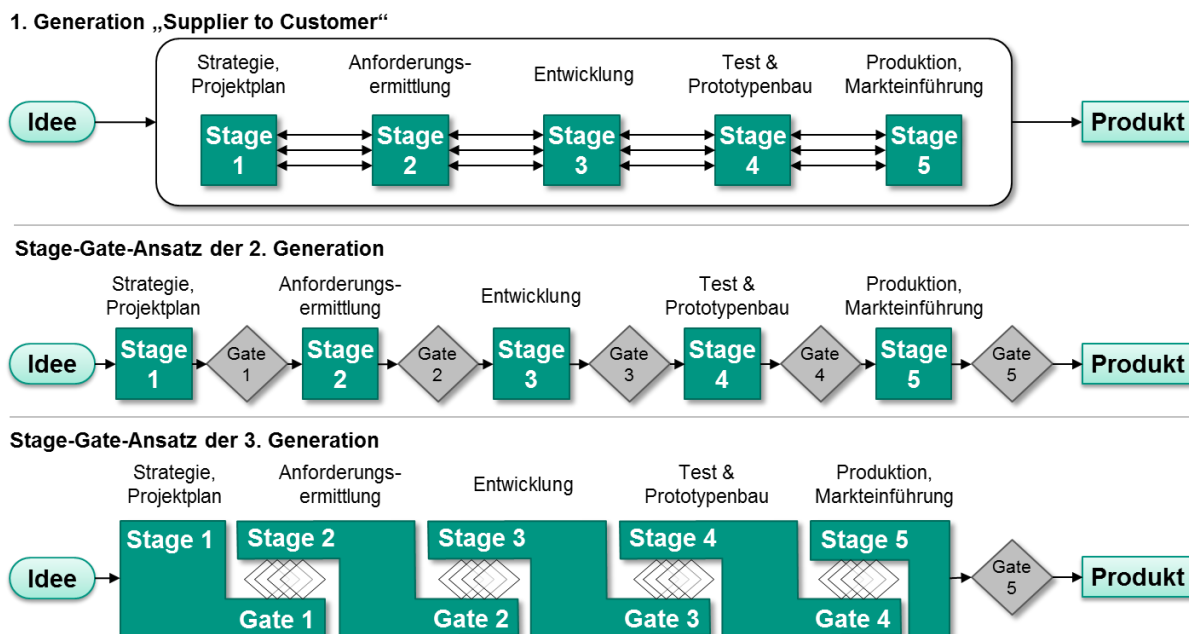


Abbildung 2-9: Stage-Gate-Ansatz nach Cooper¹⁰⁸

Der Stage-Gate-Ansatz der 2. Generation begegnet diesen Schwachpunkten einerseits durch eine stärkere Einbindung von nicht-technischen Erfolgsfaktoren. Ferner wird versucht der zeitlichen Projektverzögerung durch eine Parallelisierung einzelner Aktivitäten innerhalb der Phasen entgegenzuwirken, wobei eine Phasenüberlappung noch nicht vorgesehen ist. Die Möglichkeit, Aktivitäten aus späteren Phasen zu einem früheren Zeitpunkt zu beginnen, d.h. noch bevor die aktuelle Phase vollständig abgeschlossen ist, wird in der 3. Generation des Stage-Gate-Ansatzes nach COOPER durch überlappende Phasen beschrieben. Dabei spielen die „Fuzzy Gates“ eine zentrale Bedeutung, da die Zeitpunkte für die Gates nicht fest vorgeschrieben werden, sondern sich aus dem Projektfortschritt ergeben. Dadurch, dass sich überlappende Phasen über mehrere Gates erstrecken können, ist es möglich situationsgerechter zu terminieren und auf außerplanmäßige Ereignisse flexibler zu reagieren.¹⁰⁹

VDI-Richtlinie 2221

Das in der VDI-Richtlinie 2221¹¹⁰ beschriebene, generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren entsprechend Abbildung 2-10, basiert auf einem sequentiellen Problemlösungsprozess, der sich in sieben Arbeitsschritte untergliedert. Dabei er-

¹⁰⁸ vgl. Darstellung nach Meboldt 2008 S. 34

¹⁰⁹ vgl. Cooper 1994

¹¹⁰ Diese Richtlinie befindet sich derzeit in einer grundlegenden Überarbeitung (vgl. Mantwill 2014), um das beschriebene, allgemeine Modell der Produktentwicklung zusätzlich in einem spezifischen Produktentwicklungsprozess darzustellen, der, zur Beschreibung realer Entwicklungsprozesse, unternehmensspezifische Kontextfaktoren aus der Perspektive der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS berücksichtigt.

laubt das Modell ein Vor- und Zurückspringen zu einem oder mehreren Arbeitsschritten, um iterativ verlaufende Produktentstehungsprozesse abbilden zu können.

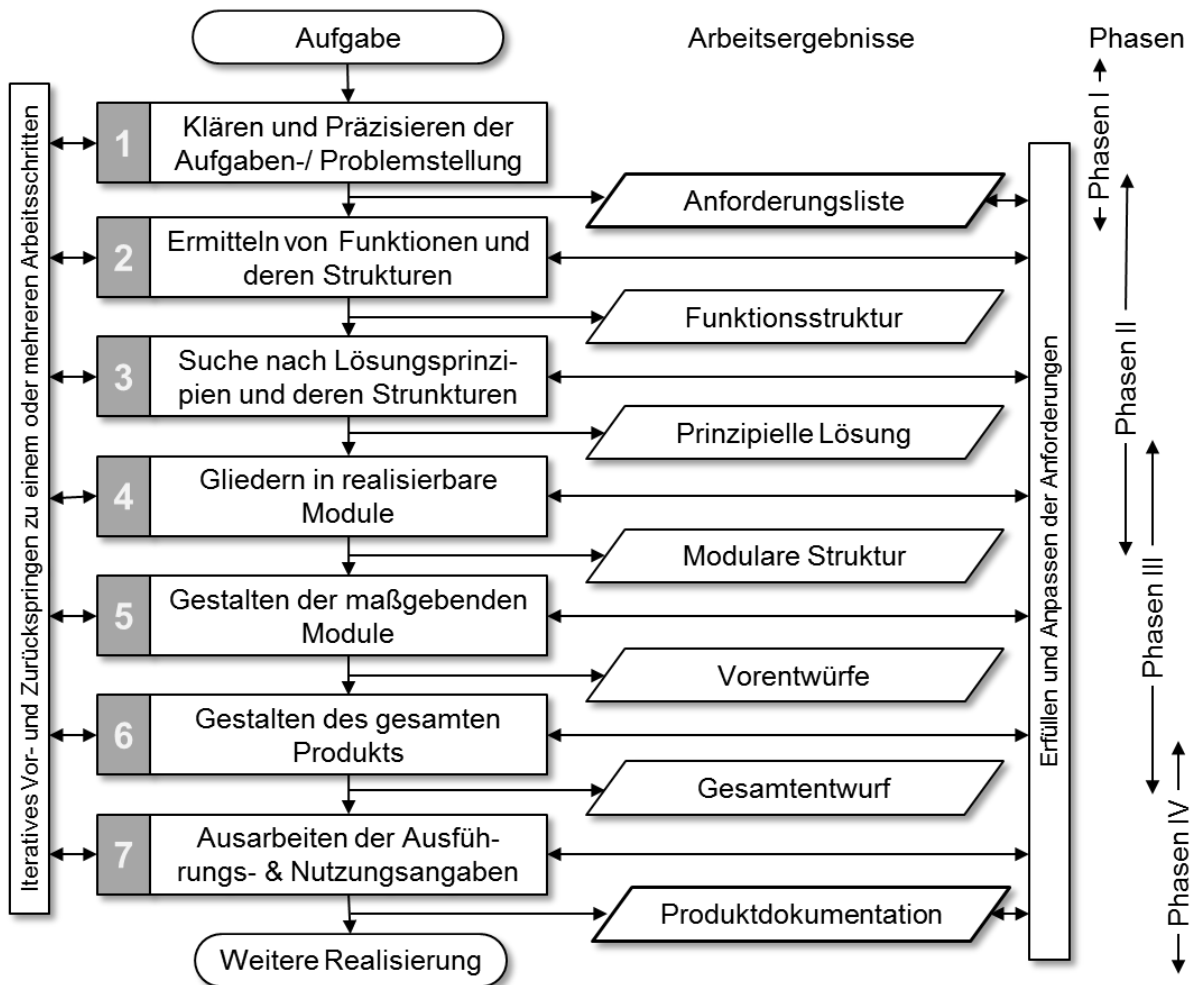


Abbildung 2-10: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren¹¹¹

Während des Produktentstehungsprozesses werden die Erfüllungsgrade kontinuierlich überprüft und gegebenenfalls Anpassungen vollzogen. Das während des Produktentstehungsprozesses anfallende, fallspezifische Wissen wird im Rahmen dieses kontinuierlichen Abgleichs mit den definierten Anforderungen erfasst. Dabei hat die Richtlinie den Anspruch, ein wertvolles Instrument zur Unterstützung des Konstrukteurs bei iterativ verlaufenden Produktentstehungsprozessen zu sein. Dennoch wirkt die Richtlinie in ihrer Anwendung und Struktur sehr starr.¹¹² Durch das in der Richtlinie beschriebene Modell mit seinem sequentiellen Ablauf der Arbeitsschritte und dem sequentiellen Problemlösungsprozess findet keine ausreichende Trennung zwischen den Inhalten der Arbeitsschritte und deren zeitlicher Verortung im Produktentste-

¹¹¹ vgl. VDI 2221 1993

¹¹² vgl. Meboldt 2008 S. 37

hungsprozess statt, so dass weder mit Iterationen noch mit einer kontinuierlichen Erweiterung der Wissensbasis sinnvoll umgegangen werden kann.¹¹³

VDI-Richtlinie 2206

Das in der VDI-Richtlinie 2206 vorgeschlagene Vorgehensmodell wurde zur Unterstützung bei der systematischen und domänenübergreifenden Entwicklung mechatronischer Systeme entwickelt.¹¹⁴ Hierzu führt die Richtlinie die klassischen Disziplinen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Informationstechnik zusammen, da diese bei der Entwicklung mechatronischer Systeme in vielfältigen, wechselseitigen Abhängigkeiten zueinander stehen. Die Herausforderung in der Mechatronik besteht in einer engen, multidisziplinären Zusammenarbeit, bei der die Aktivitäten nicht mehr losgelöst voneinander, sondern im mechatronischen Gesamtkontext betrachtet werden müssen. Die Richtlinie, die den Anspruch hat, ein flexibles, praxisnahes Vorgehensmodell zur Unterstützung des Konstrukteurs bereitzustellen, stützt sich hierzu im Wesentlichen auf drei Elemente:¹¹⁵

- Allgemeiner Problemlösungszyklus auf der Mikroebene,
- V-Modell auf der Makroebene und
- vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme.

Die Strukturierung des Vorgehens auf der Mikroebene erfolgt auf Grundlage des allgemeinen Problemlösungszyklus der Systemtechnik nach DAENZER UND HUBER¹¹⁶, der die systematische Problemlösung durch die Teilschritte Situationsanalyse und Zielformulierung, Lösungsfindung und Lösungsbewertung sowie Auswahl und Entscheidung beschreibt.¹¹⁷ Der Mikrozyklus lässt sich flexibel an die Entwicklungsaufgabe anpassen und soll den Produktentwickler bei planbaren sowie unvorhersehbaren Problemstellungen unterstützen.¹¹⁸

Für die Aktivitäten auf der Makroebene wird das V-Modell verwendet, das aus der Softwaretechnik übernommen und an die Anforderungen der Mechatronik angepasst wurde. Das Modell beschreibt die logische Abfolge der wesentlichen Teilschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme, wobei die Anwendung in der Praxis eine Abweichung der zeitlichen Abfolge der Teilschritte von der logischen Reihenfolge bedingen kann. Durch die problem- und aufgabenabhängige Anpassbarkeit handelt

¹¹³ vgl. Ebel 2015 S. 45

¹¹⁴ vgl. VDI 2206 2004

¹¹⁵ vgl. VDI 2206 2004 S. 26

¹¹⁶ vgl. Daenzer & Huber 1994

¹¹⁷ vgl. VDI 2206 2004 S. 28

¹¹⁸ vgl. VDI 2206 2004 S. 26

es sich bei dem in Abbildung 2-11 dargestellten V-Modell um ein systematisches und generisches Vorgehensmodell für den Entwurf mechatronischer System.

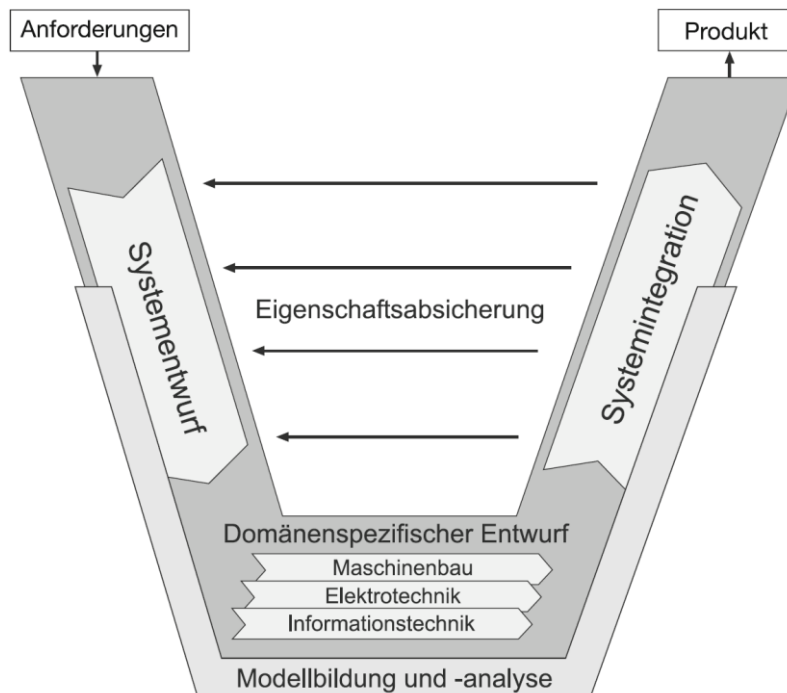


Abbildung 2-11: V-Modell für den Entwurf mechatronischer Systeme¹¹⁹

Der Entwicklungsprozess wird durch das V-Modell in übergeordnete Phasen untergliedert. In der **Systementwurfphase** werden die Wirkungsweisen des Produktes auf Basis von Anforderungen festgelegt und spezifiziert. Aus der Analyse der geforderten Gesamtfunktionen ergeben sich korrespondierende Teilfunktionen, für diese auf Teilfunktionsebene geeignete Wirkprinzipien identifiziert werden, um auf Gesamtsystemebene die Funktionserfüllung zu überprüfen. Begleitet werden die Aktivitäten zum Systementwurf durch die Definition von Testfällen, um bereits zu einem frühen Zeitpunkt die Randbedingungen für die Validierung mit in die Betrachtung einzubeziehen. In der zweiten Phase, der **domänenspezifischen Entwurfsphase**, wird der domänenübergreifende Systementwurf in den Disziplinen Maschinenbau, Elektronik und Informationstechnik, weitestgehend losgelöst voneinander, domänenspezifisch konkretisiert. In der Phase der **Systemintegration** werden die in den Einzeldisziplinen ausgearbeiteten Teilsysteme zu einem mechatronischen Gesamtsystem zusammengeführt. Dabei wird die Systemintegration kontinuierlich mit dem domänenübergreifenden Systementwurf und dessen zu Grunde gelegten Anforderungen abgeglichen. Wird dabei bei fortschreitender Integration der Teilsysteme durch deren Zusammenwirken eine unzureichende Funktionserfüllung festgestellt, so werden in

¹¹⁹ vgl. VDI 2206 2004 S. 29

der Regel gerade bei komplexeren, mechatronischen Systemen, mehrere Durchläufe des Makrozyklus erforderlich.¹²⁰

Integrative Modelle

Bei den Ansätzen zur integrierten Produktentstehung wird, unter Berücksichtigung der beteiligten Interessengruppen (Kunde, Wettbewerber, Management und Entwicklung des eigenen Unternehmens mit Zuliefererketten und Vertriebsnetzwerk) auf die Erfassung und Erfüllung der Kundenanforderungen fokussiert.¹²¹ Neben der Berücksichtigung der unterschiedlichen Interessengruppen liegt diesen Ansätzen ferner der Anspruch zugrunde, Produktentstehungsprozesse in unterschiedlichen Auflösungsgraden und mit den verschiedenen Aktivitäten und Phasen der Produktentstehung übergreifend und ganzheitlich abbilden und adressieren zu können.¹²²

iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE

Die derzeitigen Produktentstehungsmodelle fokussieren auf der Beschreibung der Produktentstehung einzelner Produkte, obwohl die meisten Produkte in Generationen entwickelt werden.¹²³ Dies wird durch das iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell dadurch berücksichtigt, dass Produktentstehungsprozesse im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS¹²⁴ beschrieben werden.

Das iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell nach ALBERS ist ein ganzheitlicher Ansatz der sowohl den Entwickler in seiner operativen Arbeit als auch das Controlling mit einem konsistenten Modell unterstützt.¹²⁵ Hiermit wird das Ziel verfolgt, die Lücke zwischen Entwicklung und Management zu schließen.¹²⁶ Bei dem iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell handelt es sich um ein Metamodell¹²⁷, das alle notwendigen Elemente enthält, um daraus auf Grundlage des generischen Charakters für individuelle Problemstellungen angepasste Modelle ableiten zu können.¹²⁸ Das Modell basiert dabei auf dem ZHO-Modell¹²⁹ der Systemtechnik und beschreibt in einem ganzheitlichen Rahmenwerk die Produktentstehung als Überführung eines anfangs

¹²⁰ vgl. VDI 2206 2004

¹²¹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 188 ff.

¹²² vgl. Ebel 2015 S. 51

¹²³ vgl. Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016

¹²⁴ vgl. Produktentwicklung aus Sicht der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach Albers (S. 16 ff.)

¹²⁵ vgl. Albers & Braun 2011a

¹²⁶ vgl. Albers, Braun & Muschik 2010

¹²⁷ Meta drückt in Bildungen mit Substantiven aus, dass sich etwas auf einer höheren Stufe, Ebene befindet, darüber eingeordnet ist oder hinter etwas steht. (Duden-Online, 11.09.2015, 8:40 Uhr, <http://www.duden.de/rechtschreibung/generisch>)

¹²⁸ vgl. Meboldt 2008 S. 149 ff.

¹²⁹ vgl. Ropohl 1975

vagen Zielsystems in ein Objektsystem durch das Handlungssystem.¹³⁰ Wie in Abbildung 2-12 dargestellt, enthält das Handlungssystem die hierfür notwendigen Aktivitäten sowie das Ressourcensystem (Mitarbeiter, Arbeitsmittel, Budget, etc.). Die Aktivitäten des Handlungssystems lassen sich dabei, entsprechend Abbildung 2-12, in Makro- und Mikro-Aktivitäten unterteilen, die unterschiedliche Abstraktionsgrade und Anwendungsgebiete beschreiben.¹³¹

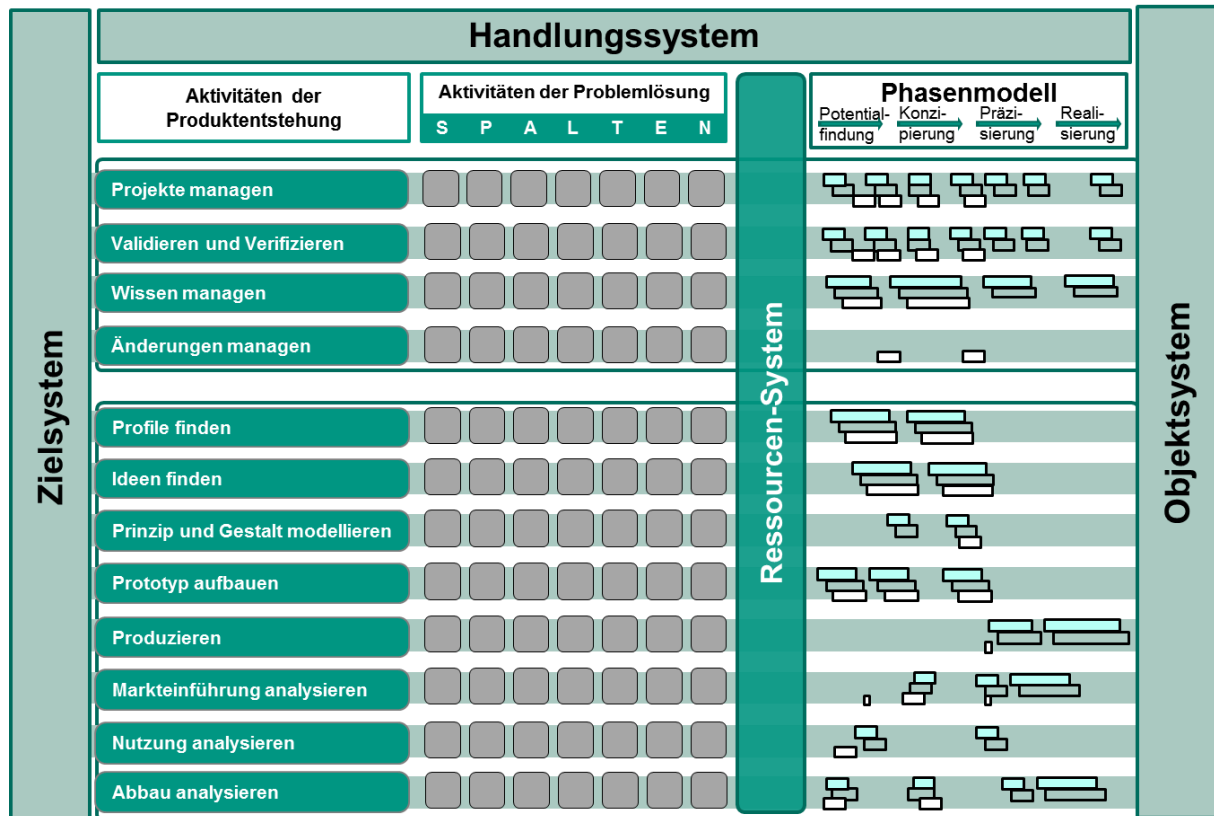


Abbildung 2-12: Das iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung¹³²

Die **Aktivitäten der Produktentstehung** auf der Makroebene orientieren sich am Produktlebenszyklus, wohlgleich sie nicht in ihrer zeitlichen Abfolge daran gebunden sind. Diese Makroaktivitäten¹³³ beschreiben vielmehr grundlegend zu unterscheidende Aktivitäten, die aus Sicht der Entwicklung im Verlauf des Produktentstehungsprozesses relevant sind.¹³⁴ Die Aktivitäten der Produktentstehung werden dabei den beiden Aktivitäten-Clustern **Basisaktivitäten** (oben in Abbildung 2-12) und **Kernaktivitäten** (unten in Abbildung 2-12) zugeordnet. Bei den Basisaktivitäten handelt es sich um solche, die parallel zu anderen Aktivitäten der Produktentstehung wiederkeh-

¹³⁰ vgl. Albers & Braun 2011b

¹³¹ vgl. Albers 2010

¹³² vgl. Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016 S. 5 (Produktgenerationsebene)

¹³³ vgl. Meboldt 2008 S. 161 ff.

¹³⁴ vgl. Albers & Braun 2011b

rend in jedem Produktentstehungsprozess durchgeführt werden. Die Kernaktivitäten sind diejenigen Aktivitäten der Produktentstehung, die auf jeden Produktentstehungsprozess angewendet werden können.

Zu den vier Basisaktivitäten zählt zum einen die Aktivität „**Projekte managen**“, die eine über den gesamten Produktentstehungsprozess fortlaufende Aktivität darstellt, in der ein kontinuierlicher Soll-Ist-Vergleich zwischen Objekt- und Zielsystem stattfindet. Diese Aktivität umfasst Aspekte des Controllings und beinhaltet die grundlegende Definition der initialen Zielvorgaben für das Produkt. Die Aktivität „**Validieren und Verifizieren**“ ist nach ALBERS die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess.¹³⁵

Dabei wird diese Aktivität nicht nur als eine Tätigkeit zum Testen der Produkteigenschaften des zukünftigen Produkts verstanden, sondern beinhaltet darüber hinaus, den kontinuierlichen Abgleich des Ist-Zustandes mit dem im Zielsystem beschriebenen Soll-Zustand. In diesem Zusammenhang werden beispielsweise die Objektbeschreibungen der im Rahmen der Kernaktivität "Prinzip und Gestalt modellieren" synthetisierten Objekte kontinuierlich über das Handlungssystem ins Zielsystem exportiert, um diese hiernach in der Basisaktivität "Validieren und Verifizieren" zu analysieren. Die Basisaktivität „**Wissen managen**“ umfasst die Schaffung eines Überblicks über interne und externe Daten, Informationen und Fähigkeiten sowie Aktivitäten zur Identifikation, Entwicklung, Verteilung, Nutzung, Bewahrung sowie zum Erwerb von Wissen. Die Aktivität „**Änderungen managen**“ dient der Abstimmung technischer, wirtschaftlicher und sozialer Änderungen, um frühzeitig Fehler, aber auch Potentiale aufdecken und hierfür notwendige Maßnahmen definieren zu können.¹³⁶

In der Kernaktivität „**Profile finden**“ werden unter Berücksichtigung von Kundenanforderungen, der Wettbewerbssituation und der Position des eigenen Unternehmens Potentiale und Bedarfssituationen am Markt beschrieben, um Marktlücken und Marktsegmente für die technischen Lösungen des eigenen Unternehmens zu identifizieren. In der Aktivität „**Ideen finden**“ werden nach Möglichkeit gestaltneutrale Ideen für Produkte generiert, die die in der Profilverfindung gefundenen Marktbedürfnisse bestmöglich befriedigen. Die Aktivität „**Prinzip und Gestalt modellieren**“ beinhaltet die sukzessive Überführung der abstrakten Skizzen und Entwürfen der Produktideen in ausgearbeitete Detailzeichnungen, CAD-Modelle oder Fertigungsunterlagen. Die Kernaktivität „**Prototyp aufbauen**“ ist mit der Basisaktivität „validieren und verifizieren“ eng verknüpft und dient dem Aufbau sowohl physischer als auch virtueller Prototypen und wird bei unterschiedlichen Reifegraden durchgeführt. Bei der Aktivität „**Produzieren**“ wird das Produkt hergestellt. Dabei müssen die Belange an die Produktion, wie u.a. Anforderungen an die Montierbarkeit, bereits im Rahmen der

¹³⁵ vgl. Albers 2010 Hypothese 3

¹³⁶ vgl. Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016; Albers & Braun 2011a

Kernaktivität „Prinzip und Gestalt modellieren“ berücksichtigt werden. Dies gilt auch für die Aktivität „**Markteinführung analysieren**“, indem frühzeitig der Aufbau des Vertriebsnetzes für das Produkt schon während der Entwicklung mit in die Betrachtung einbezogen wird. Dies trifft auch für die Aktivität „**Nutzung analysieren**“ zu, da auch diese Aktivität als Informationsquelle in frühen Entwicklungsphasen dient, denn aus der künftigen Nutzung des Produkts leiten sich Anforderungen an Produkt und Prozess ab. In der Aktivität „**Abbau analysieren**“ wird der Abbau, das Recycling oder die Endlagerung des Produkts beschrieben, wobei auch diese Aktivität frühzeitig in den Produktentstehungsprozess eingebunden werden muss.¹³⁷

Die **Aktivitäten der Problemlösung** auf der Mikroebene entsprechen den sieben Schritten des Problemlösungsprozesses SPALTEN nach ALBERS¹³⁸. Dieses Akronym steht für einen Zyklus an Problemlösungsaktivitäten, der die Situationsanalyse (S), die Problemeingrenzung (P), die alternative Lösungssuche (A), die Lösungsauswahl (L), die Tragweitenanalyse (T), das Entscheiden und Umsetzen (E) und das Nachbereiten und Lernen (N) umfasst. Dabei ist der SPALTEN-Problemlösungsprozess eine zur Behandlung von Problemen unterschiedlicher Randbedingungen und Komplexitäten universell einsetzbare Vorgehensweise.¹³⁹ Hierzu müssen nicht immer alle Schritte durchlaufen werden, sondern es kann bedarfsorientiert von einer in die andere Problemlösungsaktivität gesprungen werden. Ferner ist SPALTEN fraktal, denn jede Aktivität kann selbst wieder als eigener SPALTEN-Prozess betrachtet werden. Darüber hinaus kann der SPALTEN-Prozess als ein „atmender Prozess“ verstanden werden, denn jeder SPALTEN-Zyklus führt stets zu einer systematischen Aufweitung der Informationsmenge, die dann wieder verdichtet wird. Im Metamodell iPeM wird SPALTEN zur Transformation von Zielsystemelementen in Objektsystemelemente eingesetzt. Die SPALTEN-Mikroaktivitäten¹⁴⁰ spannen mit den Makroaktivitäten eine Aktivitätenmatrix bestehend aus 84 Aktivitäten auf, die eine generische und projektunabhängige Modellierung von Produktentstehungsprozessen ermöglicht.¹⁴¹

Der Projektbezug entsteht dadurch, dass im **Phasenmodell** die einzelnen Produktaktivitäten in einen zeitlichen Bezug gesetzt werden. Werden Aktivitäten konkreten Zeitintervallen zugeordnet, können diese als eine Phase im Produktentstehungsprozess betrachtet werden, die mehrere, parallele Aktivitäten umfasst.¹⁴²

Die in Abbildung 2-12 gezeigte Grundstruktur wird durch das iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung auf

¹³⁷ vgl. Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016; Albers & Braun 2011a

¹³⁸ vgl. Albers, Burkardt, Meboldt & Saak 2005

¹³⁹ vgl. Saak 2007 S. 34 f.

¹⁴⁰ vgl. Meboldt 2008 S. 169 ff.

¹⁴¹ vgl. Abbildung 2-12 auf S. 34

¹⁴² vgl. Albers & Braun 2011a

mehrere Ebenen projiziert. Dabei wird die Entstehung jeder Produktgeneration gemäß Abbildung 2-13 auf einer eigenen Produktgenerationsebene (Produkt G_{n-1} , G_n , G_{n+1} , etc.) modelliert. Zusätzlich werden Ebenen für das Produktionssystem, das Validierungssystem und die Strategie eingeführt, die alle der in Abbildung 2-12 gezeigten Grundstruktur entsprechen. Dadurch, dass die Struktur aller Ebenen identisch ist, können alle Aktivitäten auch auf allen Ebenen angewendet und spezifisch angepasst werden. Dabei stehen die Ebenen untereinander in Wechselwirkung und der Produktentstehungsprozess des zu entwickelnden Produkts kann, unter simultaner Integration der anderen Ebenen, modelliert werden.

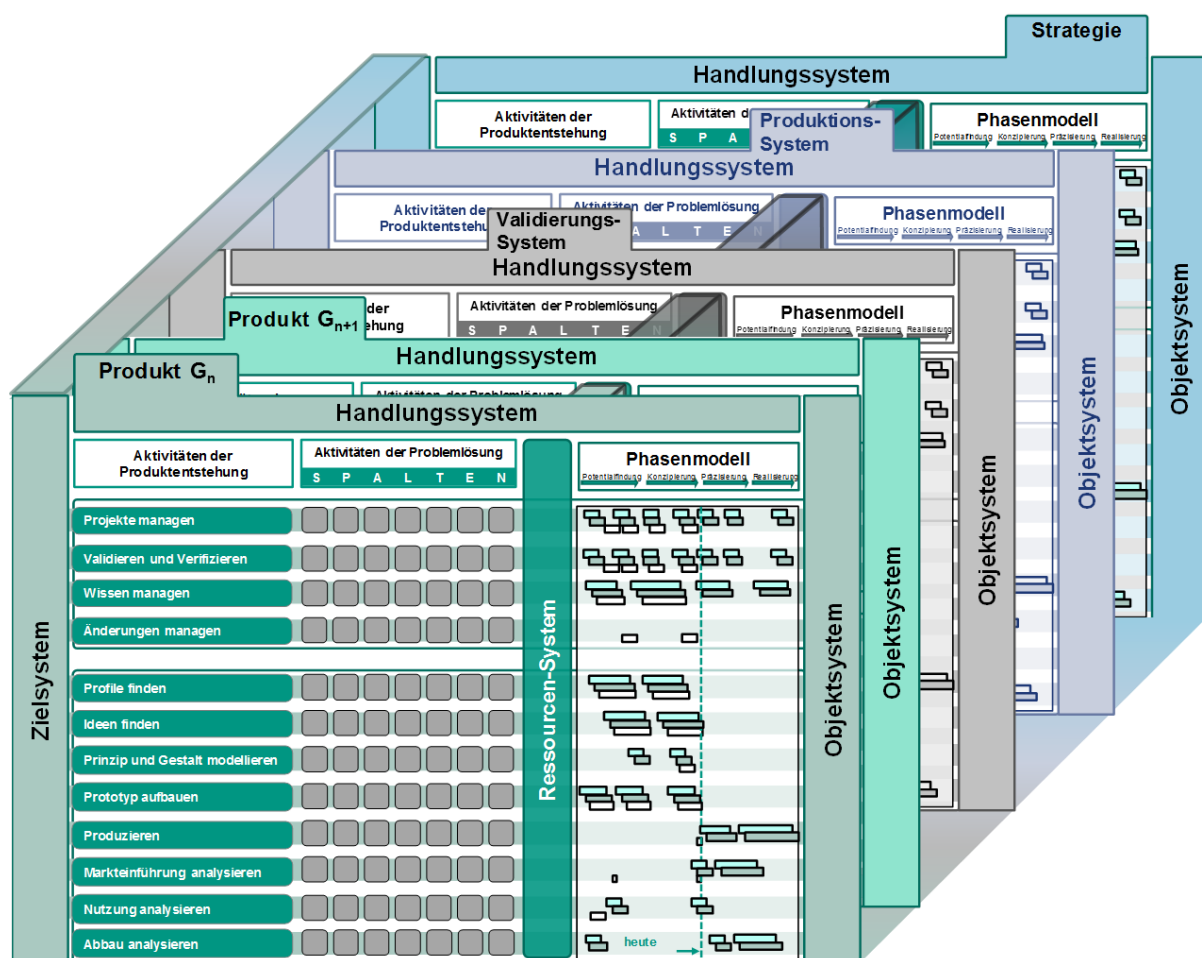


Abbildung 2-13: Ebenen des iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung¹⁴³

Die **Produktgenerationsebene** beschreibt die Entstehung des Produktes. Dabei kann für jede neue Produktgeneration eine neue Ebene hinzugefügt werden. Hiermit stehen die unterschiedlichen Produktgenerationen durch die Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS untereinander in Beziehung. Dabei können die Ressourcen über mehrere Projekte und damit über

¹⁴³ vgl. Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016 S. 5

mehrere Produktgenerationen hinweg geplant werden. Die **Validierungssystemebene** beschreibt die Produktentstehung von Validierungssystemen, um die Produkte zu validieren. Ein Prüfstand ist z.B. selbst ein Produkt eines eigenen Produktentstehungsprozesses, das ebenfalls geplant, konstruiert und validiert werden muss. Die **Produktionssystemebene** umfasst sämtliche relevanten Handlungen, die zu einer effizienten Produktion notwendig sind. Hierbei stellt beispielsweise die Entstehung einer speziell auf die Herstellung der betrachteten Produktgeneration abgestimmten Drehmaschine, die einen Teil des Produktionssystems darstellen kann, wiederum einen eigenständigen Produktentstehungsprozess dar, so dass die Produkte eines Drehmaschinenherstellers das Produktionssystem eines andere Unternehmens sein können. Die **Strategieebene** umfasst die Entstehung von Leitlinien, um den Fortbestand des Unternehmens im Wettbewerb langfristig sicherzustellen. Dabei können unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Strategie- und Produktentstehungsaktivitäten generationsübergreifende Geschäftsmodelle entstehen.¹⁴⁴

Alle Ebenen des iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell verfügen über eigene Objektsysteme, die untereinander einzelne Objekte austauschen und damit in Wechselwirkung miteinander stehen, so dass z.B. die Objekte eines Prozesses auch Ressourcen eines anderen Prozesses sein können. Demgegenüber werden die Ziele der unterschiedlichen Unternehmensbereiche und -prozesse in einem durchgängigen Zielsystem modelliert. Selbiges trifft auch auf das Ressourcensystem zu, um die zur Verfügung stehenden Ressourcen über alle Bereiche hinweg planen zu können. Das Zielsystem muss dabei stets konsistent sein und kann Hierarchien aufweisen.

Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM)

Das **Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM)** baut auf dem Vorgehen existierender Phasenmodelle, wie dem der VDI-Richtlinie 2221¹⁴⁵, auf, und stellt ein Navigationsmodell für den Entwicklungsprozess bereit, das sich an den Eigenschaften der für den Entwicklungsprozess relevanten Produktmodelle orientiert. Als wesentliche Dimension zur Ordnung der Produktmodelle dient der Konkretisierungsgrad, der sich auch aus dem Modell der VDI-Richtlinie 2221 erkennen lässt.¹⁴⁶ Entsprechend Abbildung 2-14 sind die beiden Hauptkomponenten des Modells der **Anforderungsraum**, der technische Entwicklungsziele sowie die geforderten Produkteigenschaften enthält, und der **Lösungsraum**, der die Lösungsmöglichkeiten zur Umsetzung der Anforderungen in das durch diese beschriebene Produkt beinhaltet. Die Lösungen im Lösungsraum werden dabei auf den drei Ebenen Funktions-, Wirk- und Bauebene

¹⁴⁴ vgl. Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016 S. 5

¹⁴⁵ vgl. Unterkapitel zur VDI-Richtlinie 2221 S. 29 f.

¹⁴⁶ vgl. Lindemann 2009 S. 44

konkretisiert. Die Konkretisierung der Lösungen erfordert eine parallele Ergänzung, Detaillierung und Konkretisierung der korrespondierenden Anforderungen. Dies wird im Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM) dadurch berücksichtigt, dass sich die Anforderungen über die gesamte Achse der Produktkonkretisierung ziehen und einen eigenen Anforderungsraum, parallel zum Lösungsraum, bilden.¹⁴⁷

Die **Funktionsebene** stellt die erste Konkretisierungsstufe des Lösungsraumes dar. Durch die abstrahierte Beschreibung des Produkts und seiner Bestandteile mittels Funktionsmodellen, die die Funktionen und deren Zusammenhänge in Funktionsstrukturen abbilden, wird eine Loslösung von konkreten Sachverhalten und Vorprägungen ermöglicht, um neue Lösungsansätze zu generieren. Die **Wirkebene** beschreibt die prinzipiellen Ideen und Konzepte für eine technische Problemstellung. Dabei werden Wirkprinzipien zur Darstellung einzelner Teilfunktionen zu Wirkstrukturen verknüpft, wodurch das Gesamtkonzept festgelegt wird. Auf der höchsten Stufe der Produktkonkretisierung, der **Bauebene**, wird die konkrete Gestalt festgelegt, um das Produkt herstellen zu können. Hierbei resultiert die Baustruktur, die die erforderlichen Bauteile und Baugruppen mit deren Verknüpfungen enthält.¹⁴⁸

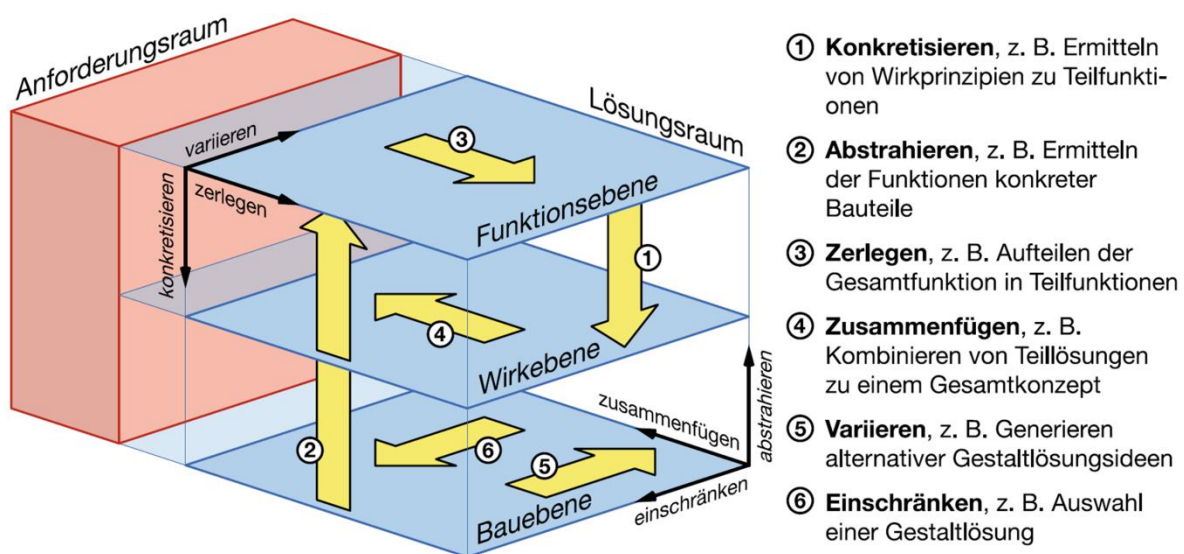


Abbildung 2-14: Das Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM)¹⁴⁹

Zur modellbasierten Unterstützung der operativen Problemlösung auf den unterschiedlichen Konkretisierungsebenen schlägt LINDENMANN das Münchner Vorgehensmodell (MVM) vor.¹⁵⁰ Dieses generische Modell umfasst die in Abbildung 2-15

¹⁴⁷ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 27

¹⁴⁸ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 26 f.

¹⁴⁹ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 28

¹⁵⁰ vgl. Lindemann 2009 S. 46 ff.

aufgeführten, sieben Elemente, die als Netzwerke angeordnet sind. Damit sollen reale Prozesse mit ihren sprunghaften Verläufen besser nachempfunden werden.

Zur Ableitung konkreter Maßnahmen wird durch das Element „**Ziel planen**“ die derzeitige oder auch zukünftige Situation analysiert. Die Klärung und Beschreibung des Zielzustandes ist hingegen Teil des Elementes „**Ziel analysieren**“. Hier werden ferner Anforderungen konkretisiert und deren Beziehungsnetzwerk ermittelt. Handlungsschwerpunkte werden im Element „**Problem strukturieren**“ identifiziert, um einerseits eine fokussierte Lösungssuche zu ermöglichen aber auch Handlungs- und Gestaltungsfreiräume hervorzuheben. Unter Berücksichtigung, dass stets mehrere Lösungsalternativen zu erarbeiten sind, und ein Schwerpunkt in der Ordnung und Kombination von Teillösungen zur optimalen Gesamtlösung liegt, bezieht sich das Element „**Lösungsideen ermitteln**“ auf das Suchen vorhandener und das Generieren neuer Lösungen. Mit dem Element „**Eigenschaften ermitteln**“ werden Eigenschaften ermittelt, konkretisiert und analysiert, um insbesondere Aussagen über den Grad der Zielerreichung machen zu können. Das Element „**Entscheidungen herbeiführen**“ beinhaltet die Bewertung der Lösungen und die Lösungsauswahl. Zur Verminderung der Risiken bei der Umsetzung der ausgewählten Lösungen behandelt das Element „**Zielerreichung absichern**“ das Erkennen und Bewerten möglicher Risiken und die Definition von Maßnahmen, um diese zu minimieren.¹⁵¹

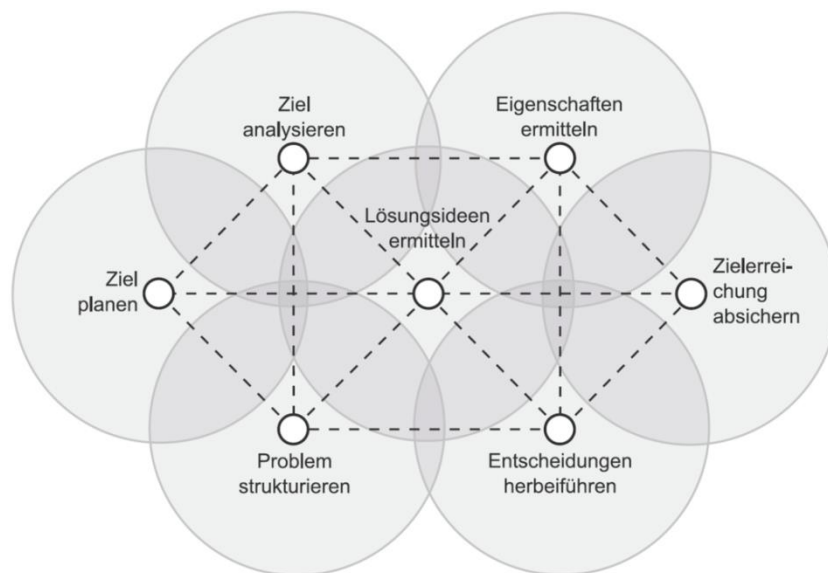


Abbildung 2-15: Das Münchner Vorgehensmodell (MVM)¹⁵²

¹⁵¹ vgl. Lindemann 2009 S. 48 ff.

¹⁵² vgl. Lindemann 2009 S. 47

3-Zyklen-Modell der Produktentstehung

Das integrative Vorgehensmodell nach GAUSEMEIER ist in drei Zyklen gegliedert. Dabei unterscheidet das Phasenmodell gemäß Abbildung 2-16 in einen Zyklus zur Definition der Produktstrategie, einen für die Produktentwicklung und einen Zyklus für die Produktionssystementwicklung. Während im ersten Zyklus zur strategischen Produktplanung Erfolgspotenziale zur Ableitung erfolgsversprechender Produktkonzepte ermittelt werden, werden im zweiten Zyklus im Rahmen der Produktentwicklung die domänenübergreifenden Prinziplösungen durch die Experten der involvierten Domänen verfeinert. Im dritten Zyklus, der Produktionssystementwicklung, wird die Herstellung geplant und der Serienanlauf vorbereitet.¹⁵³ Zur Produktintegration und Produktionssystemintegration wird hierbei das V-Modell¹⁵⁴ eingesetzt. Durch die iterative Integration der Produktentwicklung in den Prozess von der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf, wird diese nicht mehr isoliert betrachtet, sondern als eine von drei Zyklen im Gesamtprozess verankert. Zentral ist der iterative Modellcharakter, da die drei Bereiche als Zyklen und nicht als stringente Folge von Phasen und Meilensteinen aufgefasst werden.¹⁵⁵

Von der Geschäftsidee...

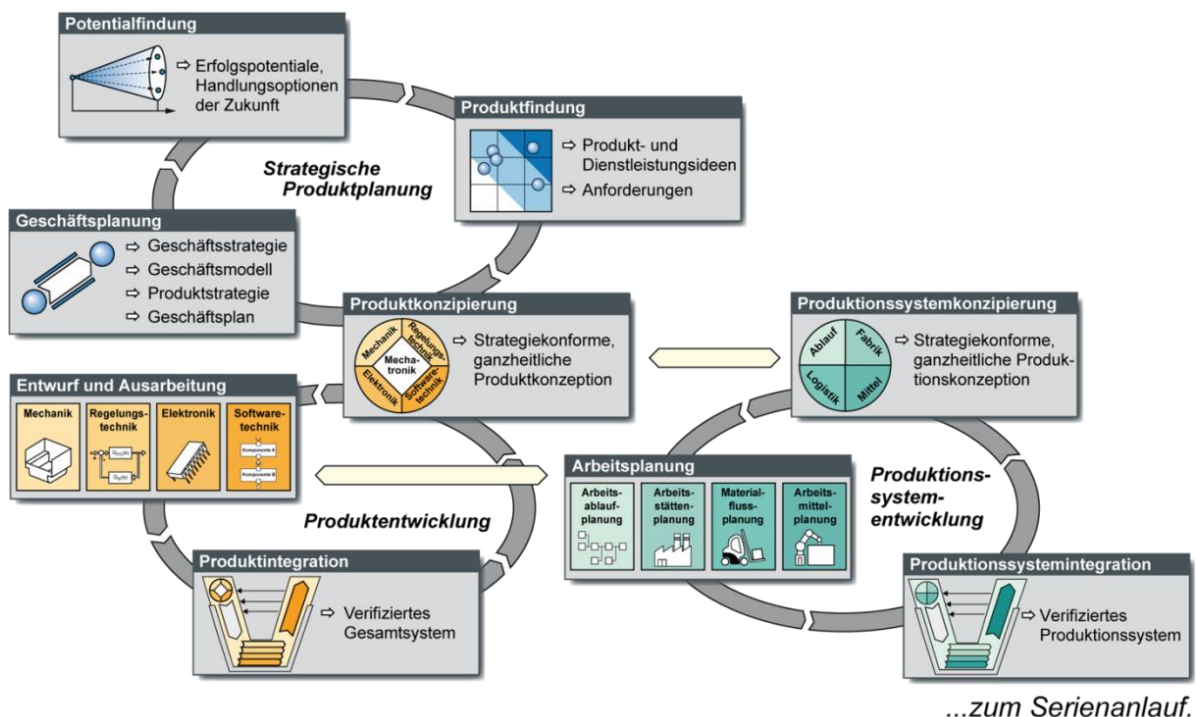


Abbildung 2-16: 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung¹⁵⁶

¹⁵³ vgl. Gausemeier, Lanza & Lindemann 2012 S. 14 ff.

¹⁵⁴ vgl. Unterkapitel zur VDI-Richtlinie 2206 S. 31 ff.

¹⁵⁵ vgl. Braun 2013 S. 63

¹⁵⁶ vgl. Wenzelmann, Plass & Gausemeier 2014 S. 39

2.1.3 Konzeptentwicklung in der Angebotsphase

Mit Bezug auf die Ausführungen aus den beiden vorangegangenen Kapiteln werden nachfolgend das Verständnis der Angebotsphase und der Konzeptentwicklung für diese Arbeit definiert.

Verständnis der Angebotsphase im Forschungsumfeld der Produktentstehung

Der Begriff Angebotsphase findet bei NAGARAJAH im Rahmen des methodischen Klärens und Präzisierens der Aufgabenstellung Anwendung.¹⁵⁷ NAGARAJAH beschreibt hierzu gemäß Abbildung 2-17 einen Prozess, der, mit Bezug auf den ersten Arbeitsschritt der VDI-Richtlinie 2221¹⁵⁸, in vier Phasen gegliedert ist und im Allgemeinen für einen spezifischen Kunden zu Beginn der Produktentstehung durchlaufen wird.

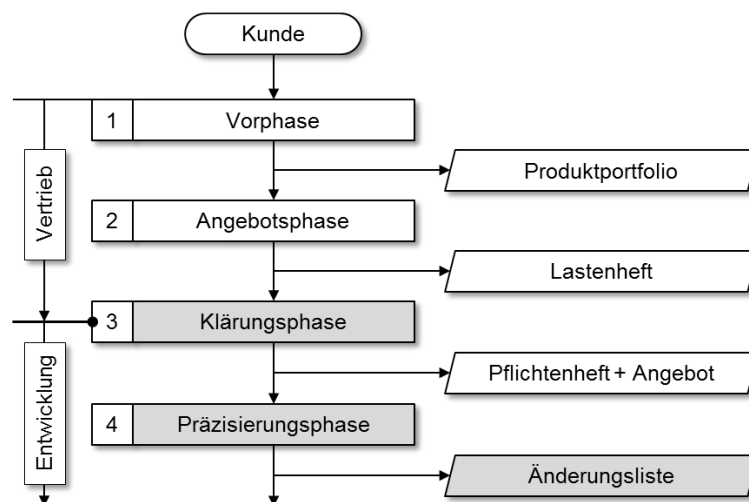


Abbildung 2-17: Phasen bis zur Erstellung der Anforderungsliste¹⁵⁹

In der Vorphase wird dem Kunden durch den Vertrieb das Produktportfolio vorgestellt. Bei Interesse finden zwischen Kunde und Vertrieb im Rahmen der Angebotsphase Gespräche zur Klärung des Inhalts und des Umfangs des anstehend Auftrags statt. Das Ergebnis aus dieser Phase ist ein Lastenheft, das die Anforderungen des Kunden an das Produkt definiert. Sobald neben dem Lastenheft eine schriftliche Kundenanfrage vorliegt, wird die Entwicklungsabteilung in die Klärungsphase eingebunden, um das Lastenheft in wechselseitiger Abstimmung mit dem Kunden in ein Pflichtenheft zu überführen, auf Basis dessen der Vertrag geschlossen wird. Nach Vertragsabschluss wird auf Basis des Auftrages das Produkt in der Präzisierungsphase entwickelt. Das Ergebnis dieser Phase ist eine Anforderungsliste, die neben

¹⁵⁷ vgl. Nagarajah 2013 S. 319 ff.

¹⁵⁸ vgl. Unterkapitel zur VDI-Richtlinie 2221 (S. 29 f.)

¹⁵⁹ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2013 S. 320

den Interessen des Kunden (Lastenheft) und des Unternehmens (Pflichtenheft) zusätzlich u.a. Gesetze, Standards und Vorschriften enthält. Durch die starren, sequentiellen Prozessschritte ist es jedoch nicht möglich mit Iterationen sinnvoll umzugehen. Demnach lässt sich auch keine kontinuierliche Erweiterung einer unternehmensinternen Wissensbasis abbilden, indem das aus unterschiedlichen Projekten gewonnene Wissen in expliziter Form dokumentiert, und damit für neue Projekte nutzbar gemacht wird. Dies ist insbesondere für die Angebotsphase von entscheidender Bedeutung, an der zudem nicht nur der Vertrieb, sondern eine Reihe weitere Abteilungen, u.a. die Konstruktion und die Projektleitung, involviert sind.

Bei EHRENSPIEL findet der Begriff Angebotsphase keine unmittelbare Verwendung. In seinem Prozess zur Produkterstellung¹⁶⁰ steht zu Beginn die Produktplanungsphase, an der Marketing, Produktplanung und Angebotsabteilung beteiligt sind. Hier nach erarbeiten die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen zunächst ein Konzept. Im weiteren Verlauf der Produktdefinition wird hieraus ein Entwurf abgeleitet, der in ein ausgearbeitetes Produkt überführt wird.¹⁶¹ Für die Bearbeitung der Aufgabenfelder innerhalb der Angebotsabteilung definiert EHRENSPIEL das Berufsbild des Angebotsingenieurs, der die technische Aufgabenklärung mit dem Kunden sowie den unternehmensinternen Konstrukteuren, Vertriebsspezialisten und Kalkulatoren bis zu einem auftragsreifen Zustand betreut.

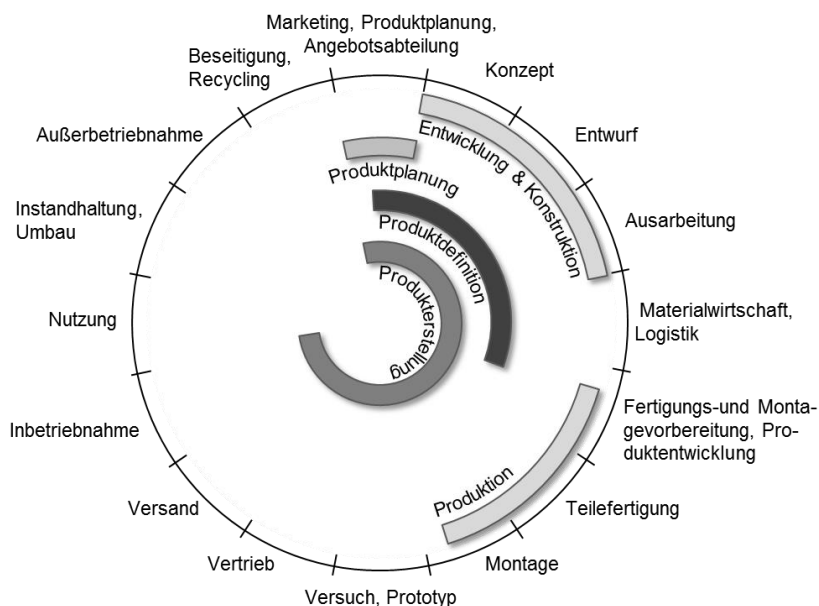


Abbildung 2-18: Produkterstellung im Lebenslauf eines Produkts: Im Kreislauf Nutzer (Markt) – Hersteller – Nutzer (Markt)¹⁶²

¹⁶⁰ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 169: Produkterstellung und Auftragsabwicklung wird synonym verstanden.

¹⁶¹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 158 f.

¹⁶² vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 158

ALBERS ET AL. definieren die Angebotsphase bzw. Angebotserstellungsphase als den Zeitraum zwischen Angebotsanfrage durch den Kunden und der Angebotsabgabe durch das anbietende Unternehmen.¹⁶³ In diesem Zeitraum werden die vom Kunden über den Vertrieb bereitgestellten Informationen zur Anfrage in enger Abstimmung zwischen Konstruktionsabteilung, Projektleitung und Kalkulationsabteilung in ein kunden- und anbietersgerechtes Angebot überführt. Dabei kann es zur Erstellung mehrerer Varianten kommen.¹⁶⁴

REICHWALD ET AL. definieren in ihrem Interaktions- und Kaufprozess bei individualisierten Produkten eine Angebotssuchphase.¹⁶⁵



Abbildung 2-19: Der Interaktions- und Kaufprozess bei individualisierten Produkten¹⁶⁶

Vor der Angebotssuchphase wird in der Kommunikationsphase der Kunde auf das Angebot kundenindividualisierter Produkte aufmerksam gemacht. Hierzu wird, abweichend von den Vorgehensweisen bei variantenreichen Serienprodukten, die personalisierte Ansprache des Kunden favorisiert, aufgrund des größeren Informationsbedürfnisses des Kunden durch die höhere Komplexität der Spezifikation bei individualisierten Produkten. In der Angebotssuchphase setzt der Kunde sich auf Grundlage ausreichender Informationen mit dem Produktangebot auseinander. Entscheidend hierbei ist, dass der Kunde die ihm angebotenen Möglichkeiten, gegebenenfalls mit Hilfe des Anbieters, nachvollziehen und für sich bewerten kann. Da das individualisierte Produkt noch nicht physisch vorhanden ist, können Unsicherheiten des Kunden mit Hilfe von Muster- und Testprodukten zum Angebot abgebaut werden. Die zentrale Phase im Kundeninteraktionsprozess bildet im Anschluss an die Angebotssuchphase die Interaktionsphase. Hierbei wird das Produkt durch Berücksichtigung

¹⁶³ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

¹⁶⁴ vgl. Abbildung 1-1 auf S. 3

¹⁶⁵ vgl. Reichwald, Moser, Schlichter, Stegmann & Leckner 2006 S. 115 ff.

¹⁶⁶ vgl. Lindemann & Reichwald 2006 S. 118

der Kundenanforderungen spezifiziert, d.h., die konkrete Gestaltung hinsichtlich Funktion, Dimensionierung und Design wird definiert. Am Ende der Interaktionsphase steht üblicherweise die Bestellung bzw. der Kauf des individualisierten Produktes.

REHFELDT versteht die Angebotserstellung als eine Funktion der Auftragsabwicklung die durch eine Kundenanfrage oder aus eigener Unternehmensinitiative aktiv wird.¹⁶⁷ Weitere Funktionen sind u.a. die Aufragerfassung, die Bearbeitung und die Bestätigung des Auftrages. GIRMSCHIED beschreibt das Angebotsmanagement als den entscheidenden Prozess zur Gewinnung projektspezifischer Aufträge. Dabei unterscheidet er vier Hauptschritte, nämlich (1) die Akquisition von Ausschreibungen, (2) den Prozess der Projektauswahl zur Bearbeitung der Angebote, (3) den Ablauf der Angebotsbearbeitung im Unternehmen und (4) die Abgabe des Angebots an den Kunden inklusive den Vertragsverhandlungen.¹⁶⁸ Die Auftragsabwicklung im Werkzeugbau wird in der Arbeit von ZISKOVEN in vier Bereiche gegliedert, (1) die Auftragsakquise (Vertrieb, Kalkulation), (2) die Werkzeugentwicklung (Methodenplanung, Konstruktion), (3) die Arbeitsvorbereitung (Arbeitsplanung, NC-Programmierung) sowie (4) die Werkzeugproduktion (Mechanische Fertigung, Montage, Try-out).

Im ersten Element der Prozesskette, der Auftragsakquise, werden durch Marketing- und Vertriebsaktivitäten Aufträge eingeholt. Die angefragten Werkzeuge werden hiernach im Zuge der Angebotserstellung kalkuliert. Die Auftragsakquise beschließt mit der Auftragserteilung.¹⁶⁹ Neben der Unikatfertigung im Werkzeugbau beschreibt FRANKE das komplexe Zusammenspiel von handelnden Personen, Produktvarianten, Dokumenten, Datenverarbeitungssystemen und Produktionsmitteln für eine auftragsbezogene Einzelfertigung. Dabei werden die Kundenspezifikationen auf Grundlage der Unternehmensexpertise in eine Anforderungsliste überführt, die wiederum die Basis für die Ausarbeitung eines Entwurfes darstellt. Die Aktivitäten zur Konzipierung und Erstellung eines Entwurfes findet nach der Auftragsbestätigung des Kunden und dem hiernach ausgelösten, unternehmensinternen Konstruktionsauftrag statt. Durch ein Angebotssystem wird die Auftragsabwicklung unterstützt.¹⁷⁰ Es geht jedoch nicht eindeutig hervor, auf welcher Grundlage der Kunde die Entscheidung für die Vergabe der Auftragsbestätigung fällt.

Nach HÖHNE UND SCHNEIDER ist die Entwicklung von Investitionsgütern (Transfer- und Montagelinien, Werkzeugmaschinen, Ausrüstungen für die Prozessautomatisierung, etc.) in hohem Maße von Kundenanforderungen geprägt. Diese werden basierend auf Kundenaufträgen konstruiert, gefertigt und im Wettbewerb über Angebote erwor-

¹⁶⁷ vgl. Rehfeldt 2013 S. 9 ff.

¹⁶⁸ vgl. Girmscheid 2015 S. 9 ff.

¹⁶⁹ vgl. Ziskoven 2013 S. 44 ff.

¹⁷⁰ vgl. Franke 1998

ben werden. Um innerhalb kurzer Zeitintervalle fundierte Kostenprognosen für kundenseitig angefragte Produkte abgeben zu können, wird eine Produktkonfiguration in der Angebotsphase vorgeschlagen.¹⁷¹

Die Frühe Phase der Produktentstehung

Zur Bearbeitung von Kundenanfragen¹⁷² benötigen die Zulieferunternehmen Informationen, die das angefragte Produkt, Produkthanforderungen, Anwendungsfälle und Randbedingungen hinreichend beschreiben, um belastbare Angebotspreise für die geforderten Produktstückzahlenszenarien ermitteln und innerhalb der geforderten Fristen an den Kunden rückmelden zu können. Eine fundierte Angebotskalkulation für das angefragte Produkt erfordert ferner neben der technischen Beschreibung des Gesamtproduktes eine fundierte Übersicht über die eigene Unternehmensexpertise, um die kundenseitig geforderten Produktfunktionen über die Lebensdauer sicherzustellen und damit die technische Produkt- und Prozessmachbarkeit basierend auf den zur Verfügung stehenden Produktionssystemen bewerten zu können. Diese hierfür nötigen Informationen werden den Zulieferunternehmen in der Regel in Form von Kundenlastenheften zur Verfügung gestellt.

Aus Sicht der Automobilhersteller werden die Produkteigenschaften in einer frühen Phase der Produktplanung definiert und in Eigenschaftsprofilen hinterlegt. Diese Profile werden dann anhand einer technischen Beschreibung des Produktes auf Bauteilebene heruntergebrochen (z.B. auf die Ebene der Nockenwelle¹⁷³), so dass funktionale Lastenhefte definiert werden können. Diese Lastenhefte dienen als Grundlage für detaillierte Bauteillastenhefte, deren technischen Zielwerte (z.B. Masse der Nockenwellen darf maximal 1.500g betragen) während der Entwicklungsphasen kontinuierlich überprüft werden. Parallel zu den funktionalen Lastenheften werden Projektlastenhefte erstellt, die die technischen Produkteigenschaften mit finanziellen Kennzahlen, Qualitäts- und Serviceanforderungen sowie Angaben zur terminlichen Zielerreichung beinhalten. Die Lastenhefte stehen aus Sicht der Automobilhersteller am Ende der Konzeptphase zur Verfügung und geben die Randbedingungen für die Serienentwicklung vor.¹⁷⁴

Aus Zulieferersicht resultieren aus diesen frühen Entwicklungsphasen der Automobilhersteller die nötigen Arbeitsergebnisse, auf deren Grundlage die Serienentwicklung auf Hersteller- und Zuliefererseite gestartet werden kann. Bevor einem Zulieferunternehmen der Zuschlag für einen Serienauftrag durch den Automobilhersteller

¹⁷¹ vgl. Höhne & Schneider 1998

¹⁷² Aus Sicht eines Zulieferunternehmens ist der Hersteller (OEM) der Kunde.

¹⁷³ vgl. Leitbeispiel S.10 f.

¹⁷⁴ vgl. Braess, Breitling, Ehlers, Grawunder, Hackenberg, Liskowsky & Widmann 2013 S. 1142 f.

erteilt wird, startet auf Grundlage einer konkreten Produkthanfrage zuliefererintern die Angebotsphase¹⁷⁵, im Rahmen derer ebenfalls eine Konzeptentwicklung zur Erarbeitung von kunden- und anbietergerechten Produktkonzepten durchgeführt wird.

Die Begriffe Konzept und Konzeptentwicklung werden demnach kontextabhängig in der Industrie unterschiedlich interpretiert und eingesetzt. Daneben gibt es auch im korrespondierenden Forschungsumfeld im Bereich der Produktentstehungsprozesse kein einheitliches Verständnis des Konzeptbegriffs. Insbesondere in Bezug auf den Detaillierungsgrad und damit die zeitliche Verortung der Konzeptphase im Produktentstehungsprozess gibt es deutliche Unterschiede. Um ein einheitliches Verständnis zu schaffen, werden auf Grundlage der folgenden Ausführungen die „frühe Phase“ sowie der Konzeptbegriff für die vorliegende Arbeit im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung definiert.

Die frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung

In der Automobilindustrie lässt sich die Entwicklung eines Fahrzeuges bis zum SOP in die Konzeptphase und die Serienentwicklungsphase unterteilen. Die Konzeptphase wird hierbei häufig als die frühe Entwicklungsphase bezeichnet. Diese beginnt mit einem Entwicklungsauftrag auf Basis entsprechender Zieldefinitionen und endet mit einem Fahrzeuglastenheft. Die in dieser frühen Phase festgelegten Konzepte und Inhalte werden in der Serienentwicklungsphase umgesetzt. Die frühe Phase ist dabei gekennzeichnet durch ein Lösungsangebot an Konzepten, welche die Zielsetzungen und Anwendungsfälle erfüllen können. Dabei werden funktionale, vertriebliche und betriebswirtschaftliche Ziele mit den realen Lösungsmöglichkeiten kontinuierlich abgeglichen, um den Zielraum für ein neues Fahrzeug zu beschreiben, der von zukünftigen gesellschaftlichen Entwicklungen und Trends sowie von den Kundenanforderungen aufgespannt wird. Das Resultat dieses Iterations- und Integrationsprozesses ist ein Konzeptlastenheft bzw. in weiter ausdetaillierter Form das (Grob-)Lastenheft. Die im Lastenheft zusammengeführten Arbeitsergebnisse aus der Konzeptphase sind die wichtigsten Hauptmerkmale (Fahrzeugcharakter, Proportionen, Fahrzeugarchitektur, Crashtauglichkeit, Fahrleistungen, Gewicht, etc.) und die für das Gesamtfahrzeugkonzept determinierten Herstellkosten. Auf Basis eines digitalen Prototyps werden mit Hilfe entsprechende CAE-Berechnungstools in dieser frühen Phase des Entwicklungsprozesses die wesentlichen Fahrzeugfunktionen (Fahrleistung, Verbrauch, Schadstoffemissionen, Struktursteifigkeit, Schwingungen, Aerodynamik, Crashtauglichkeit, etc.) sowie die aktive und passive Sicherheit (Fahrndynamik, Assistenzsysteme, etc.) virtuell getestet und verbessert.¹⁷⁶

¹⁷⁵ vgl. Definition 2-4: Angebotsphase in der PGE - Produktgenerationsentwicklung (S. 57)

¹⁷⁶ vgl. Braess, Breitling, Ehlers, Grawunder, Hackenberg, Liskowsky & Widmann 2013 S. 1153 ff.

Gemäß den Ausführungen im vorherigen Abschnitt wird die frühe Entwicklungsphase in der Automobilindustrie häufig auch als Konzeptphase bezeichnet. Entgegen diesem Verständnis bedarf es einer differenzierten Betrachtung der frühen Phase und der Konzeptphase. Dies trägt zum besseren Verständnis der Verortung und Wechselwirkungen der Produktentstehungsprozesse der Hersteller und deren Zuliefererunternehmen im Gesamtprozess der Produktentstehung bei. Hierzu zeigt die folgende Abbildung 2-20 zunächst eine Gegenüberstellung der Produktentstehungsprozesse von Hersteller und Zulieferer am Beispiel des Produktentstehungsprozesses nach BRAESS ET AL. und dem des fallgebenden Zuliefererunternehmens.

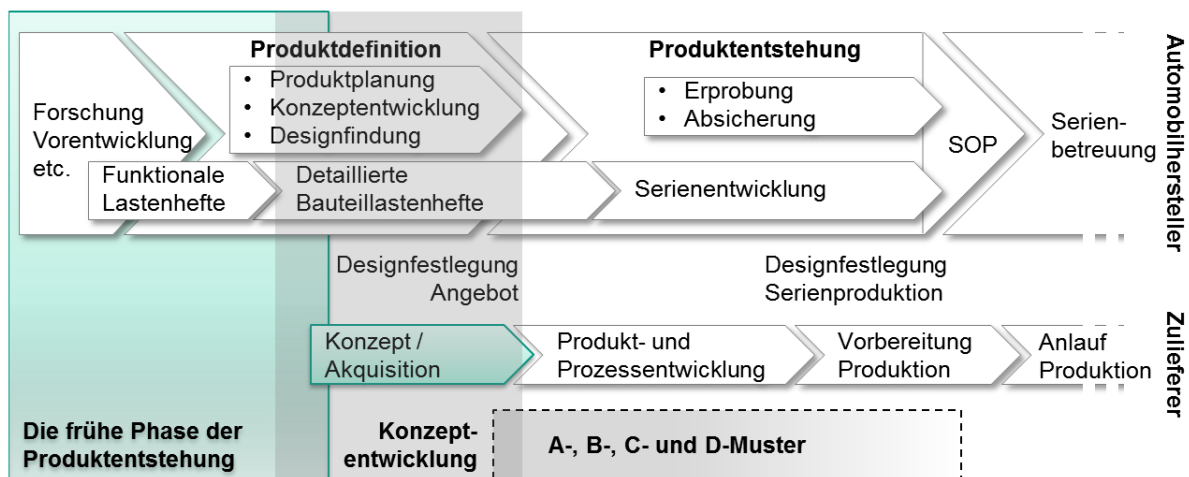


Abbildung 2-20: Gegenüberstellung der Produktentstehungsprozesse des fallgebenden Zulieferers und dem aus Sicht der Automobilhersteller in Anlehnung an BRAESS ET AL.¹⁷⁷

Für die konkrete Kundenanfrage werden auf Seite des potentiellen Serienlieferanten Konzepte ausgearbeitet, die auf den Arbeitsergebnissen einer frühen Phase der Produktentstehung der Automobilhersteller basieren, die zum einen zeitlich vor der Ausarbeitung von konkreten Produktkonzepten verortet ist und zum anderen die relevanten Eingangsgrößen für die Konzeptentwicklung in der Angebotsphase auf der Seite des Zuliefererunternehmens liefert. Dies wird durch die Definition der frühen Phase der Produktentstehung nach MUSCHIK¹⁷⁸ beschrieben. Hiernach bezieht sich die frühe Phase in einem konkreten Entwicklungsprojekt auf den Zeitraum von der Initiierung eines Projektes bis zur Formulierung einer ersten Produktspezifikation, die bereits die nötigen Komponenten sowie die technischen und technologischen Parameter umfasst. Die Ergebnisse aus der frühen Phase der Produktentstehung decken den Bedarf an Informationen, um mit der Konzeptentwicklung starten zu können. Dabei gibt es keinen scharfen Übergang zwischen der frühen Phase und der Konzeptentwicklung. Die Entscheidung für die Ausarbeitung konkreter Produktkonzepte beginnt

¹⁷⁷ vgl. Braess, Breitling, Ehlers, Grawunder, Hackenberg, Liskowsky & Widmann 2013 S. 1134 ff.

¹⁷⁸ vgl. Muschik 2011 S. 21

dann, wenn der hierfür erforderliche Detaillierungsgrad erreicht ist. Da diese Entscheidungen häufig nicht auf Grundlage von funktionalen und konzeptionellen Lösungsbeschreibungen getätigt werden können, binden ALBERS, MAUL, BURSAC & HEISMANN das Beschreibungsmodell der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS¹⁷⁹ mit in die Definition der „Frühen Phase“ ein. Hiermit lässt sich der aus Unternehmenssicht notwendige Reifegrad für die Entscheidung, ein neues Entwicklungsprojekt für eine neue Generation zu starten, beschreiben. Mit Hilfe des Beschreibungsmodells kann erkannt werden, ob beispielsweise für die Entwicklung des notwendigen Reifegrades, unter Berücksichtigung ökonomischer Randbedingungen, Prototypen zu erstellen sind. Hierzu wurde die folgende Definition 2-3 aufgestellt.¹⁸⁰

Definition 2-3: Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung

Die „Frühe Phase“ der Produktgenerationsentwicklung ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit einer bewerteten, technischen Lösung endet, die das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elemente abdeckt. Die zur technischen Lösung gehörende Produktspezifikation als Teil des Zielsystems enthält u.a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile. Sie ermöglicht eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Systems hinsichtlich der relevanten Parameter wie beispielsweise der Produzierbarkeit, der notwendigen Ressourcen sowie des technischen und ökonomischen Risikos.

Im Produktentstehungsprozess nach BRAESS ET AL. in Abbildung 2-20 sind Forschungs- und Vorentwicklungsprojekte der frühen Entwicklungsphase zugeordnet. Im Kontext der Frühen Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS ET AL. besitzen diese Vorentwicklungsprojekte zum Aufbau von Technologien und Wissen für künftige Produktgenerationen entsprechend Abbildung 2-21 ebenfalls Frühen Phasen und meist auch Referenzprodukte als Basis für neue Produktgenerationen. Zudem beziehen sich auch diese Projekte zumeist auf entsprechende Referenzprodukte, z.B. bei Forschungsprojekten zu neuen Fügeverfahren für gebaute Nockenwellen oder bei Vorentwicklungsprojekten zur Untersuchung, wie sich Fügeverbindungen unter neuartigen Randbedingungen verhalten.

¹⁷⁹ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b und Kapitel 2.1.1

¹⁸⁰ vgl. Albers, Rapp, Birk & Bursac 2017

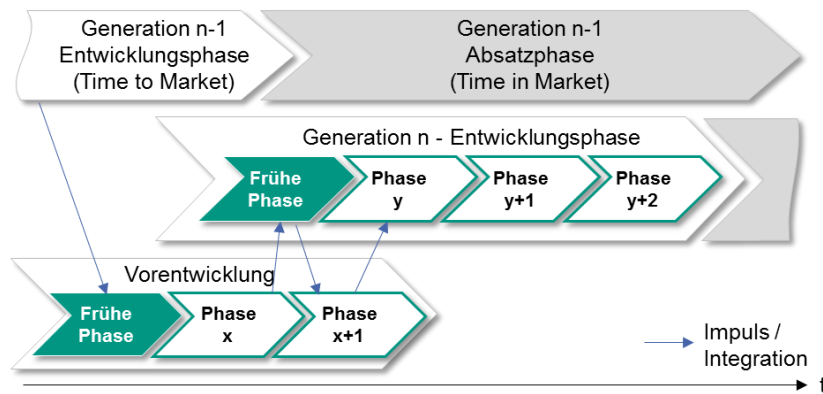


Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der Frühen Phasen einer PGE - Produktgenerationsentwicklung und der dazugehörigen Vorentwicklung¹⁸¹

Durch den in Abbildung 2-21 gezeigten zeitlichen Verlauf eines Vorentwicklungsprojektes und der Entwicklung einer Produktgeneration ist es dabei möglich, dass Phasen, wie z.B. die Phase X des Vorentwicklungsprojektes, die zeitlich vor der Frühen Phase des Produktgenerationsentwicklungsprojektes stattfindet, nicht als Frühe Phase bezeichnet werden kann, da die Phase X innerhalb des Vorentwicklungsprojektes nicht die Spezifika der Frühen Phase aufweist.¹⁸²

Am Ende der Konzeptentwicklung gibt es dann auf der Seite der Zulieferunternehmen eine Festlegung des Angebotsdesigns mit den entsprechenden Angebotspreisen für die geforderten Stückzahlenszenarien des Kunden.¹⁸³ Bis zu diesem Zeitpunkt sind häufig auf Zuliefererseite nur virtuelle Repräsentationen des späteren Serienproduktes erstellt worden. Denkbar ist jedoch auch, dass für die Bewertung der Realisierbarkeit der Kundenanforderungen bereits entsprechende Funktionsprototypen erforderlich werden. Hingegen wird mit der Erstellung von Funktionsmustern (A-Muster) aus dem Musterbau sowie ersten Prototypen aus Versuchs- und Hilfswerkzeugen zur Erprobung im Motorenversuch (B-Muster) erst nach der Erteilung des Serienzuschlages auf Grundlage der Konzeptentwicklung gestartet.¹⁸⁴

Die Arbeitsergebnisse der Konzeptphase aus der Sicht der Automobilindustrie wurden bereits im ersten Abschnitt in diesem Kapitel anhand des Produktentstehungsprozesses nach BRAESS ET AL. erläutert. Neben dem Konzeptverständnis als eine Produktbeschreibung mit hohem Detaillierungsgrad gibt es im Forschungsumfeld der Produktentstehungsprozesse weitere Interpretationen des Konzeptbegriffs.

¹⁸¹ nach Bursac 2016 S. 46

¹⁸² vgl. Bursac 2016 S. 46 f.

¹⁸³ vgl. Abbildung 2-20 auf S. 48

¹⁸⁴ Ergänzend hierzu sind Vorserienteile (C-Muster) Musterteile aus serienmäßigen Werkzeugen mit seriennahen Fertigungsverfahren für die technische Freigabe. Erstmuster der Serie (D-Muster) sind Teile aus serienmäßigen Werkzeugen mit serienmäßigen Fertigungsverfahren, die unter Serienbedingungen montiert und geprüft werden.

Der Konzeptbegriff im Forschungsumfeld der Produktentstehungsprozesse

Im Forschungsumfeld der Produktentstehungsprozesse beschreibt das Konzept einen Produktreifegrad, der sich von dem Verständnis in der Automobilindustrie insbesondere mit Bezug auf den Detaillierungsstand deutlich unterscheidet.

Gemäß der VDI-Richtlinie 2221¹⁸⁵ verstehen PAHL UND BEITZ ein Konzept als eine prinzipielle Lösung, die das Arbeitsergebnis aus der Phase des Konzipierens darstellt. Konzipieren ist dabei der Teil des Konstruierens, der nach der Klärung der Aufgabenstellung, u.a. durch die Arbeitsschritte (1) Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme, (2) Aufstellen von Funktionsstrukturen, (3) Suche nach Wirkprinzipien und deren (4) Kombination zu Wirkstrukturen, die prinzipielle Lösung definiert.¹⁸⁶ Das favorisierte Lösungsprinzip wird erstmals im Rahmen der dritten Hauptphase des Planungs- und Konstruktionsprozesses nach PAHL UND BEITZ, dem Entwerfen, gestalterisch festgelegt.¹⁸⁷ Ausgehend von dem Verständnis eines Konzepts als prinzipielle Lösung räumen PAHL ET AL. in die folgenden Jahren ein, dass vielfach ein Konzept in der industriellen Praxis weitaus mehr als die prinzipielle Lösung umfasst und formulieren die Begriffe Konzeptentwicklung und Konzeptkonstruktion als Teil der Produktentstehung. PAHL ET AL. untergliedern dabei die Produktentstehung in sieben Prozessphasen. Im Anschluss an die Planung (1) wird in der Entwicklungsphase (2) eine Lösung erarbeitet, bewertet und ausgewählt. In der nachfolgenden Phase, der Konzeptentwicklung (3), werden die vorläufige Produktarchitektur sowie die Hauptkenngrößen (Funktionsumfang, Kosten und Schnittstellen der Produktebenen Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software) festgelegt. In der Konzeptkonstruktion (4) werden die Produktarchitektur aus mechanischer Sicht sowie die Hauptkenngrößen (Bauraum, Gewicht, Gestalten der Hauptbaugruppen, Erstellen des Service-Konzepts, etc.) festgelegt und das Fertigungskonzept erstellt. Im Rahmen der Konzeptentwicklung und der Konzeptkonstruktion wird mit der Ausarbeitung eines virtuellen Prototyps begonnen. Dieser wird bei der Gestaltung (5) in einen physischen Prototyp überführt, dokumentiert (6) und hergestellt (7).¹⁸⁸

Nach EHRENSPIEL besteht eines der Hauptziele der Konstruktionsmethodik darin, technisch-sachliche Hilfestellung zur Entwicklung optimaler Produkte zu geben und das vor allem im Hinblick auf das Konzept als prinzipielle Lösung. Dabei wurde die Konstruktionsmethodik in der Vergangenheit für das generierende Konstruieren (Neukonstruktion), und dabei vor allem für die Konzeptphase entwickelt. Die Kon-

¹⁸⁵ vgl. Abbildung 2-10 in Kapitel 2.1.2 auf S. 30

¹⁸⁶ vgl. Pahl & Beitz 1993 S. 162 f.

¹⁸⁷ vgl. Pahl & Beitz 1993 S. 80 ff.

¹⁸⁸ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2013 S. 22 f.

struktionsart¹⁸⁹ und Konstruktionsphase haben zwar eine hohe Bedeutung, nehmen aber in der Konstruktionspraxis im Allgemeinen nicht mehr als 10% der zu leistenden Konstruktionsarbeit ein. Der weitaus größere Anteil der Konstruktionsaktivitäten beschäftigt sich mit der Anpassung und Verbesserung bestehender Produktlösungen.¹⁹⁰ In der Konzeptphase werden konkrete Anforderungen durch abstrakte Funktionen und Parameter als Ausgangspunkt für die Suche nach abstrakten, prinzipiellen Lösungen (Konzepten) beschrieben.¹⁹¹ An dieser Stelle ist dem Verständnis nach EHRENSPIEL entgegenzuhalten, dass die Beschreibung realer Entwicklungsprozesse aus der Perspektive der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS¹⁹² ein Konzeptverständnis erfordert, das über die prinzipielle Lösung hinausgeht.¹⁹³

Zur Unterstützung beim Entwickeln und Konstruieren stellt EHRENSPIEL in Anhängigkeit der Konstruktionsart schematische Vorgehenspläne zur Verfügung. Bei einer Neukonstruktion werden im ersten Arbeitsschritt zunächst (1) die Ziele definiert, die Aufgabe geklärt und die Vorgehensweise geplant. Hieran schließt sich das Konzipieren (2) mit der Erarbeitung eines Konzeptes basierend auf einer Funktionsliste mit Funktionsstruktur, den Lösungsprinzipien, einer Kostenschätzung sowie einer Konzeptskizze mit entsprechender Beschreibung an. Erst danach werden im Rahmen des Entwerfens (3) gestaltgebende Aktivitäten gestartet und eine Gesamtentwurfszeichnung erstellt, die beim Ausarbeiten (4) ausdetailliert wird.¹⁹⁴ Der Vorgehensplan für Neukonstruktion kann prinzipiell auch für Anpassungs- und Variantenkonstruktion eingesetzt werden. Hierzu wird die Konzeptphase (2) übersprungen, da die Anpassungs- und Variantenkonstruktion auf bestehenden Lösungsprinzipien basiert.¹⁹⁵ Demzufolge steht der Konzeptbegriff nur indirekt über die Neukonstruktion mit der Anpassungs- und Variantenkonstruktion in Zusammenhang.

In Anlehnung an das Konzeptverständnis nach EHRENSPIEL¹⁹⁶ beschreibt das Konzept nach PONN UND LINDEMANN einen prinzipiellen Lösungsvorschlag für eine technische Aufgaben- oder Problemstellung. Darauf Aufbauend können Konzepte auf verschiedenen Ebenen der Produktkonkretisierung erstellt werden.¹⁹⁷ Funktionskonzepte beschreiben in diesem Zusammenhang Produktkonzepte auf Funktionsebene, in denen gemäß dem Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM)¹⁹⁸ die abstrak-

¹⁸⁹ s. Konstruktionsarten der klassischen Konstruktionsmethodik in Kapitel 2.1.1 (S. 14 f.)

¹⁹⁰ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 8 ff.

¹⁹¹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 77

¹⁹² vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

¹⁹³ vgl. Verständnis der Konzeptentwicklung als Teil der Angebotsphase (S. 58)

¹⁹⁴ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 335 Bild 6.5-1

¹⁹⁵ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 336 Bild 6.5-2

¹⁹⁶ vgl. Ehrlenspiel 2009

¹⁹⁷ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 441

¹⁹⁸ vgl. Lindemann 2009 S. 44 ff.

ten, funktionellen Lösungsmöglichkeiten für eine technische Problemstellung beschrieben werden. Durch das Funktionsprinzip werden die wesentlichen funktionalen Produkteigenschaften definiert und damit die Grundlage für die weiteren Entwicklungsschritte auf Wirkebene und Bauebene gebildet. Die Wirkebene und die Bauebene sind ebenfalls im Münchner Vorgehensmodell beschrieben. In der Wirkebene sind die prinzipiellen und in der Bauebene die konkreten gestaltbezogenen Lösungsmöglichkeiten für eine technische Problemstellung verortet. Das Wirkkonzept beschreibt das Zusammenwirken einzelner Wirkprinzipien in der Gesamtlösung und deren Verknüpfungen in der Wirkstruktur. Das Baukonzept hingegen beschreibt die Gestalt einzelner Bauteile und Baugruppen sowie deren Schnittstellen. In der Konzeptentwicklung sind die Informationen hinsichtlich des angestrebten Produktes noch vorläufig, weshalb das Handeln der Entwickler unsicherheits- und risikobehaftet ist. Allerdings sind die Entscheidungen in der Konzeptphase von weitreichender Tragweite mit Blick auf den gesamten Produktlebenslauf und damit den späteren Erfolg des Produktes am Markt. Daher kommt der Konzeptentwicklung eine hohe Bedeutung im Entwicklungsprozess zu.¹⁹⁹ In der Konzeptentwicklung ist es daher wichtig, aus dem theoretisch möglichen Lösungsraum zielgerichtet und effizient wenige aussichtsreiche Lösungskonzepte zu ermitteln.²⁰⁰

Die obigen Ausführungen zeigen, dass das Verständnis des Konzeptbegriffs der klassischen Konstruktionsmethodiker sich von dem der Automobilherstellerindustrie unterscheidet. Im folgenden Abschnitt wird der Konzeptbegriff aus der Sicht des fallgebenden Zulieferunternehmens beschrieben, um hiernach, auf Basis des Konzeptverständnisses aus Sicht der Forschung sowie der Automobilhersteller- und Zulieferindustrie, das Konzeptverständnis für diese Arbeit im Sinne der PGE zu beschreiben.

Konzeptentwicklung im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens

Im Rahmen des Produktentstehungsprozesses des fallgebenden Zulieferunternehmens²⁰¹ werden bei einer konkreten Serienanfrage durch einen Motorenhersteller²⁰² in den Entwicklungsabteilungen in der ersten Projektphase (Konzept/ Akquisition) Produktkonzepte entwickelt und bewertet mit dem Ziel, einen Serienauftrag zu bekommen. Für eine Auswahl der in Frage kommenden Konzepte, die auf Grundlage von bestehenden Produktlösungen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten abgeleitet wurden, werden neben Angebotszeichnungen des Gesamtsystems auch bereits Komponentenzeichnungen für interne und externe Preisanfragen für den Einkauf erforderlich. Mit diesen Anfragezeichnungen erarbeitet der Einkauf zudem be-

¹⁹⁹ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 293

²⁰⁰ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 119

²⁰¹ vgl. Abbildung 2-20 auf S. 48

²⁰² Der Motorenhersteller kann der Automobilhersteller selbst sein.

reits ein Konzept für ein Subzuliefernetz im Falle einer Serienbeauftragung. In enger Abstimmung zwischen Konstruktion, Prozesstechnik, die sich mit der Planung von Produkt und Produktionssystem beschäftigen, sowie den herstellenden Serienwerken, wird die Machbarkeit für das Produkt und daran anknüpfend die Machbarkeitsanalyse für die Herstellprozesse des Produktes erstellt. Die Grundvoraussetzung für beide Machbarkeitsanalysen ist eine zulieferinterne Gesamtkonzeptzeichnung, die die kunden- und anbietersgerechten Zeichnungseinträge (geforderten Toleranzen, die Oberflächenqualitäten in Bezug auf Rauheit und Härte, verwendete Komponenten und Unterbaugruppen, Zusammensetzung des Gesamtsystems, etc.) enthält. Diese Zeichnungen werden im PDM-System mit dem Status Konzeptreife eingepflegt.

Neben den Machbarkeitsanalysen des Produkts und der Herstellprozesse zur Determinierung der erforderlichen Produktionssysteme wird in der Angebotserstellung zusätzlich die Machbarkeit der Logistik von der entsprechenden Planungsabteilung erstellt. Auf Basis der Arbeitsergebnisse der Konstruktion und der Prozesstechnik wird in den für die spätere Serienproduktion in Frage kommenden Werken die Kalkulation für das Serienprodukt durchgeführt. Die daraus resultierenden Angebotspreise werden zusammen mit der Angebotszeichnung von Vertretern aus dem Vertrieb an den Kunden übermittelt. Dabei ist es durchaus gängige Praxis, dass die Hersteller bis zur Nominierung ihrer Serienlieferanten mehrere Angebotsrunden durchführen.

Konkrete Ergebnisse der Konzeptentwicklung sind dabei:

- Digitale 3D-CAD-Modelle der in Frage kommenden Produktkonzepte auf Grundlage bestehenden Produkten aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten.
- Anfragezeichnungen von Komponenten und Fertigungszwischenständen für die interne und externe Preisanfrage bei Unterlieferanten.
- Angebotszeichnung für das angefragte Gesamtsystem.
- Produktmachbarkeit
- Prozessmachbarkeit (Herstellbarkeit) mit Produktionssystemplanung
- Machbarkeit Logistik
- Angebotspreise für die Serienproduktion des angefragten Produktes in Abhängigkeit der geforderten Stückzahlenszenarien und ggf. in Abhängigkeit der Belieferung aus unterschiedlichen Ländern (Europa, USA, China, etc.).

Konzeptentwicklung und Angebotsphase im Kontext der vorliegenden Arbeit

Zunächst lässt sich auf Grundlage der Rechercheaktivitäten zum Konzeptbegriff im Forschungsumfeld der klassischen Konstruktionsmethodiker zusammenfassen, dass es hierzu kein einheitliches Verständnis gibt. Dies trifft auch auf die mit dem Konzept

in Verbindung stehenden Begriffe Konzipieren, Konzeptphase und Konzeptentwicklung zu. Diese werden darüber hinaus in der Praxis häufig synonym verwendet.

Die Konzeptphase wird nach EHRENSPIEL²⁰³ bei der Anpassungs- und Variantenkonstruktion übersprungen. Dem widerspricht die Tatsache, dass in der Zulieferindustrie fast die gesamten Konstruktionskapazitäten im Grunde für Anpassungs- und Variantenkonstruktion benötigt werden, um in der Angebotsphase ein kunden- und anbiertgerechtes Konzept zu entwickeln. Aus Sicht der Zulieferindustrie ist demzufolge die Konstruktionsart der Varianten- und Anpassungskonstruktion eng mit dem Konzeptbegriff verknüpft. Die Konstruktionsmethodik wurde ursprünglich für das generierende Konstruieren (Neukonstruktion) und hier insbesondere für die Konzeptentwicklung entwickelt. Die Konzepte sind dabei auf sehr abstraktem Niveau und beschreiben die prinzipielle Lösung. Gestaltgebende Aktivitäten werden erst zu einem späteren Zeitpunkt nach dem Konzipieren gestartet, wogegen aus Sicht der Zulieferer Konzepte schon sehr wohl hinsichtlich Prinzip und Gestalt entsprechend ausdetaillierte Konstruktionsstände beinhalten müssen.

Das Verständnis des Konzepts als prinzipielle Lösung lässt sich auf die ersten Auflagen der Konstruktionslehre von PAHL UND BEITZ zurückführen.²⁰⁴ In den neueren Auflagen beschreiben PAHL ET AL.²⁰⁵ im Rahmen der Produktentstehung eine Konzeptentwicklung und eine Konzeptkonstruktion und ordnen diesen die Erstellung virtueller Repräsentationen des Produktes in Form von Prototypen zu. Damit reagieren PAHL ET AL. auf das vielfach in der Industrie verbreitete Konzeptverständnis, das, vor allem bezogen auf den gestalterischen Detaillierungsgrad, die prinzipielle Lösung bei Weitem übersteigen kann. In den beiden Konzeptphasen werden hiernach die Hauptkenngrößen des Produktes (Funktionsumfang, Kosten, Schnittstellen, Bauraum, Gewicht, etc.) festgelegt. Darüber hinaus muss jedoch der Detaillierungsgrad des Konzeptes ausreichen, um neben der Festlegung der Hauptkenngrößen diese auch fundiert bestimmen zu können, um aufgrund der Tragweite der Entscheidungen in der Konzeptentwicklung für den weiteren Produktlebenslauf fundiert bewerten und entscheiden zu können. Dies trifft insbesondere auf emergente Bewertungszielgrößen (Gewicht, Kosten, etc.) zu, die durch Konstruktionsaktivitäten nicht direkt auf Bauteilebene beeinflusst werden können, sondern sich erst auf Zusammenbauebene ergeben. Die Einbeziehung der Belange einer fundierten Serienkalkulation in die Konzeptdefinition wird hierbei nicht ausreichend berücksichtigt.

²⁰³ vgl. Ehrlenspiel 2009

²⁰⁴ vgl. Pahl & Beitz 1993

²⁰⁵ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2013

Das Grundverständnis des Konzeptbegriffs von PONN UND LINDEMANN²⁰⁶ entspricht dem von EHRENSPIEL. Hiernach beschreiben Konzepte in abstrahierter Form prinzipielle Lösungen für ein Produkt. Darüber hinaus können nach PONN UND LINDEMANN Konzepte in verschiedenen Ebenen der Produktkonkretisierung erstellt werden. Das Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM) beschreibt hierzu für eine technische Problemstellung auf Funktionsebene abstrakte, funktionelle Lösungsmöglichkeiten, auf Wirkebene prinzipielle Lösungsmöglichkeiten und auf Bauebene konkreten gestaltbezogene Lösungen. Auf der einen Seite beschreibt das Konzept einen prinzipiellen Lösungsvorschlag und auf der anderen Seite gibt es aber auch Konzepte auf Bauebene mit konkreter Gestalt. Daneben werden die angestrebten Informationen aus der Konzeptentwicklung generell als vorläufig beschrieben. Trotz des wissenschaftlichen Konsenses, dass in der Konzeptphase weitreichende Entscheidungen zu treffen sind, sind die Arbeitsergebnisse der Konzeptphase nach PONN UND LINDEMANN generell als vorläufig eingestuft. Auf Grundlage vorläufiger Informationen lässt sich keine fundierte Serienkalkulation erstellen.

Aus Sicht der Automobilhersteller (OEM) endet die Konzeptphase mit ausdetaillierten Bauteillastenheften, die als Grundlage für die Serienentwicklung dienen.²⁰⁷ Aus Sicht der Zulieferindustrie übersteigen die Inhalte häufig die relevanten Informationen, die für die Erstellung eines Angebotes für das angefragte Produkt nötig sind. Die Erstellung derartig detaillierter Bauteillastenhefte ist zudem sehr zeitintensiv, so dass vielfach Vorabstände dieser Lastenhefte als Basis für eine Serienanfrage von den Motorenherstellern an die potentiellen Serienlieferanten ausgegeben werden.²⁰⁸ Der Informationsumfang dieser Lastenhefte ist in der Regel hinreichend, um ein Angebot für das spätere Serienprodukt starten zu können. Häufig werden die detaillierten Lastenhefte nach Vergabe des Serienzuschlages im Rahmen der Umsetzung des Konzeptes in der Serienentwicklung zusammen mit den Serienlieferanten überarbeitet.

Zur Schaffung eines einheitlichen Verständnisses des Konzeptbegriffs wird dieser in den folgenden Ausführungen im Zusammenhang mit der Konzeptentwicklung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS für die vorliegende Arbeit beschrieben. Dieser Arbeit liegt ferner das Verständnis zu Grunde, dass die Angebotsphase als eine spezifische Frühe Phase im Sinne der PGE beschrieben werden kann, und dass die Konzeptentwicklung ein Teil innerhalb der Angebotsphase darstellt, in der die konstruktive Ausarbeitung der Angebotsvarianten stattfindet. Deshalb wird im Folgenden, ausgehend von den Ausführungen zu Beginn dieses Kapitels 2.1.3 zum Verständnis der Angebotsphase, zunächst diese im Kontext der

²⁰⁶ vgl. Ponn & Lindemann 2011

²⁰⁷ Dies trifft wahrscheinlich gleichermaßen für andere Branchen zu.

²⁰⁸ vgl. Abbildung 2-20 auf S. 48

PGE definiert. Anschließend wird das Verständnis des Konzepts sowie der Konzeptentwicklung als Teil der Angebotsphase im Kontext der PGE beschrieben.

Definition der Angebotsphase im Kontext der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit fokussiert aus Sicht eines automobilen Zulieferunternehmens für Motorkomponenten auf der Ableitung und Bewertung von kunden- und anbietergerechten Varianten in der Angebotsphase durch die Konstruktionsabteilung. Die Ausführungen im ersten Unterkapitel zum Verständnis der Angebotsphase im Forschungsumfeld der Produktentstehung zeigen, dass in der Literatur für die Beschreibung des Zeitraums von einer Kundenanfrage bis zur Angebotsabgabe durch den Anbieter unterschiedliche Begriffe verwendet werden. Recherchierte Begriffe hierfür sind insbesondere Angebotsbearbeitung, Angebotserstellung, Auftragsabwicklung oder auch Angebotsphase bzw. Angebotserstellungsphase. Dabei werden teilweise auch Abhängigkeiten dieser Begriffe untereinander beschrieben. Hinzu kommt, dass der Prozess von der Anfrage bis zur Auftragserteilung durch einen Vertragsabschluss zwischen Kunden und Anbieter auf Grundlage eines wechselseitig abgestimmten Angebotes stark kontextabhängig beschrieben wird. Demzufolge variiert diese Phase für Einzel- und Kleinserienprodukte, z.B. im Hinblick auf Dauer und Aktivitäten, gegenüber denen variantenreicher Serienprodukte oder individualisierter Produkte. Um ein einheitliches Verständnis zu schaffen, wird in dieser Arbeit der Begriff Angebotsphase²⁰⁹ verwendet und wie folgt im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung definiert:

Definition 2-4: Angebotsphase in der PGE - Produktgenerationsentwicklung

Die Angebotsphase in der PGE ist eine spezifische Frühe Phase der PGE²¹⁰, die mit der Initiierung als Anfrage eines Kunden (z.B. OEM) beginnt und mit der Abgabe eines Angebots (z.B. durch einen Zulieferer) als Spezifikation endet.

In der Angebotsphase sind u.a. die Konstruktion, der Vertrieb, das Projektmanagement, der Einkauf, die Prozessentwicklung und die Produktion sowie die Logistik aktiv. In dieser Arbeit werden die Konstruktionstätigkeiten in der Angebotsphase zur Erarbeitung kunden- und anbietergerechte Lösungen als **Konzeptentwicklung** bezeichnet.

²⁰⁹ Angebotsphase und Angebotserstellungsphase werden synonym verstanden.

²¹⁰ vgl. Albers, Rapp, Birk & Bursac 2017 und Definition 2-3: Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung (S. 49)

Verständnis der Konzeptentwicklung als Teil der Angebotsphase

Die Konzeptentwicklung umfasst innerhalb der Angebotsphase der PGE - Produktgenerationsentwicklung²¹¹ die Konstruktionsaktivitäten, die zur Erarbeitung kunden- und anbiertgerechter Produktkonzepte erforderlich sind. Die Konzeptentwicklung beginnt mit der Freigabe der Konstruktionsaufgabe und endet mit der Fertigstellung einer oder ggf. mehrerer, auftragspezifischer Varianten von Produktkonzepten. Diese Varianten können dabei im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS²¹² als eine Art Entwicklungsgeneration verstanden werden können.²¹³

Das Konzept hat darüber hinaus den erforderlichen Reifegrad zur Erstellung einer fundierten Produktkalkulation für die Umsetzung des Konzeptes in ein verkaufsfertiges Serienprodukt. Die Arbeitsergebnisse der Konzeptentwicklung sind Zeichnungen und Modelle des Produktkonzeptes für die Bewertung der Produkt- und Prozessmachbarkeit, um Produkt und Produktionssysteme für die Serienproduktion fundiert planen und festlegen zu können.

Das Produktkonzept setzt sich aus Neuentwicklungs- und Übernahmevariationsanteilen zusammen. Physische Repräsentationen des Produktkonzeptes können neben Anschauungs- und Funktionsmodellen auch als Bewertungsgrundlage erforderlich werden. Diese setzen sich aus bestehenden Teilsystemen und neu entwickelten Teilsystemen zusammen, wobei die Neuentwicklungsanteile z.B. auf einem Rapid-Prototyping-Verfahren basieren können.

2.1.4 Zwischenfazit

Diese Arbeit fokussiert aus Sicht eines automobilen Zulieferers für Motorbauteile auf die Problemstellung, in Konstruktionsabteilungen im Rahmen der Konzeptentwicklung²¹⁴ in der Angebotsphase²¹⁵ fristgerecht auf Basis bestehender Referenzprodukte im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS²¹⁶ kunden- und anbiertgerechte Varianten abzuleiten. Hierbei steht bei der kunden- und anbiertgerechten Variantenauswahl in der Angebotsphase die Herausforderung im Fokus, dass für die Bewertung der möglichen Varianten Informationen erforderlich werden, die zu Beginn der Angebotsphase noch nicht verfügbar sind. Diese emergenten Produkteigenschaften lassen sich nicht auf Elementebene bestimmen, sondern emergieren auf Grundlage einer gültigen Elementkombination auf Gesamtsystemebene.

²¹¹ vgl. Definition 2-4: Angebotsphase in der PGE - Produktgenerationsentwicklung (S. 57)

²¹² vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

²¹³ vgl. Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE (S. 64)

²¹⁴ vgl. Verständnis der Konzeptentwicklung als Teil der Angebotsphase (S. 58)

²¹⁵ vgl. Definition 2-4: Angebotsphase in der PGE - Produktgenerationsentwicklung (S. 57)

²¹⁶ vgl. Produktentwicklung aus Sicht der PGE - Produktgenerationsentwicklung in Kap. 2.1.1, S. 16 ff.

Demzufolge hängt die Eignung der im wissenschaftlichen Forschungsumfeld der Produktentstehung verfügbarer Erklärungsmodelle zur Beschreibung der Variantenauswahl von der Möglichkeit ab, die Elemente eines Baukastens sowie deren wechselseitigen Abhängigkeiten derart beschreiben zu können, um gültige Varianten ableiten und unter Berücksichtigung emergenter Eigenschaften²¹⁷ bewerten zu können. Zur Überprüfung der Zielsetzung muss demnach zunächst das Gesamtsystem basierend auf bestehenden Referenzprodukten abgeleitet werden, um hiernach eine objektbasierte Konkretisierung der emergenten Zielwerte zu erhalten. Dies können sequentielle Vorgehensmodelle nicht leisten. Zur Abbildung der erforderlichen Wechselwirkungen von Zielen und Objekten wird deshalb in dieser Arbeit das iterative, erweiterte ZHO-Modell²¹⁸ eingesetzt. Ferner wird die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode zur Variantenauswahl im Sinne des ganzheitlichen Produktentstehungsmodells der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung, dem iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS²¹⁹, entwickelt, das auf dem erweiterten ZHO-Modell aufbaut.

Zur besseren Veranschaulichung wird das in der Einleitung dieser Arbeit aufgeführte Beispiel eines schematischen Variantenauswahlprozesses²²⁰ auf Basis des iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell beschrieben. Abbildung 2-22 stellt hierzu die schematische Variantenauswahl (oben) einer exemplarischen Modellierung auf Basis des iPeM (unten) gegenüber. Dabei wird das iPeM²²¹ zweidimensional dargestellt, indem die einzelnen Ebenen übereinandergelegt und über das (transparente) Phasenmodell miteinander in Beziehung gebracht werden. Im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens basiert die Angebotsanfrage häufig auf Kundenzeichnungen, die das Produkt aus Kundensicht beschreiben. Die Entwicklung dieser Produktbeschreibung fand zuvor bereits im Rahmen eines kundenseitigen Produktentstehungsprozesses statt und kann entsprechend auf der Ebene der Produktgeneration (G_n) modelliert werden. Die Strategie des Kunden sieht beispielsweise für seine Motorenentwicklung vor, die Nockenwelle zuzukaufen. Demzufolge werden Angebote potentieller Zulieferunternehmen eingeholt. Diese Unternehmen stellen dann das Produktionssystem des Kunden dar. Bewegt man sich nun gedanklich auf die Produktionssystemebene, so ergibt sich aus Sicht des Zulieferunternehmens wiederum ein eigenständiger Produktentstehungsprozess gemäß Abbildung 2-22.

²¹⁷ vgl. Pulm 2004 S. 19

²¹⁸ vgl. Erweitertes ZHO-Modell in Kapitel 2.1.2 auf S. 27 f.

²¹⁹ vgl. iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE in Kap. 2.1.2, S. 33 ff.

²²⁰ vgl. Abbildung 1-1 auf S. 3

²²¹ vgl. Abbildung 2-13 auf S. 37

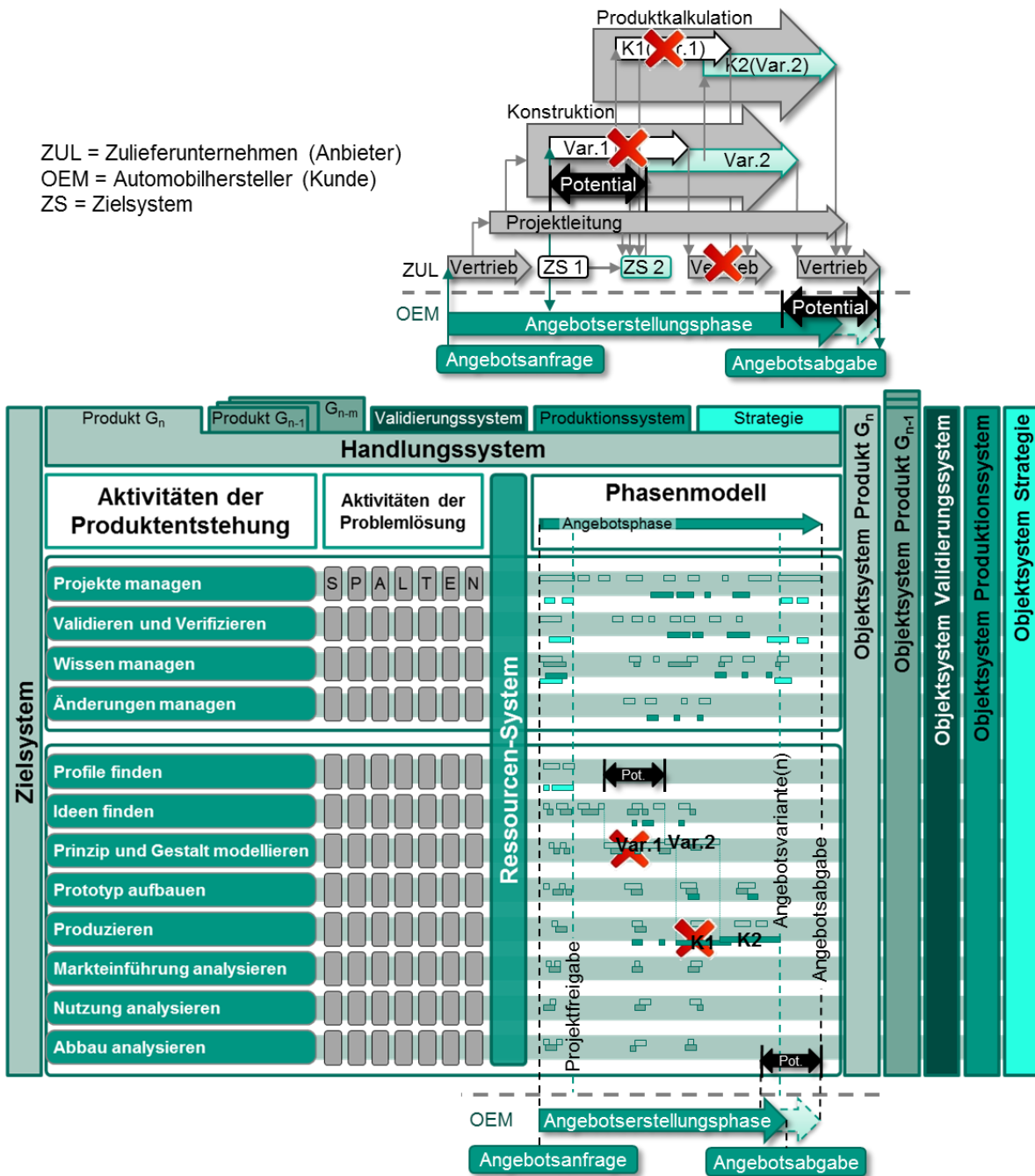


Abbildung 2-22: Modellierung eines schematischen Variantenauswahlprozesses in der Angebotsphase²²² (oben) auf Basis des iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell (unten)

Die Modellierung der Variantenauswahl für die konkrete Kundenanfrage bezieht sich auf die Angebotsphase des Zulieferunternehmens. Zur Verdeutlichung wird hierzu die Phasenbenennung im Phasenmodell entsprechend angepasst. Nach Eingang der Kundenanfrage über den Vertrieb nehmen zunächst Vertrieb und Projektleitung ihre Projektmanagementtätigkeiten auf. Die grundlegende Entscheidung, ob ein Angebot erstellt werden soll, hängt insbesondere von der Unternehmensstrategie ab. Zudem

²²² vgl. Abbildung 1-1 auf S. 3 und Abbildung 1-2 auf S. 5

können fallspezifisch alle Produktentstehungsaktivitäten auf der Produktgenerations-ebene (G_n) und den Ebenen potentieller Referenzprodukte (G_{n-m}) relevant werden, um auf Basis der verfügbaren Kundendaten zu prüfen, ob das Wissen im Unternehmen ausreicht ein belastbares Angebot erstellen zu können.

Ergibt sich nach wechselseitigem Abgleich der Aktivitäten auf der Produktgenerations- und Strategieebene ein Produktprofil, das in das Unternehmensportfolio passt, dann wird das Projekt freigegeben und die Konstruktion über die Projektleitung mit der Ausarbeitung kunden- und anbiertgerechter Konzepte beauftragt. Im Rahmen der Konzeptentwicklung²²³ werden, unter Einbeziehung potentieller Referenzprodukte zunächst Ideen generiert. Neben der Konstruktion können hierbei auch Lösungsvorschläge aus der Projektleitung hervorgehen oder vom Kunden vorgeschlagen werden. Aus den Ideen geht im vorliegenden Beispiel ein erstes Zielsystem (ZS1) und, darauf aufbauend, eine erste Variante (Var.1) hervor. Während Prinzip und Gestalt modelliert werden, wird in regelmäßigen Abständen die konstruktive Ausarbeitung verifiziert und validiert. Während der Konzeptentwicklung werden zusätzlich die Belange der Prototypen- und Serienfertigung mit in Betracht gezogen. Die Kundenanfrage bezieht sich auf die Abgabe von Serienpreisen für entsprechend vorgegebene Stückzahlenszenarien, die für die Projektfreigabe bereits auf Konformität mit der unternehmensinternen Strategie geprüft wurden. Ebenso beinhalten Kundenanfragen in den meisten Fällen auch Bereitstellungstermine für Prototypenteile. Kalkuliert und produziert werden die Varianten in den herstellenden Werken, die aus Entwicklungssicht das Produktionssystem darstellen. Durch wechselseitige Abstimmung zwischen Konstruktion, Projektleitung, Werken und gegebenenfalls dem Kunden, können mit zunehmendem Reifegrad wiederum neue Ideen entstehen, die entsprechende Änderungsaktivitäten verursachen. Darüber hinaus kann jedoch auch die Unsicherheit steigen, ob die derzeit favorisierte Variante (Var.1) tatsächlich aus Kunden- und Anbietersicht das zielführende Konzept darstellt. Demzufolge wird vielfach auf Grundlage eines zweiten Zielsystems (ZS2) eine weitere Variante (Var.2) generiert, deren Erstellung sich teilweise mit der ersten Variante noch überschneidet, da diese aufgrund der Unsicherheit nicht unmittelbar verworfen werden kann. Auch die zweite Variante bindet entsprechende Kapazitäten für deren Kalkulation auf der Produktionssystemebene des Werkes. Nachdem beide Konzepte konstruiert und kalkuliert sind, wird, unter Einbeziehung strategischer Gesichtspunkte, im Entwicklungsteam die Angebotsvariante festgelegt. Im vorliegenden Beispiel wird hierbei die zweite Variante (Var.2) als die zielführende Lösung identifiziert. Nach Abschluss der Projekt-

²²³ Im Rahmen dieser Arbeit werden die Konstruktionstätigkeiten in der Angebotsphase als Konzeptentwicklung bezeichnet. Die Konzeptentwicklung beginnt mit der Freigabe der Konstruktionaufgabe (Projektfreigabe) und endet mit der Fertigstellung einer oder ggf. mehreren Angebotsvarianten. Vgl. hierzu Definition 2-4: Angebotsphase in der PGE - Produktgenerationsentwicklung (S. 57)

managementaktivitäten zur Angebotserstellung wird das Angebot an den Kunden übermittelt. Durch eine Unterstützung zur frühzeitigen Erkennung der zweiten Variante als die geeignetere Lösung für die aktuelle Anfrage, hätte, wie im vorliegenden Beispiel gezeigt, das Angebot fristgerecht beim Kunden eingereicht werden können.

2.2 Variantenvielfalt durch abgeleitete Varianten

Die Produktvielfalt wird nach EHRENSPIEL durch die zunehmende Individualisierung der Gesellschaft maßgeblich beeinflusst. In diesem Zusammenhang werden wenig besetzte Marktnischen gesucht und vermehrt spezifische Kundenanforderungen bedient. Um kontinuierlich neue Kaufanreize zu schaffen werden auf Basis bestehender Produkte in regelmäßigen Abständen neue Produktvarianten abgeleitet. Zudem führt bei individualisierten Produkten²²⁴ die Tendenz zur computergestützten Individualisierung von Massenprodukten zu einer Zunahme der Produktvielfalt. Darüber hinaus wird versucht, Produkte upgradinggerecht²²⁵ zu entwickeln, um diese, z.B. durch vorgeplante Zusatzausrüstungen, während der Nutzungsphase einfacher an neue Anforderungen anpassen zu können. Demzufolge ist ein upgradinggerechtes Produkt hinsichtlich Funktionen aufwärtskompatibel, die es während der Produktentstehung noch nicht gab oder die noch nicht detailliert waren. In der Systemtechnik findet im Zusammenhang mit der Adaption eines Systems an sich ändernde Gegebenheiten (Technologien, Herstell- und Montageprozesse, etc.) auch der Begriff der Adaptivität²²⁶ Verwendung. Die Forderungen nach individualisierten und upgradinggerechten Produkten für Marktnischen haben, durch einen deutlichen Anstieg der Variantenvielfalt bei parallel reduzierten Losgrößen, Kostensteigerungen je Variante sowie verlängerte Durchlauf- und Lieferzeiten zur Folge.²²⁷ Gerade im Automobilbereich führt nach EHRENSPIEL die Steigerung der Teileanzahl zur Ableitung der vom Markt geforderten Produktvielfalt zu zunehmend komplexeren Produkten, die dringend ein Variantenmanagement zur Komplexitätsreduzierung²²⁸ erfordert. Damit soll erreicht werden, (1) den Markt nur mit den nötigen Varianten zu bedienen, (2) unnötige Varianten zu erkennen und zu reduzieren und (3) die Durchlaufzeiten zu verringern.

Das Komplexitätsmanagement unterstützt hierbei nach EHRENSPIEL, um im Rahmen des Variantenmanagements, und im Speziellen beim Entwurf von Baukästen²²⁹, den Überblick zu wahren.²³⁰

²²⁴ vgl. Lindemann & Reichwald 2006

²²⁵ vgl. Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 136 ff.

²²⁶ vgl. Patzak 1982 S. 29

²²⁷ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 661

²²⁸ vgl. Zwischenfazit zur Komplexität (S. 69)

²²⁹ vgl. Kapitel 2.2.3

Aufgrund der hohen Bedeutung der Variantenvielfalt für die Industrie, sind hierzu in der Literatur zahlreiche Veröffentlichungen verfügbar, die sich unter anderem mit dem grundlegenden Verständnis des **Variantenbegriffs** auseinandersetzen. Die folgende Tabelle 2-1 zeigt hierzu ausgewählte Definitionen.

Quelle	Verständnis des Variantenbegriffs
DUDEN-ONLINE	Der Duden erläutert den Variantenbegriff bildungssprachlich als leicht veränderte Art oder Form von etwas. ²³¹
DIN 199-1:2002-03	Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile. ²³²
VDI 1976	Der VDI-Untersuchungsausschuss „Begriffe der Produktionsplanung“ versteht unter Variante eine Abart einer Grundaufführung. ²³³
LINGNAU 1994	Varianten sind Gegenstände mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Komponenten, die Ähnlichkeiten in Bezug auf mindestens eines der Merkmale Geometrie, Material oder Technologie aufweisen. ²³⁴

Tabelle 2-1: Definitionen des Variantenbegriffs

Die aufgeführten Definitionen in Tabelle 2-1 haben gemein, dass Varianten sich auf bestehende Referenzprodukte im Verständnis von Grundaufführungen beziehen, gegenüber diesen sie in Art und Form lediglich leichten Änderungen unterliegen und demzufolge einen hohen Anteil an identischer Komponenten beinhalten.

Im Sinne der klassischen Konstruktionsmethodik nach PAHL & BEITZ liegt eine **Variantenkonstruktion** vor, wenn unter vergleichbaren Randbedingungen bereits **bekannte und umgesetzte Lösungsprinzipien wiederverwendet** und auf das vorliegende Entwicklungsziel **angepasst** werden. Dieses Verständnis ist nicht trennscharf von den Begriffen Neu- und Anpassungskonstruktion abgrenzbar. Auf Grundlage der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS kann hierfür eine konsistente Beschreibung gefunden werden.²³⁵ Das korrespondierende Verständnis des Variantenbegriffs für die vorliegende Arbeit wird im nächsten Unterkapitel im Kontext der PGE beschrieben und diskutiert.

²³⁰ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 661 f.

²³¹ Duden-Online, <http://www.duden.de/rechtschreibung/Variante>, 10.06.2016, 14:15 Uhr

²³² vgl. DIN 199-1 2002 S. 15

²³³ vgl. VDI 1976 S. 176 nach Renner 2007 S. 10 oder Schuh 2005 S. 36

²³⁴ vgl. Lingnau 1994 S. 24 und Renner 2007 S. 10 oder Schuh 2005 S. 36

²³⁵ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b und Erläuterungen zur klassischen Konstruktionsmethodik und der PGE - Produktgenerationsentwicklung in Kapitel 2.1.1

Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE

Die in dieser Arbeit thematisierte Variantenauswahl in der Konzeptentwicklung während der Angebotsphase ist im Produktentstehungsprozess vor dem SOP verortet.²³⁶ Demnach stehen die in der Entwicklungsphase befindlichen Generationen²³⁷ im Fokus der Betrachtung. Im Kontext der PGE werden diese Generationen als **Entwicklungsgenerationen** ($E_m G_n$) verstanden.²³⁸ Dabei können gemäß Abbildung 2-23 Produktentwicklungsprozesse im Sinne der PGE als Abfolge von Entwicklungsgenerationen beschrieben werden. Aus diesen können mehrere Varianten hervorgehen, die die entwicklungsinterne Variantenvielfalt erhöhen. In Abgrenzung dazu ergibt sich die Variantenvielfalt auf der Kundenseite durch die nach dem SOP vom Kunden im Markt eingeführten Produktgenerationen.

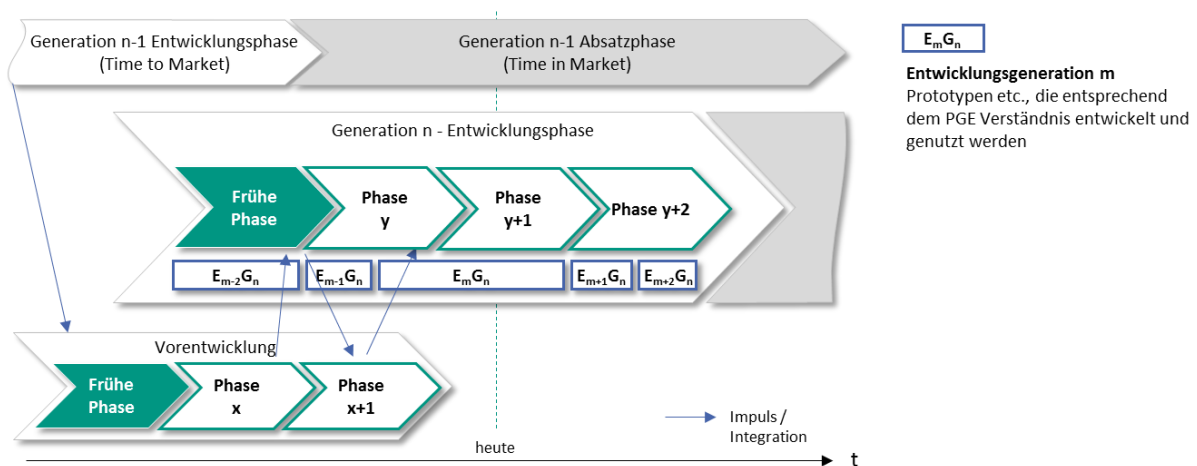


Abbildung 2-23: Entwicklungsgenerationen in der PGE - Produktgenerationsentwicklung²³⁹

In der vorliegenden Arbeit werden Varianten im Sinne der PGE als eine Art von **Entwicklungsgenerationen** verstanden. Dabei liegen die Übernahmevarianteanteile der Varianten deutlich über den Neuentwicklungsanteilen. Indem die generierten Varianten parallel zu den zu Grunde gelegten Referenzprodukten erhalten bleiben, erweitern **Varianteentwicklungen** die Anzahl an verfügbaren Varianten, aus denen für neue Entwicklungsgenerationen geeignete Lösungen ausgewählt werden können.

Zur Abgrenzung gegenüber der klassischen Variantenkonstruktion wird in dieser Arbeit der Begriff der **Varianteentwicklung** im Sinne der PGE bevorzugt. Die im Rahmen der Varianteentwicklungen verwendeten Referenzprodukte können dabei selbst Varianten aus früheren Produktgenerationsentwicklungen sein. Ferner kann innerhalb einer Entwicklungsgeneration die Erstellung mehrerer Varianten erforder-

²³⁶ vgl. Abbildung 2-20 auf S. 48

²³⁷ vgl. Generation n in der Entwicklungsphase (Time to market) in Abbildung 2-21 auf S. 50

²³⁸ vgl. Albers, Bursac & Rapp 2016 S. 799 f.

²³⁹ vgl. Albers, Rapp, Birk & Bursac 2017

lich werden, um, gerade bei komplexen Produkten, eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu haben, um mit ausreichender Sicherheit die zielführende Lösung auswählen zu können.²⁴⁰ Darüber hinaus kann eine neue Entwicklungsgeneration auch die gezielte Entwicklung mehrerer Varianten beinhalten. Die Neuentwicklungsanteile der Varianten können sich generell aus Prinzip- und Gestaltvariationsanteilen zusammensetzen. Die Anteile an erforderlichen Prinzipvariationen sind dabei von der Unternehmensexpertise abhängig. Können für eine konkrete Kundenanfrage Varianten nicht auf Basis vorhandener Referenzprodukte im Unternehmen abgeleitet werden, dann müssen Prinzipvariationen in Erwägung gezogen werden. Daraus ergibt sich im Gegenschluss, dass gültige Varianten auf Grundlage eines bestehenden Baukastens keine Prinzipvariationsanteile beinhalten und die Neuentwicklungsanteile demzufolge rein auf Variationen der Gestalt zurückzuführen sind. Besteht beispielsweise eine Anforderung darin, ein konkretes Lagerprinzip zu realisieren, dann werden nur diejenigen Elemente des Baukastens verwendet, die im Rahmen einer gültigen Kombination dieses Lösungsprinzip ermöglichen können. Wird für eine nachfolgende Entwicklungsgeneration das Lagerprinzip variiert indem ein anderes, verfügbares Prinzip eingesetzt wird, dann beinhalten die abgeleiteten Varianten, mit Bezug auf die Referenzprodukte, wiederum keine Prinzipvariationen, sofern der unternehmerische Bereich nicht überschritten wird.²⁴¹ Die Auswirkungen der unterschiedlichen Lagerprinzipien wirken sich dann auf die variantenspezifischen Verhältnisse aus Gestalt- und Übernahmevariationsanteilen aus. Diese Verhältnisse können zur Beurteilung der verfügbaren Lösungsprinzipien im Unternehmen für den konkreten Auftragsfall herangezogen werden.²⁴²

2.2.1 Komplexitäts- und Variantenmanagement

Anknüpfend an die Ausführungen des vorhergehenden Abschnittes verursacht eine zu hohe Komplexität einerseits zwar zusätzliche Kosten, jedoch kann auf der anderen Seite eine zu geringe Komplexität dazu führen, dass ein Unternehmen die Kundenanforderungen nicht bedienen kann. Demzufolge besteht nach RENNER das Ziel des Variantenmanagements darin, eine optimale Komplexität zu erreichen.²⁴³

In der Angebotsphase des fallgebenden Zulieferunternehmens geht die **Komplexität** (lat. complexus: zusammengeknüpft, verwoben, vernetzt)²⁴⁴ der Produkthanfrage als

²⁴⁰ vgl. Variantenauswahlprozess im iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell in Abbildung 2-22 auf S. 60

²⁴¹ vgl. Abbildung 5-6 auf S. 146

²⁴² vgl. Ausführungen zur Evaluation der Methode in der industriellen Praxis in Kapitel 8.2

²⁴³ vgl. Renner 2007 S. 45

²⁴⁴ vgl. Schuh 2005 S. 34

ein wesentlicher Teilaspekt in die Entscheidung mit ein, ein Angebot für eine konkrete Anfrage zu erstellen und die Projektfreigabe zu erteilen.²⁴⁵ Dabei wird zwischen wenig und hoch komplexen Anfragen unterschieden. Für die Klassifizierung werden unter anderem die Anzahl der Komponenten, die Anzahl der erforderlichen Fachdisziplinen und Geschäftsbereiche sowie unternehmensstrategische Gesichtspunkte berücksichtigt. Bei komplexen Anfragen ist demnach Aufwand und Risiko erhöht.

Nach DÖRNER ist Komplexität eine Eigenschaft von Sachverhalten und Abläufen, die durch Intransparenz, Vernetzung sowie Dynamik charakterisiert ist.²⁴⁶ Darüber hinaus beschreibt DÖRNER **Komplexität als eine subjektive Größe**.²⁴⁷ Dieser Ansicht fügt MEBOLDT ergänzend hinzu, dass die subjektive Komplexität erst durch den Betrachter entsteht.²⁴⁸ Daran anknüpfend liegt nach HEYLIGHEN Komplexität zudem im Auge des Betrachters. Was für den einen Betrachter komplex erscheint, kann für einen anderen einfach sein.²⁴⁹ DÖRNER ist ferner der Auffassung, dass bei heutigen Entscheidungssituationen zu viele Informationen vorliegen und Komplexität nichts anderes als Unüberschaubarkeit ist, die die Entscheidungsfindung behindert.²⁵⁰

SIMON beschreibt den Begriff der Komplexität als eine wesentliche Eigenschaft von Systemen, die aus einer Vielzahl an Elementen und Interaktionen zwischen Elementen bestehen.²⁵¹ PATZAK beschreibt den Komplexitätsbegriff ebenfalls weniger als eine subjektive Größe und versteht Komplexität seiner etymologischen Bedeutung nach sowohl als „zusammenhängend“ als auch „vielumfassend“. Darauf aufbauend beschreibt PATZAK Komplexität als strukturbeschreibendes Merkmal von Systemen, um beispielsweise Überschaubarkeit, Umfang, Handlichkeit, und innere Vermaschung zu erfassen. Entsprechend Abbildung 2-24 untergliedert PATZAK hierzu Komplexität in **Varietät** (Elementvielfalt) und **Konnektivität** (Beziehungsvielfalt), die miteinander korrelieren. Hiernach resultiert aus einer Verringerung der Varietät eine Erhöhung der Konnektivität, um eine gegebene Systemfunktion beizubehalten, so dass eine Reduzierung der Teileanzahl durch eine Erhöhung der Beziehungen unter den verbliebenen Teilen kompensiert werden kann. Die Element- und Beziehungsvielfalt eines Systems bildet dabei dessen strukturelle Komplexität aus.²⁵²

²⁴⁵ vgl. Abbildung 2-22 auf S. 60

²⁴⁶ vgl. Dörner 1998 S. 58

²⁴⁷ vgl. Dörner 1998 S. 61 f.

²⁴⁸ vgl. Meboldt 2008 S. 79

²⁴⁹ vgl. Heylighen 1999

²⁵⁰ vgl. Dörner 2002 S. 110

²⁵¹ vgl. Simon 1994 S. 183 nach Ebel 2015 S. 24

²⁵² vgl. Maurer 2007 S. 29 ff.

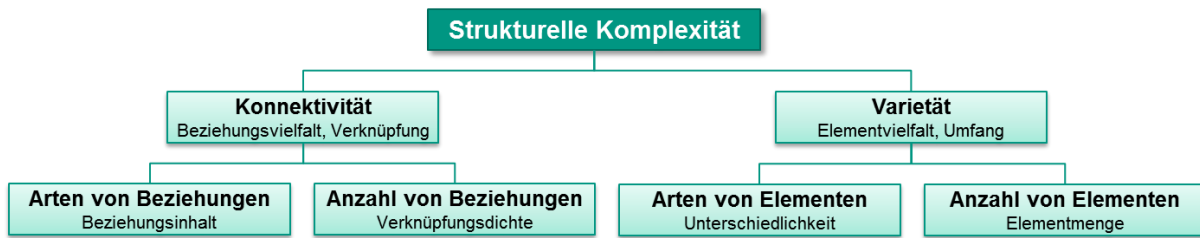


Abbildung 2-24: Strukturelle Komplexität nach PATZAK²⁵³

Neben der Zusammensetzung von Systemen, die durch die Anzahl und Verschiedenartigkeit der Elemente und Beziehungen bestimmt wird, wirken sich auch die Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente und die Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen den Elementen auf die Komplexität aus. Die Abhängigkeit der Komplexität von der Veränderlichkeit im Zeitablauf bezeichnet SCHUH als **dynamische Komplexität**.²⁵⁴ Gemäß Abbildung 2-25 stellt er die Art der Zusammensetzung (strukturelle Komplexität) und die Veränderlichkeit im Zeitablauf (dynamische Komplexität) in einer Matrix dar und leitet vier grundsätzliche Systemtypen ab:

- **Einfaches** (wenig Elemente, Beziehungen und Verhaltensmöglichkeiten),
- **kompliziertes** (viele Elemente und Beziehungen; Verhalten ist deterministisch),
- **relativ komplexes** (wenig Elemente und Beziehungen; hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten; keine vollständige Beherrschbarkeit möglich) und
- **äußerst komplexes System** (Vielzahl von Elementen mit vielfältigen Beziehungen; große Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten mit veränderlichen Wirkungsverläufen zwischen den Elementen).

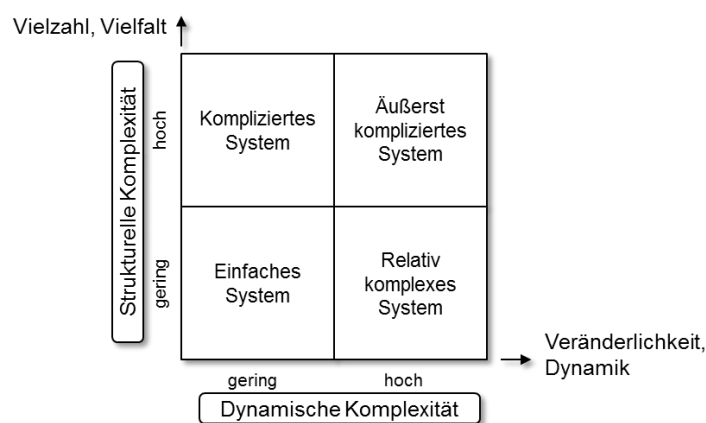


Abbildung 2-25: Zustände komplexer Systeme²⁵⁵

²⁵³ vgl. Patzak 1982 S. 23

²⁵⁴ vgl. Schuh 2005 S. 5 f.

²⁵⁵ vgl. Schuh 2005 S. 6 und Ebel 2015 S. 25

Zum Umgang mit Komplexität werden im Rahmen des **Komplexitätsmanagements** nach HOMBURG & DAUM vordergründig (1) die Vermeidung von Komplexität und, darüber hinaus, (2) die Beeinflussung des Komplexitätsgrades durch die systematische Reduktion von Komplexität sowie, wenn ein entsprechender Komplexitätsgrad erforderlich ist, (3) der wirtschaftliche Umgang mit Komplexität in Betracht gezogen.²⁵⁶ Basierend auf den unterschiedlichen Sichten in der Literatur umfasst Komplexitätsmanagement nach SCHUH die Gestaltung, Steuerung und Entwicklung der Vielfalt des Leistungsspektrums (Produkte, Prozesse und Ressourcen) im Unternehmen. Durch die Verstärkung und Dämpfung der Komplexität wird die Fähigkeit angestrebt, die Vielfalt in allen Wertschöpfungsstufen so zu beherrschen, dass ein maximaler Beitrag zum Kundennutzen bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit des Leistungserstellers erzielt werden kann.²⁵⁷

Innerhalb des Komplexitätsmanagements unterscheidet SCHULTE drei Grundkategorien von zu hoher Komplexität:²⁵⁸

- **Organisationsstruktur** (Schaffung von Zentralbereichen, Stäben oder simultane Berücksichtigung von mehreren gleichgewichtigen Dimensionen),
- **Diversifikation** (Unternehmungs- und Konzernportfolio weist zahlreiche heterogene Geschäftsfelder auf. In der Strategie wird der Diversifikation ein höherer Stellenwert bemessen als der Konzentration) und
- **Produktvarianten und Wertschöpfungstiefe** (Versuch auf der Ebene der Geschäftsfelder stagnierendem Marktwachstum durch eine höhere Zahl von Produktvarianten und der Bedienung von Nischenkunden entgegenzusteuern. In der Leistungserstellung wird der Eigenfertigung und der damit einhergehenden hohen Wertschöpfungstiefe ein hoher Stellenwert eingeräumt).

RENNER verortet **Variantenmanagement** in seiner Arbeit zusammen mit technischen und organisatorischen Maßnahmen unter Ansätzen zur Beherrschung der Variantenvielfalt.²⁵⁹ Nach FIRCHAU ET AL. stellt das Variantenmanagement eine Teilmenge des Komplexitätsmanagements dar.²⁶⁰ Diese Ansicht vertritt auch SCHUH, der die Hauptaufgabe des Variantenmanagements in der Handhabung des durch die Diversifikation der Unternehmung verursachten Anstiegs an Produktvarianten sieht. Die Produktpalette steht hierbei im Mittelpunkt des Variantenmanagements, das als Problemlöser und Problemabsorber einer breiten Produktpalette fungiert. Demgegenüber steht beim Komplexitätsmanagement nicht die physische Leistung im Zentrum der

²⁵⁶ vgl. Homburg & Daum 1997 S. 333 nach Schuh 2005 S. 35

²⁵⁷ vgl. Schuh 2005 S. 36

²⁵⁸ vgl. Schulte 1995 S. 758 nach Schuh 2005 S. 36

²⁵⁹ vgl. Renner 2007 S. 39 ff.

²⁶⁰ vgl. Firchau, Franke, Huch & Menge 2002 S. 12 nach Renner 2007 S. 44

Betrachtung, sondern die Bewältigung der vom Gesamtsystem erzeugten Komplexität. SCHUH leitet hieraus ab, dass Variantenmanagement die Gestaltung, Steuerung und Strukturierung von Dienstleistungen und Produktsortimenten im Unternehmen umfasst. Ziel ist es, die vom Produkt ausgehende Komplexität (Anzahl Teile, Variantenvielfalt, etc.) wie auch die auf das Produkt einwirkende Komplexität (Marktdiversifikation, Produktionsabläufe, etc.) mit geeigneten Instrumenten zu bewältigen.²⁶¹

Zwischenfazit zur Komplexität

Im Bereich der Konsum- und Investitionsgüterindustrie führt die Internationalisierung und der globale Wettbewerb zu enormen Anforderungen an die Produktentwicklung. Zudem werden Produkte zunehmend funktional angereichert.²⁶² Diese funktionale Anreicherung ist bedingt durch die immer vielfältigeren Kundenanforderungen an Funktionsumfang und Wechselwirkung mit anderen Produkten. Hieraus resultiert die Notwendigkeit, die Komplexität der Produkte entsprechend zu steigern. Demnach kann es nicht das Ziel aus Sicht der Entwicklungsmethodik sein, die Komplexität zu reduzieren, wenn der Markt zunehmend komplexere Produkte fordert. Vielmehr müssen Entwicklern Methoden zur Verfügung gestellt werden, die einen effizienten Umgang mit notwendiger Komplexität ermöglichen. Der Umgang mit gegebener, notwendiger Komplexität ist auch das Ziel der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Variantenauswahl, mit der aus bestehenden Referenzprodukten eines notwendig komplexen Baukastens fallspezifisch geeignete Varianten abgeleitet werden können.

2.2.2 Ursachen und Auswirkungen der Variantenvielfalt

Nahezu alle Firmen im Maschinenbau, in der Automobiltechnik oder in der Elektrotechnik stehen nach FRANKE dem Problem gegenüber, eine große Anzahl an Varianten entwickeln, produzieren, vertreiben und abwickeln zu müssen. Diese Tendenz wird in Zukunft eher noch zunehmen und führt damit zu immer komplexer werdenden Abläufen und Steuerprozessen und damit zwangsläufig zu steigenden Kosten. Da hieraus vielfach eine Verschlechterung der Wettbewerbssituation resultiert ist es entscheidend die **Ursachen der Variantenentstehung** zu verstehen, um Methoden für eine optimierte Entwicklung, Abwicklung und Bewertung variantenreicher Produkte bereitstellen und anwenden zu können. Die (1) Vermeidung unnötiger Varianten und die (2) optimale Strukturierung und Abwicklung der notwendigen Varianten sieht FRANKE hierbei als die beiden grundlegenden Ansätze.²⁶³

²⁶¹ vgl. Schuh 2005 S. 36 f.

²⁶² Albers im Vorwort des Herausgebers zu Band 93 in Bursac 2016

²⁶³ vgl. Franke 1998 S. 1

Als Gründe für die Variantenentstehung führt er nachfolgende Punkte auf:²⁶⁴

- Neue Anwendungen
- Diversifikation²⁶⁵ der Anwendungen und der Märkte
- Politisch bedingte Veränderungen (z.B. Zusammenbrüche von Absatzmärkten)
- Zunehmendes Anspruchsniveau der Kunden
- Höhere technische Komplexität der Produkte (z.B. Vordringen der Elektronik)
- Nebeneinander einfacher und hoch automatisierter Produkte
- Baureihen- bzw. Produktalter (zunehmend haben Produkte langjährige Vorgänger)
- Notwendigkeit langjähriger Ersatzteillieferungen (z.B. bei Investitionsgütern)
- Teilw. kostenbedingter Veränderungswettbewerb aus einfachen Massenprodukten
- Kosten- und sicherheitsbedingte, alternative Lieferanten

Einen zentralen Grund für die Variantenentstehung sieht FRANKE in der zunehmenden, technischen Komplexität der Produkte. Bezeichnet in diesem Zusammenhang Komplexität eine Systemeigenschaft, dann dürfen nach SCHUH Vielfalt und Komplexität grundsätzlich nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da die Vielfalt die Maßeinheit für die Komplexität des Systems darstellt.²⁶⁶ Hinsichtlich der Variantenvielfalt kann dabei nach KERSTEN zwischen **interner und externer Variantenvielfalt** unterschieden werden. Die korrespondierenden Ursachen für eine externe Variantenvielfalt entstehen durch Faktoren, wie beispielsweise Markt, Umwelt, Wettbewerb und Technologie, auf die ein Unternehmen wenig Einfluss nehmen kann. Auf der anderen Seite hat eine interne Vielfalt ihre Ursachen innerhalb des Unternehmens.²⁶⁷

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der **internen Variantenvielfalt**, die während der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase entstehen kann.²⁶⁸ Grundsätzlich können interne Ursachen auf technische und organisatorische Defizite der unternehmenseigenen Rahmenbedingungen zurückgeführt werden und eine unnötige Variantenvielfalt zur Folge haben.²⁶⁹ EHRENSPIEL ET AL. heben hierzu folgende Ursachen für die Entstehung von interner Variantenvielfalt in den Vordergrund:²⁷⁰

²⁶⁴ vgl. Franke 1998 S. 2

²⁶⁵ vgl. Kapitel 2.2.1: Grundkategorien des Komplexitätsmanagements nach Schulte 1995

²⁶⁶ vgl. Espejo, Schuhmann, Schwaninger & Bilello 1996 S. 60 nach Schuh 2005 S. 34

²⁶⁷ vgl. Kersten 1999 S. 158 ff. nach Renner 2007 S. 22 oder Ehrlenspiel 2014 S. 299

²⁶⁸ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012 und Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE (S. 64 f.)

²⁶⁹ vgl. Schuh 1989

²⁷⁰ vgl. Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 301

- Sprunghaftes, aktionistisches Verhalten der Unternehmensleitung mit neuen, nicht abgestimmten Entscheidungen zu Produkten, zur Fertigung, etc.
- Mangel an Koordination und Zusammenarbeit zwischen Unternehmensbereichen.
- Kommunikationsdefizite in Entwicklung und Konstruktion.
- Mangelhafte Zugriffsmöglichkeit auf relevante Informationen.
- Unzureichende Beschreibung der Produktstruktur.
- Zu späte Normung und Standardisierung der Bauteile.

Die aufgeführten, internen Ursachen führen nach Auffassung von EHRENSPIEL ET AL., insbesondere durch die Mängel in Kommunikation und Standardisierung, kontinuierlich zu neuen, unnötigen Varianten, obwohl auftragsseitig viele Gleichteile hätten verwendet werden können. Dies liegt mitunter an der mangelnden Kommunikation zwischen Konstruktions- und Entwicklungsabteilungen und der unzureichenden Verwendung bestehenden Erfahrungswissens. Deshalb seien an dieser Stelle die beiden nachfolgenden Ursachen ergänzend erwähnt:²⁷¹

- Bereits vorhandene Erfahrung wird nicht genutzt.
- Ungeordnetes Änderungswesen in allen Unternehmensbereichen.

Gerade der Zugriff und die Verwendbarkeit von bestehendem **Erfahrungswissen** spielt für die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Entscheidungsunterstützung eine zentrale Rolle, um einerseits für neue Kundenanfragen auf Basis bestehender Lösungen kunden- und anbietersgerechte Varianten ableiten zu können. Ferner müssen diese auf Basis der Firmenexpertise bewertet werden, um aus der Menge an gültigen Varianten die zielführenden Konzepte identifizieren zu können. Hierzu stellt die PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS²⁷² ein geeignetes Erklärungsmodell dar, um reale Entwicklungsprozesse unter Einbeziehung des Firmen-Know-hows zu beschreiben. Da die Variantenauswahl darüber hinaus ein stark unsicherheitsbehafteter Prozess ist, müssen, zur Schaffung einer entsprechenden Bewertungsgrundlage, vielfach mehrere Varianten erstellt werden, verbunden mit aufwändigen Detailkonstruktionen auf Komponenten- und Systemebene.²⁷³ Dies führt häufig zu einer hohen unternehmensinternen Variantenvielfalt, die nach LINDEMANN & REICHWALD vor allem, bezogen auf variantenreiche Serienprodukte, zu einer Steigerung der kombinatorischen Produkt- und Prozesskomplexität führt.²⁷⁴ Deshalb ist insbesondere die Speicherung des fallspezifischen Erfahrungswissens zu denjeni-

²⁷¹ vgl. Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 301 f.

²⁷² vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

²⁷³ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

²⁷⁴ vgl. Lindemann & Reichwald 2006 S. 9 ff.

gen Varianten entscheidend, die ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr zielführend und damit nicht mehr Teil des Zielsystems²⁷⁵ waren, um im Rahmen von Folgeprojekten unnötige Konstruktionsaktivitäten zu vermeiden.²⁷⁶ Daneben hat auch das **Änderungswesen** einen Einfluss auf die interne Variantenvielfalt. In diesem Zusammenhang kann ein zu früher Konstruktionsstart auf vielfach vagen Informationen Änderungen begünstigen und damit zusätzliche Iterationen in den beteiligten Fachbereichen bereits während der Ausarbeitung eines Konzeptes erzeugen.²⁷⁷ Einerseits fordert dabei ein konsequentes Änderungsmanagement die Dokumentation jeder Änderung, was entsprechende Aufwände generiert. Jedoch tritt häufig die Situation ein, dass anstelle einer Änderung in Form einer neuen Version, ein neuer, unabhängiger Datensatz in Form einer neuen Variante erzeugt wird.²⁷⁸ Da vielfach Unsicherheit darüber herrscht, ob die aktuell nicht mehr favorisierte Lösung nicht doch noch einmal für das derzeitige Projekt relevant werden wird, werden auf diese Weise Varianten „eingefroren“ und stehen im Rahmen der internen Variantenvielfalt auch für Nachfolgeprojekte zur Verfügung.

In den bisherigen Ausführungen wurde bereits mehrfach von **unnötigen Varianten** gesprochen, die eine **unnötige Variantenvielfalt** zur Folge haben. Wie im vorhergehenden Kapitel angedeutet, gibt es aus dem Bereich des Komplexitäts- und Variantenmanagements zahlreiche Veröffentlichungen, die sich dieser Thematik annehmen und Ursachen und Auswirkungen unnötiger Komplexität und Varianten diskutieren. Teilweise wird aber nicht präzisiert was genau unter unnötigen Varianten verstanden wird. ALBERS & WALCH präzisieren auf Grundlage einer Fragebogen-Studie in der industriellen Konstruktionspraxis, dass Varianten inklusive der hierzu durchgeführten Aktivitäten dann unnötig sind, wenn durch eine unzureichende oder gar ausbleibende Dokumentation die gewonnenen Erkenntnisse nicht für Folgeprojekte genutzt werden können.²⁷⁹ Nach JESCHKE sind in diesem Zusammenhang Varianten, die aufgrund externer Anforderungen entstehen, überwiegend nicht vermeidbar, wohingegen unternehmensinterne Gründe eher zu unnötiger Variantenvielfalt führen.²⁸⁰ Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen der Fragebogen-Studie von ALBERS & WALCH, dass zusätzliche Variantenbildungen unter anderem auch auf die Kunden zurückzuführen sind. Aber auch hierbei können an eine Variantenbildung geknüpfte Informationen darüber, weshalb die zunächst favorisierte Lösung für den konkreten Kunden zu einem späteren Zeitpunkt vom Zielsystem ausgeschlossen wurde, für Folgeprojekte

²⁷⁵ vgl. Albers, Klingler & Ebel 2013

²⁷⁶ vgl. Walch & Albers 2014

²⁷⁷ vgl. Walch & Albers 2014

²⁷⁸ vgl. Abbildung 5-3 auf S. 142

²⁷⁹ vgl. Walch & Albers 2014

²⁸⁰ vgl. Jeschke 1997 S. 4 nach Renner 2007 S. 24

sehr nützlich sein und zu einer Reduzierung der Variantenvielfalt beitragen. Demnach kann nicht pauschal von unnötigen Varianten gesprochen werden.²⁸¹

Häufig wird im Zusammenhang mit unnötiger Variantenvielfalt in der Literatur auch von **unnötigen Iterationen** gesprochen die mit unnötigen Varianten in Verbindung gebracht werden. Hierzu ist anzumerken, dass der Iterationsbegriff im Allgemeinen nicht negativ belegt ist. Im Rahmen der Produktentstehung verläuft die Konkretisierung des zu entwickelnden Systems in den wenigsten Fällen linear ab. Vielmehr muss bei Produktentstehungsprozessen von einer Unvermeidbarkeit von Iterationen gesprochen werden. Basierend auf dem ZHO-Modell umfasst eine vollständige Iteration nach LOHMEYER die (1) Analyse des Zielsystems, (2) die Objektsystemsynthese, (3) die Analyse der Objekte des Objektsystems sowie die (4) Synthese des Zielsystems.²⁸² Daran anknüpfend ist ein iteratives Vorgehen bei der Variantenauswahl auf Basis abgeleiteter Varianten unumgänglich, da die Entscheidungsgrundlage u.a. Bewertungszielgrößen darstellen, die anfänglich auf Komponentenebene noch nicht verfügbar sind, sondern iterativ auf Systemebene konkretisiert werden.²⁸³ Nach WYNN können Iterationen in die in Abbildung 2-26 aufgezeigten sechs Iterationsarten unterscheiden werden.²⁸⁴

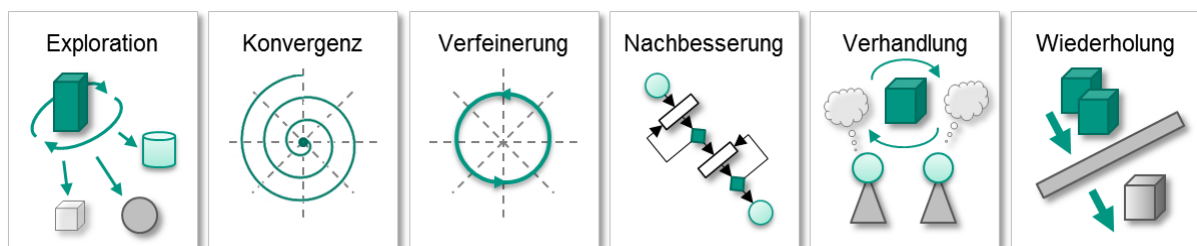


Abbildung 2-26: Sechs Sichtweisen von Iterationen²⁸⁵

Bei der **Exploration** werden Iterationen dafür aufgewendet, um den Problem- und Lösungsraum zu erkunden. Zur Annäherung an einen definierten Zielzustand wird der erkundete, divergente Lösungsraum durch **Konvergenz**-Iterationen schrittweise um die nicht zielführenden Lösungen bereinigt. Zur **Verfeinerung** einzelner Details werden Iterationen zur Optimierung durchgeführt. Iterationen zur **Nachbesserung** werden unter anderem zur Anpassung an geänderte Randbedingungen erforderlich. Auch Zielkonflikte, beispielsweise innerhalb eines Projektteams, werden in **Verhandlungen** iterativ gelöst. Abschließend können Iterationen auch als **Wiederholungen** im Sinne eines ähnlichen Vorgehens verstanden werden.

²⁸¹ vgl. Walch & Albers 2014

²⁸² vgl. Lohmeyer 2013 S. 122

²⁸³ vgl. Walch & Albers 2014

²⁸⁴ vgl. Wynn 2007 S. 75 ff.

²⁸⁵ nach Wynn, Eckert & Clarkson 2007

Als Vorgriff auf die in dieser Arbeit vorgestellte Methode sei an dieser Stelle angemerkt, dass zur Variantenauswahl im Wesentlichen Explorations-Iterationen erforderlich sind, um zunächst gültige Varianten auf Basis bestehender Lösungen abzuleiten. Hiernach wird mittels Konvergenz-Iterationen auf die zielführenden Lösungen fokussiert und die variantenspezifischen Bewertungszielgrößen iterativ verfeinert.

2.2.3 Ansätze zum Umgang mit der Variantenvielfalt

Die etablierten Ansätze zum Umgang mit der Variantenvielfalt lassen sich grundsätzlich in technische und organisatorische Maßnahmen einteilen. Die **technischen Maßnahmen** fokussieren dabei auf die konstruktionsseitige Beeinflussung der Vielfalt. Hierzu schlägt EHRENSPIEL die folgenden Maßnahmen vor:²⁸⁶

- **Integralbauweise** (Umgestalten mehrerer Teile zu einem Teil)
- **Gleichteile** (möglichst viele gleiche Teile in einem Produkt verwenden)
- **Wiederholteile** (Teile in unterschiedlichen Produkten verwenden)
- **Teilefamilie** (Teile gleicher Funktion standardisieren)
- **Baukastensystem, Modul-, Plattformbauweise** (Mehrfachverwendung von Teilen und Baugruppen)
- **Baureihen** (Sonderkonstruktionen vermeiden bei Produkten gleicher Funktion)
- **Normteile** (Normteile verwenden)
- **Kaufteile** (Kaufteile verwenden, die in größeren Stückzahlen gefertigt werden)

Neben den technischen Maßnahmen nennt EHRENSPIEL die nachfolgend aufgeführten **organisatorischen Maßnahmen**, die zur Umsetzung der technischen Maßnahmen zur Reduzierung der Variantenvielfalt erforderlich sind:²⁸⁷

- Verbesserung der **Kommunikation** zwischen Konstrukteuren ähnlicher Produkte und mit Fertigung, Kostenrechnung, Materialwirtschaft,²⁸⁸
- Einführung von **DV-Informationssystemen** (für Norm-, Kauf-, Eigenteile).
- Verwendung der **Prozesskostenrechnung**²⁸⁹ zur Beurteilung der Einführungs- und Änderungskosten,
- Vorgabe eines **Malus**²⁹⁰ (z.B. von 2.500 €) pro Änderung, der durch die Kostensenkung, die mit der Änderung bewirkt werden soll, überwunden werden muss.

²⁸⁶ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 667

²⁸⁷ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 670

²⁸⁸ vgl. auch Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 332

²⁸⁹ vgl. Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 445 f.

- Einführung eines **Produkt-Konfigurationssystems**, das auch direkt beim Kunden die Zusammenstellung von Baukastensystemen einschließlich der Kosten (Preise) gestattet.²⁹¹
- Bei der Strategie der **Produktindividualisierung** wird zur Befriedigung von Kundenbedürfnissen schon bei der Vorentwicklung ein weitgehendes Variantenprogramm angestrebt.²⁹²

Mit Bezug auf die Einführung eines Produkt-Konfigurationssystems als organisatorische Maßnahme sei an dieser Stelle angemerkt, dass die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode zur Ableitung und Bewertung von Varianten auf Basis eines bestehenden Baukastens auf zentrale Belange der Variantenkonfiguration zurückgreift. Dabei dient die Methode zur rein entwicklungsinternen Anwendung in Konstruktionsabteilungen, indem der Konstrukteur bei der Variantenauswahl für eine konkrete Kundenanfrage unterstützt wird. Dennoch muss die finale Entscheidung für eine kunden- und anbietersgerechte Variante auf Grundlage bestehenden Erfahrungswissens durch den Konstrukteur in enger Abstimmung mit den involvierten Fachabteilungen gefällt werden. Für einen effizienten Umgang mit der Variantenvielfalt bedarf es dabei stets sowohl organisatorischer als auch technischer Maßnahmen.

Nachfolgend werden ausgewählte, technische Maßnahmen vorgestellt. Die Konfiguration, die EHRENSPIEL den organisatorischen Maßnahmen zuordnet, wird später im Kapitel 2.3 zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl thematisiert.²⁹³

Modulare Bauweise

In der Literatur werden im Zusammenhang mit der modularen Bauweise häufig die Begriffe Modularisierung, Modul, Baukasten, Baureihe, Paket, Plattform und Produktfamilien beschrieben. Die hieraus in der folgenden Abbildung 2-27 aufgeführten Begriffe stellen nach SCHUH Produktstrukturierungsprinzipien dar.

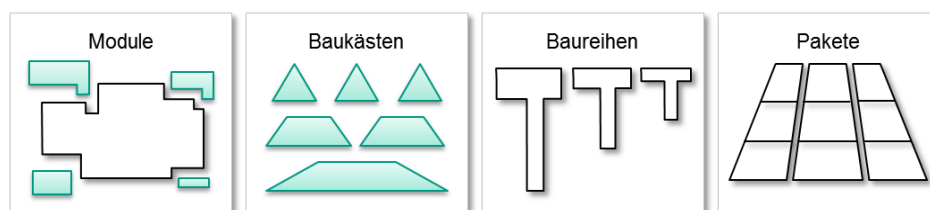


Abbildung 2-27: Produktstrukturierungsprinzipien nach SCHUH²⁹⁴

²⁹⁰ Der „Malus“ entspricht im Mittel den Einführungskosten für ein neues Teil. Er gilt nicht für Änderungen aus Qualitätsgründen. Vgl. hierzu Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 332 (Bild 7.12-11) und Ehrlenspiel 2009 S. 663 (Bild 9.4-1)

²⁹¹ vgl. Menk 2007 nach Ehrlenspiel 2009 S. 670

²⁹² vgl. Lindemann & Reichwald 2006

²⁹³ vgl. Variantenkonfiguration in Kapitel 2.3.2

Die Paketbildung ist dabei nach RAPP bei den drei anderen in Abbildung 2-27 gezeigten Produktstrukturtypen möglich und stellt demnach mehr einen Ansatz zur Produktstrukturierung als eine Produktstruktur dar. Ferner vertritt RAPP hierzu die Auffassung, dass im Grunde nur Baukästen und Module sämtliche Merkmale einer Produktstruktur beschreiben. Da diese beiden Typen eng miteinander verwandt sind, wird in der Literatur der Produktstrukturbegriff häufig mit Modularität gleichgesetzt und entsprechende Modularitätstypen definiert.²⁹⁵ Zur bewussten Einschränkung der vom Produkt gebotenen Konfigurationsmöglichkeiten, werden Pakete gerne in der Automobilindustrie für Ausstattungen und Anbauteile gebildet.²⁹⁶

Modul

Nach SCHUH sind Module als Anbauteile zu verstehen, die mit unterschiedlichen Funktionen, aber einheitlichen Schnittstellen, eine vielfältige Kombinierbarkeit der Komponenten und eine effiziente Vielfaltserzeugung ermöglichen.²⁹⁷ PONN & LINDEMANN verwenden den Modulbegriff für physisch zusammenhängende Einheiten, die in der Regel in einem Gesamtsystem austauschbar sind. Auf Produkte bezogen zeichnen sich Module durch klar definierte Schnittstellen aus, so dass eine einfache Montage mit nur wenigen Befestigungsteilen möglich wird.²⁹⁸

FELDHUSEN & GEBHARDT beschreiben Module als Subsysteme deren Grenzen nach fertigungstechnischen und funktionalen Gesichtspunkten mit dem Ziel festgelegt sind, Module unabhängig vom Gesamtsystem entwickeln, konstruieren, fertigen und prüfen zu können.²⁹⁹ Ferner besteht nach FELDHUSEN & GEBHARDT eine zentrale Maßnahme zum Umgang mit der Unternehmenskomplexität darin, mit möglichst wenigen produzierten Komponenten (interne Vielfalt) möglichst viele unterschiedliche Produkte (externe Vielfalt) zu erzeugen. Hierzu verweisen sie insbesondere auf Baureihen (Variation der Größe), Baukästen (Variation der Gesamtfunktion) oder Plattformen (Variation des Designs) die, durch die modulare Bauweise, die nötige Kombinatorik der Module ermöglichen.³⁰⁰

Für die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode ist die Kombinatorik der vorhandenen Referenzprodukte in Form technischer Subsysteme von zentraler Bedeutung, um eine Menge an geforderten Funktionen und Attributen auf Systemebene im Rahmen einer gültigen, abgeleiteten Varianten zu vereinen. Die kombinierbaren, techni-

²⁹⁴ vgl. Schuh 1989 S. 58 nach Schuh 2005 S. 127

²⁹⁵ vgl. Rapp 1999 S. 53 f. nach Schuh 2005 S. 128

²⁹⁶ vgl. Schuh 1989 S. 59 nach Schuh 2005 S. 128 f.

²⁹⁷ vgl. Schuh 1989 nach Schuh 2005 S. 128

²⁹⁸ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 444

²⁹⁹ vgl. Feldhusen & Gebhardt 2008 S. 38

³⁰⁰ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 27

schen Subsysteme werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Elemente eines unternehmensintern zur Verfügung stehenden Baukastens beschrieben. Darüber hinaus können diese Elemente auf Grundlage der Definition des Modulbegriffs nach ALBERS ET AL. als Module verstanden werden.³⁰¹

Definition 2-5: Modul

Ein Modul ist ein technisches Subsystem, das sich durch andere technische Subsysteme ersetzen lässt, so dass die Menge aller Funktionen oder Attribute des technischen Systems variiert wird.

Modularisierung

Modularisierung bedeutet gemäß der VDI-Richtlinie 2206 die Bildung einer Produktstruktur mit Modulen, bei der die Beziehungen zwischen den Modulen geringer ausgeprägt sind als die Beziehungen innerhalb der Module. Damit lassen sich Wechselwirkungen zwischen Modulen auf ein Minimum reduzieren.³⁰² SCHUH präzisiert darüber hinaus, dass durch eine geeignete Gliederung eines Produktes (Modularisierung) insbesondere Schnittstellenvarianten durch die Verringerung der Abhängigkeiten zwischen den Elementen (Modulen) reduziert werden können³⁰³ und nennt u.a. die beiden folgenden Ziele der Modularisierung:³⁰⁴

- Trennung von kundenspezifischen Modulen und Standard-Modulen und
- Generierung einer größeren Anzahl an Produktvarianten aus einer gegebenen Anzahl an Elementvarianten.

Übertragen auf die in dieser Arbeit als Leitbeispiel verwendeten, gebauten Nockenwellensysteme³⁰⁵ bedeutet dies, dass zum einen diejenigen Elemente als Standard-Module deklariert werden, die in jeder gebauten Nockenwelle enthalten sein müssen.³⁰⁶ Darüber hinaus können jedoch alle Elemente des Baukastens fallspezifisch variiert werden. Für die Ableitung gültiger Varianten aus einer Menge an gegebenen Elementen (Modulen) spielt die Beschreibung der Elemente eine entscheidende Rolle. Nach PONN & LINDEMANN ist hierbei die Definition geeigneter Schnittstellen Voraussetzung für die Bildung und den Austausch von Modulen. Die Modularisierung basiert ihrem Verständnis nach auf der Zerlegung eines Systems in leicht austausch-

³⁰¹ vgl. Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015 und Bursac 2016 S. 49

³⁰² vgl. VDI 2206 2004 S. 18

³⁰³ vgl. Schuh 2005 S. 130

³⁰⁴ vgl. Rapp 1999 S. 59 nach Schuh 2005 S. 130

³⁰⁵ vgl. Abbildung 1-5 auf S. 10

³⁰⁶ In dieser Arbeit sind die Standard-Module bzw. -Elemente den Hauptelementklassen einer gebauten Nockenwelle zugeordnet. Vgl. Herleitung der Hauptelementklassen in Kapitel 6.3.1 auf S. 194 ff.

bare Teile (Module) und dient ferner der Unterteilung des Gesamtsystems in überschaubare Einheiten, die unabhängig voneinander entwickelt, beschafft, produziert und geprüft werden können.³⁰⁷ Nach FELDUSEN & GEBHARDT wird Unabhängigkeit zwischen den Elementen einerseits durch weniger stark definierte Beziehungen untereinander und andererseits durch wenige, standardisierte Schnittstellen erzeugt.³⁰⁸ Jedoch wird es aufgrund von emergenten Effekten, die auch Bestandteil der Betrachtung in dieser Arbeit sind, kaum möglich sein, Subsysteme eines komplexen Produktes unabhängig vom Gesamtsystem entwickeln und prüfen zu können.³⁰⁹

Nachfolgend wird die Plattformbauweise erläutert, die als ein Sonderfall der Modularisierung aufgefasst werden kann.³¹⁰

Plattformbauweise

Unter einer Plattform versteht SCHUH generell die Zusammenfassung derjenigen Komponenten, Schnittstellen und Funktionen, die über eine ganze Produktfamilie vereinheitlicht und daher zeitlich stabil sind.³¹¹ PAHL ET AL. präzisieren darüber hinaus, dass ein Plattformprodukt aus einer ausführungsneutralen Produktplattform mit standardisierten Elementen besteht. Diese Standardelemente bilden eine einheitliche Basis für alle Varianten des Produktprogramms. Zur Erzeugung der Varianten werden der Plattform individualisierte Elemente, die PAHL ET AL. in diesem Zusammenhang als Produktgestaltungselemente beschreiben, aufgesetzt. Ferner erläutern PAHL ET AL., dass bei der Plattformbauweise die Produktvarianten im Gegensatz zur Baukastenbauweise nicht grundsätzlich durch Konfiguration von mehreren vorausgedachten Bausteinen zusammengesetzt werden, weshalb Plattform- und Baukastenbauweise nicht als identische Bauweisen bezeichnet werden können.³¹² Diesbezüglich erläutert BAUMGART, dass die produktspezifischen Anbauten untereinander nicht kombinierbar oder gegenseitig tauschbar sein müssen, und deshalb ein Plattformprodukt keinen Baukasten darstellt.³¹³ Diese Anbauten werden durch LINDENMANN & MAURER als „Hüte“ bezeichnet, die, als variable Module, auf einer vereinheitlichten Trägerstruktur aufgesetzt werden, und damit eine Variantenbildung im Kontext der Plattformbauweise ermöglichen.³¹⁴ ALBERS ET AL. greifen in ihrer Definition den Hutbegriff auf und präzisieren, dass die Plattform die Menge jener Subsysteme umfasst, die in unterschiedlichen technischen Systemen unverändert zum Einsatz

³⁰⁷ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 260

³⁰⁸ vgl. Feldhusen & Gebhardt 2008

³⁰⁹ vgl. Bursac 2016 S. 50

³¹⁰ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 260 f. und Schuh 2005 S. 132

³¹¹ vgl. Schuh 2005 S. 133

³¹² vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2013 S. 856 f.

³¹³ vgl. Baumgart 2005 nach Feldhusen & Gebhardt 2008 S. 42

³¹⁴ vgl. Lindemann & Maurer 2006 S. 44

kommt, wobei der Hut die restlichen Subsysteme beinhaltet, die in den unterschiedlichen technischen Systemen die Menge aller Funktionen oder Attribute variieren.³¹⁵

Produktfamilie

Eine Produktfamilie ist die Menge an verwandten Produkten, d.h., die Menge an Produktvarianten.³¹⁶ BLEES beschreibt darüber hinaus, dass eine Produktfamilie modular strukturiert ist, wenn sie aus Modulen mit definierten Schnittstellen aufgebaut ist, deren innere, technisch-funktionalen und produktstrategischen Beziehungen stärker ausgeprägt sind, als die Beziehungen untereinander. Innerhalb der Produktfamilie können Produktvarianten durch die Kombination von Modulen konfiguriert werden.³¹⁷ Zur Entwicklung modularer Produktfamilien stellen KIPP ET AL. eine methodische Unterstützung vor, mit der unter anderem bei der Strukturierung der Produktfamilien die Komplexität vermindert werden kann.³¹⁸ JONAS & KRAUSE thematisieren ferner in ihrer Arbeit die Planung modularer Produktfamilien aus strategischen Gesichtspunkten.³¹⁹

Baureihe

Nach EHRLESPIEL basiert eine Baureihe aus Sicht der klassischen Konstruktionsmethodik auf einer Anpassungskonstruktion. Eine Baureihe besteht dabei aus funktionsgleichen technischen Gebilden (Maschinen), die der Größe nach systematisch gestuft sind, um mit möglichst wenigen, unterschiedlichen Produkttypen einen großen Anwendungsbereich abdecken zu können. Die technischen Gebilde innerhalb der Baureihe unterscheiden sich dabei hinsichtlich Leistungsdaten und Abmessungen. Der qualitative Funktionsumfang und die konstruktive Umsetzung sowie, nach Möglichkeit, Werkstoffe und Fertigung sind dabei unverändert.³²⁰ Ein klassisches Beispiel hierfür sind Motorbaureihen im Automobilbereich.

ALBERS ET AL. argumentieren über die Ähnlichkeit der technischen Systeme einer Baureihe hinsichtlich der Wirkstrukturen sowie der Baustrukturen und deren Relationen (Produktarchitekturen). Die technischen Systeme unterscheiden sich dabei durch die Ausprägung einzelner Attribute, die durch Skalieren variiert werden.³²¹

Baukasten

Unter einem Baukasten verstehen PAHL ET AL. Maschinen, Baugruppen und Einzelteile, die als Bausteine mit oft unterschiedlichen Lösungen durch Kombination ver-

³¹⁵ vgl. Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015 und Bursac 2016 S. 51

³¹⁶ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 449

³¹⁷ vgl. Bles 2011 S. 15

³¹⁸ vgl. Kipp, Bles & Krause 2010

³¹⁹ vgl. Jonas & Krause 2011

³²⁰ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 670 f.

³²¹ vgl. Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015 und Bursac 2016 S. 52

schiedene Gesamtfunktionen erfüllen. Im Gegensatz hierzu wird bei der Baureihenentwicklung dieselbe Funktion mit dem gleichen Lösungskonzept und möglichst gleichen Eigenschaften für einen breiteren Größenbereich erfüllt.³²² Nach BOROWSKI ist das Baukastensystem ein Ordnungsprinzip, das den Aufbau einer begrenzten oder unbegrenzten Zahl verschiedener Dinge aus einer Sammlung genormter Bausteine aufgrund eines Programms oder Baumusterplans in einem bestimmten Anwendungsbereich darstellt.³²³

In Anlehnung an das Verständnis von Baukastensystemen nach BOROWSKI definiert EHRENSPIEL einen Baukasten als ein Kombinationssystem von Bausteinen unterschiedlicher oder gleicher Funktion und Gestalt. EHRENSPIEL hebt hervor, dass Baukästen mit Baureihen sehr oft verknüpft werden. Eine Gemeinsamkeit liegt dann vor, wenn Bausteine gleicher Funktion unter Beibehaltung der Gesamtfunktion in ihrer Größe variiert werden. Bei Bausteinen unterschiedlicher Funktion erhält man hingegen auch auf Gesamtsystemebene unterschiedliche Funktionen was ein klares Differenzierungsmerkmal zu Baureihen darstellt, die eben kein Kombinationssystem darstellen, sondern ein fest definiertes System, das nur auf unterschiedliche Größenabstufungen fokussiert.³²⁴

KOLLER unterscheidet in diesem Kontext unterschiedliche Arten von Baukästen:³²⁵

Strukturgebundene Baukastensysteme: Die Bausteine sind an bestimmte Plätze der Produktstruktur gebunden und können nicht an beliebigen Stelle eingesetzt werden (z.B. alternative Pkw-Motoren, -Sitze oder -Räder).

Modulare Baukastensysteme: Die Bausteine können an verschiedenen oder sogar beliebigen Plätzen im System angeordnet werden (z.B. Hausbaubaukasten).

Abstrakte Baukastensysteme: Beinhalten abstrakte (gedachte, nicht konkrete) Bausteine, die Teilbereiche von Bauteilen, Baugruppen, Geräten, Maschinen oder Apparaten sein können.

Ein- oder mehrdimensionale Baukastensysteme: Baukastensysteme können so aufgebaut sein, dass mit ihnen in ein, zwei, drei oder mehreren Richtungen technische Gebilde aufgebaut werden können (z.B. Endmaße, Fließen, Gerüste, Möbel, etc.).

Vollständige oder unvollständige Baukastensysteme: Ein vollständiges Baukastensystem enthält ausschließlich standardisierte Bauteile, wohingegen ein unvollständiges Mischsystem sowohl standardisierte als auch fallspezifisch anzupassende

³²² vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2013 S. 838 f.

³²³ vgl. Borowski 1961 S. 18

³²⁴ vgl. Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 347

³²⁵ vgl. Koller 1994 S. 294 ff.

Elemente enthält. In der Praxis übliche Baukastensysteme sind häufig unvollständig und beinhalten Sonderbausteine.

PONN & LINDEMANN sprechen anstelle von der Vollständigkeit von Baukastensystemen von deren Reinheit und unterscheiden zusätzlich folgende Klassifizierungsmöglichkeiten von Baukastensystemen.³²⁶

Baukastennutzer: Ein Herstellerbaukasten wird beim Hersteller zusammengebaut und danach im Allgemeinen nicht mehr verändert (z.B. Pkw-Baukastensystem, Getriebebaukasten). Bei einem Anwenderbaukasten werden dahingegen die Bestandteile des Systems als Bausteine beim Hersteller produziert und anschließend vom Benutzer montiert beziehungsweise konfiguriert. Sie können wieder in ihre Bausteine zerlegt werden, um diese zur Bildung neuer Kombinationsformen zu verwenden (z.B. Elektrowerkzeugbaukasten, Küchenmaschinensystem).

Systemabgrenzung: Ein geschlossener Baukasten ist durch eine endliche Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten gekennzeichnet (z.B. Nockenwellenbaukasten). Ein offener Baukasten ist demgegenüber nicht in der Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten beschränkt (z.B. Baugerüstsystem).

Verständnis des Baukastens im Kontext der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit thematisiert das Ableiten von Nockenwellenvarianten aus einem bestehenden, **geschlossenen Baukasten**. Dieser wird ausschließlich in der unternehmensinternen Entwicklungsabteilung zur Erstellung von **Entwicklungsgenerationen** eingesetzt und wird kontinuierlich auf Aktualität geprüft und gegebenenfalls um neue Elemente mit neuen Lösungsprinzipien erweitert. Durch den zeitlichen Versatz der entwickelten Produkte müssen diese, um sie als Referenzprodukte für künftige Entwicklungsgenerationen verwenden zu können, in den bestehenden Baukasten integriert werden. Dabei können die dem aktuellen Baukasten neu hinzuzufügenden Referenzprodukte ihrerseits vorhandene Elemente (Module) bereits bestehender Referenzprodukte beinhalten. Die Aktualisierung des Beziehungsgeflechts muss bei der Baukastenentwicklung berücksichtigt werden und muss demnach, parallel zur Entwicklung von Produkten, als eine kontinuierliche Aktivität im Kontext des iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell³²⁷ erfolgen.³²⁸ Die Positionierung der Elemente im Gesamtsystem variiert dabei grundsätzlich fallspezifisch. Dennoch sind die Elemente an die grundlegende Produktstruktur gebunden. Für den speziellen Anwendungsfall in der vorliegenden Arbeit kann in diesem Zusammenhang auch von einem **vollständigen bzw. reinen Baukastensystem** gesprochen werden, da die

³²⁶ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 261 f.

³²⁷ vgl. iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE in Kapitel 2.1.2 (S. 33)

³²⁸ vgl. Albers, Bursac & Scherer 2014 S. 20 f. und Bursac 2016 S. 62 f.

abgeleiteten Nockenwellenprodukte keine Elemente enthalten, die nicht Teil des Baukastensystems sind. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt dabei auf der **bedingten Kombinatorik** der Baukastenelemente, die hierfür in geeigneter Weise beschrieben werden müssen, um diese **Subsysteme zu technischen Systemen konfigurieren** zu können. Zudem müssen diese Subsysteme mit dem produktspezifischen Baukasten-Regelwerk konform sein. Deshalb werden Baukästen in dieser Arbeit nach der Definition von ALBERS ET AL. verstanden.³²⁹

Definition 2-6: Baukasten

Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können.

Differential und Integralbauweise

Die Abbildung 2-28 zeigt eine schematische Darstellung der Differenzial- und Integralbauweise nach KOLLER.

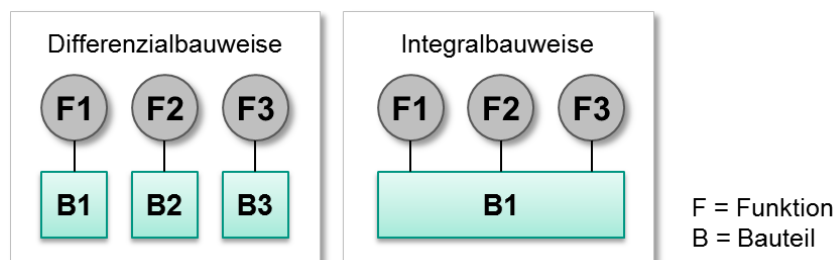


Abbildung 2-28: Differenzial- und Integralbauweise nach KOLLER³³⁰

Die Zusammenfassung mehrerer Bauteile mit gleichen oder unterschiedlichen Funktionen zu einem einzigen Bauteil mit der gleichen Anzahl an Funktionen versteht KOLLER als Integralbauweise und das daraus resultierende Bauteil entsprechend als integriertes Bauteil. Im Umkehrschluss dazu definiert er die Untergliederung eines Bauteils mit vielen gleichen oder unterschiedlichen Funktionen in mehrere einzelne Bauteile mit jeweils geringerer Anzahl an Funktionen als Differentialbauweise.³³¹

Nach EHRENSPIEL ist die Integralbauweise im Allgemeinen bei kleineren bis mittleren Bauteilen und hohen Stückzahlen zu bevorzugen, da Werkzeug-, Modell- und Rüstkosten bei höheren Stückzahlen zwar kalkulatorisch zu erfassen sind, jedoch umge-

³²⁹ vgl. Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015 und Bursac 2016 S. 53

³³⁰ vgl. Koller 1994 S. 266

³³¹ vgl. Koller 1994 S. 270

legt auf die Teile nicht mehr sehr ins Gewicht fallen. Dadurch sinken Bearbeitungs-, Verbindungs- und Montagekosten. Dagegen kann die Differenzialbauweise in der Einzel- und Kleinserienfertigung bei großen Bauteilen kostengünstig werden.³³²

2.2.4 Zwischenfazit

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der methodischen Unterstützung von Konstrukteuren bei der Variantenentwicklung auf Grundlage bestehender Referenzprodukte, indem fallspezifisch zielführende Varianten abgeleitet und bewertet sowie mittels einer geeigneten Entscheidungsunterstützung und der Expertise des Konstrukteurs ausgewählt werden können. Damit wird das Ziel verfolgt, die Anzahl an entwicklungsinternen, konstruktiv ausdetaillierten Varianten zu reduzieren (interne Variantenvielfalt), die in der Angebotsphase häufig erforderlich sind, um aufgrund emergenter Bewertungszielgrößen die erforderliche Entscheidungsgrundlage zu haben, um die zielführenden Lösungen auszuwählen. Hierbei spielt u.a. die zunehmende, strukturelle Komplexität der Produkte eine wesentliche Rolle. Daneben sind eine Reihe weiterer Ursachen der Variantenvielfalt in der Literatur beschrieben, die im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens im Rahmen der Analyse der Bedarfssituation³³³ untersucht werden. Die Ansätze zum Umgang mit der Variantenvielfalt haben im Wesentlichen zum Ziel, mit einer geringeren Menge an verfügbaren Elementen eine entsprechend größere Anzahl an erforderlichen Varianten abdecken zu können und damit die Variantenvielfalt zu reduzieren. Um für eine konkrete Kundenanfrage auf Grundlage bestehender Referenzprodukte Varianten ableiten zu können, bietet eine hohe interne Variantenvielfalt zunächst bessere Möglichkeiten, eine kunden- und anbietergerechte Lösung zu finden, weshalb der primäre Fokus nicht auf der Reduzierung der intern gültigen Anzahl an Varianten liegt. Vielmehr muss darüber hinaus eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, um die fallspezifisch zielführenden Lösungen aus der Gesamtheit der unternehmensinternen gültigen Kombinationsmöglichkeiten erkennen zu können. Damit können die Konstruktionsaufwände auf wenige, zielführende Lösungen fokussiert werden. Durch die Möglichkeit, gültige, aber für den konkreten Fall nicht geeignete Varianten frühzeitig aufzuzeigen, wird die intern verfügbare Variantenvielfalt nicht unmittelbar reduziert. Reduziert wird vielmehr die Anzahl der tatsächlich auskonstruierten und damit faktisch neuen Varianten, die in Form von neuen Zeichnungssätzen im Datenmanagementsystem abgelegt werden. Auch wenn diese Detaillösungen für den konkreten Fall nicht zielführend waren, erweitern sie dennoch die Menge an verfügbaren Referenzprodukten und stehen bei Variantenentwicklungen für neue Entwicklungsgenerationen zur Verfügung.

³³² vgl. Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014 S. 326

³³³ vgl. Kapitel 5

2.3 Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl

Anknüpfend an das vorhergehende Kapitel wird nachfolgend die Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl beleuchtet. Dafür werden zunächst Grundlagen aufgezeigt, um Entscheidungen treffen zu können. Zudem werden die unternehmensseitigen Randbedingungen erörtert, um eine Entscheidungsunterstützung im Unternehmen etablieren zu können. Darauf aufbauend wird die Rechnerunterstützung in der Konstruktion sowie Ansätze zur Entscheidungsunterstützung thematisiert.

2.3.1 Entscheidungsgrundlagen

Bei einem Wahlproblem von besonderer Bedeutung wird im allgemeinen Sprachgebrauch vor allem der Begriff der Entscheidung verwendet. Die Entscheidungstheorie hingegen, die sich mit der Formulierung und Lösung von Entscheidungsproblemen beschäftigt, fasst den Entscheidungsbegriff wesentlich weiter und versteht unter Entscheidung ganz allgemein die (mehr oder weniger bewusste) Auswahl einer von mehreren Handlungsalternativen.³³⁴ Daraus folgt, dass sich ein Entscheidungsproblem oder eine Entscheidungssituation durch das Vorhandensein von wenigstens zwei Alternativen (Handlungsalternativen, Entscheidungsmöglichkeiten, Aktionen, Strategien, etc.) kennzeichnet, zwischen denen der Entscheidungsträger (ein Individuum, ein Unternehmen, ein Staat, etc.) eine Entscheidung (eine Wahl, eine Auswahl) treffen kann oder muss.³³⁵ Entscheidungstheoretische Untersuchungen werden dabei mit der Absicht verfolgt, beschreibende (deskriptive) oder vorschreibende (präskriptive) Aussagen zu erhalten. Mit der Beschreibung, wie in der Realität Entscheidungen getroffen werden, beschäftigt sich die deskriptive Entscheidungstheorie, wohingegen sich die präskriptive (oder normative) Entscheidungstheorie nicht mit der Beschreibung und Erklärung tatsächlicher Entscheidungsprozesse befasst. Vielmehr zielt die präskriptive Entscheidungstheorie, die in der Literatur auch als Entscheidungslogik bezeichnet wird, darauf ab, aufzuzeigen, wie Entscheidungen rational getroffen werden, um Entscheidern für die unterschiedlichsten Entscheidungssituationen entsprechende Handlungsempfehlungen bereitstellen zu können.³³⁶ Als weiterführende Literatur zur Thematik des rationalen Entscheidens sei an dieser Stelle auf die Theorie der Wirtschaftlichen Entscheidung von GÄFGEN³³⁷ und die Einführung in die präskriptive Entscheidungstheorie von EISENFÜHR ET AL.³³⁸ verwiesen.

³³⁴ vgl. Laux, Gillenkirch & Schenk-Mathes 2014 S. 3

³³⁵ vgl. Dinkelbach & Kleine 1996 S. 1

³³⁶ vgl. Laux, Gillenkirch & Schenk-Mathes 2014 S. 3 f.

³³⁷ vgl. Gäfgen 1974

³³⁸ vgl. Eisenführ, Weber & Langer 2010

Um ein Entscheidungsproblem lösen und eine Alternative³³⁹ auswählen zu können, muss ein Entscheider die möglichen Alternativen (Varianten) im Hinblick auf ihre Vorziehwürdigkeit bewerten. Dazu müssen die Ergebnisse prognostiziert werden, die mit der Wahl der konkreten Variante zu erreichen sind. Darüber hinaus hängen die Ergebnisse von Umweltentwicklungen (Randbedingungen) ab, die einerseits nicht zu beeinflussen sind oder nicht beeinflusst werden wollen, beispielsweise da der Entscheider aufgrund von Vorüberlegungen davon überzeugt ist, dass eine Beeinflussung zu hohe Kosten verursachen würde.³⁴⁰

Für die Variantenauswahl aus einer Menge an gültigen Varianten werden demzufolge Zielgrößen erforderlich, deren Erreichung variantenspezifisch beurteilt werden muss. Neben der Zielerreichung wird bei Entscheidungssituationen auch häufig von der Erfüllung von Anforderungen gesprochen. Sowohl für Ziele als auch für Anforderungen werden im Forschungsumfeld der Entwicklungsmethodik Abhängigkeiten von Randbedingen sowie Beziehungen zu Eigenschaften und Merkmale beschrieben.³⁴¹ Das Verständnis der Begrifflichkeiten ist dabei nicht eindeutig. Deshalb werden nachfolgend die für diese Arbeit relevanten Begriffe zunächst aus unterschiedlichen Blickwinkeln kurz beleuchtet und das für diese Arbeit gültige Verständnis formuliert.

Ziele und Anforderungen

Die Lösung technischer Aufgaben wird durch zu erreichende Ziele und durch einschränkende Bedingungen bestimmt.³⁴² Darüber ist man sich in der Konstruktionslehre und der Entwicklungsmethodik weitestgehend einig. Anders sieht es aber bei der Definition des Zielbegriffs und der Abgrenzung zum Anforderungsbegriff aus.³⁴³ Nach STECHERT bilden Ziele die Ausgangspunkte für die Erfassung von Anforderungen. Dabei sind Anforderungen deutlich konkreter als Ziele und beschränken sich nicht nur auf Solleigenschaften des Produktes. Darüber hinaus sind mehrere Anforderungen notwendig, um ein Ziel zu erfüllen. Eine klare Trennung zwischen Zielen und Anforderungen wird zwar häufig gefordert, jedoch vielfach nicht vorgenommen.³⁴⁴ Auch ALBERS ET AL. unterscheiden zwischen Zielen und Anforderungen. Ziele präzisieren ihrem Verständnis nach einen Bedarf und beschreiben, was durch das zu

³³⁹ vgl. Problemlösungsprozesses SPALTEN auf S. 36: Mit SPALTEN werden alternative Lösungsmöglichkeiten gesucht. Aus der Menge an gültigen Alternativen werden dann die zielführenden Lösungen ausgewählt. Die Alternativenmenge umfasst im Kontext dieser Arbeit fallspezifisch gültige Varianten von Nockenwellensystemen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die Verwendung des Variantenbegriffs bevorzugt.

³⁴⁰ vgl. Laux, Gillenkirch & Schenk-Mathes 2014 S. 6

³⁴¹ vgl. DIN 2330 1993; Ehrlenspiel 2009; Jörg 2005; Kläger 1993; Lindemann & Reichwald 2006; Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007; Ponn & Lindemann 2011; VDI 2221 1993; Weber 2012

³⁴² vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007 S. 57

³⁴³ vgl. Lohmeyer 2013 S. 59 ff.

³⁴⁴ vgl. Stechert 2010 S. 11

entwickelnde Produkt erreicht werden soll. Demgegenüber definieren Anforderungen nicht was das Produkt sein soll, sondern was es können oder nicht können soll. ALBERS ET AL. betonen, dass sich Anforderungen aus Zielen und Randbedingungen ableiten.³⁴⁵ LOHMEYER versteht dabei unter einer Randbedingung eine aus dem Umfeld der Entwicklung resultierende Einschränkung, die von anderen verantwortet wird und daher zwar ermittelt, aber nicht eigenständig definiert oder geändert werden kann.³⁴⁶ EBEL fasst diesen Sachverhalt entsprechend Abbildung 2-29 zusammen.

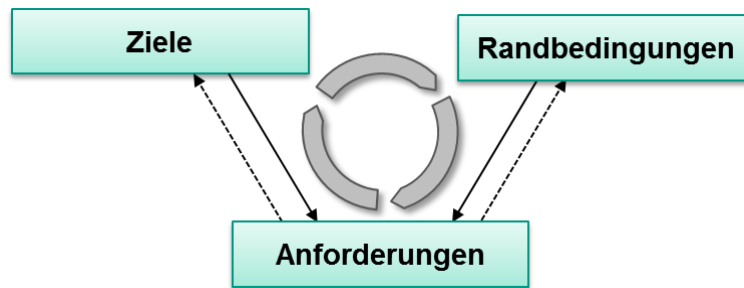


Abbildung 2-29: Ziele, Randbedingungen und Anforderungen³⁴⁷

Aus Sicht der Entscheidungslehre nach DINKELBACH & KLEINE ist ein Ziel die Beschreibung eines zukünftigen, und im Allgemeinen gegenüber dem gegenwärtigen Zustand veränderten, erstrebenswerten Zustand.³⁴⁸ Daneben scheint der Anforderungsbegriff in der Entscheidungstheorie keine wesentliche Bedeutung zu haben.³⁴⁹ Bei den Zielen unterscheiden DINKELBACH & KLEINE hingegen vier Zielcharakteren:³⁵⁰

Fixierungsziele erfordern eine explizite Beschreibung des erstrebenswerten Zustandes und sind entweder exakt oder überhaupt nicht zu erreichen.

Satisfizierungsziele sind einerseits durch eine explizite Beschreibung eines festgelegten Anspruchsniveaus gekennzeichnet, das mindestens zu erreicht ist. Das Überschreiten des Anspruchsniveaus ist dabei zulässig.

Approximierungsziele haben Extremierungscharakter und beschreiben einen zu erreichenden Zustand den es seitenunabhängig möglichst nahe zu erreichen gilt.

Reine Extremierungszielen beschreiben den zu erreichenden Zielzustand ohne Nennung expliziter Werte.

³⁴⁵ vgl. Albers, Klingler & Ebel 2013

³⁴⁶ vgl. Lohmeyer 2013 S. 61

³⁴⁷ vgl. Ebel 2015 S. 67

³⁴⁸ vgl. Zschocke 1995 S. 289 ff. nach Dinkelbach & Kleine 1996 S. 15

³⁴⁹ vgl. Dinkelbach & Kleine 1996; Eisenführ, Weber & Langer 2010; Gäfgen 1974; Laux, Gillenkirch & Schenk-Mathes 2014

³⁵⁰ vgl. Dinkelbach & Kleine 1996 S. 15 ff.

Aus Sicht der Systemtechnik beschreibt ROPHOL ein Ziel als ein als möglich vorgestellter Sachverhalt (z.B. Zustände, Gegenstände, Handlungen, Prozesse, Beziehungen, etc.), dessen Verwirklichung erstrebt wird.³⁵¹ PONN & LINDEMANN beziehen ihr Verständnis von Zielen konkret auf Systeme und definieren ein Ziel als ein durch absichtsvolle Handlungen angestrebter Zustand eines Systems.³⁵²

Die VDI-Richtlinie 2221 versteht unter Anforderungen die qualitative und bzw. oder quantitative Festlegung von Eigenschaften und Bedingungen für ein Produkt.³⁵³ Dabei lassen sich grundsätzlich, ähnlich der Zielcharakterisierung von DINKELBACH & KLEINE, folgende Anforderungsarten unterscheiden:

Mindestforderungen sind nach BEITZ & PAHL solche, die unter allen Umständen erfüllt werden müssen. Ohne deren Erfüllung ist die vorgesehene Lösung keinesfalls akzeptabel (z.B. bestimmte zu erfüllende Leistungsdaten). Nach EHRENSPIEL sind Mindestforderungen (Muss-)Forderungen, die ab einem festgelegten Mindestwert einen Toleranzbereich nach oben aufweisen. Demzufolge können Mindestforderungen mehr oder weniger gut erfüllt werden (z.B. soll der Wirkungsgrad mindestens 95% betragen).³⁵⁴ ALBERS greift das Verständnis nach BEITZ & PAHL und EHRENSPIEL auf und konkretisiert für seine KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung, dass Mindestforderungen den Grenzwert eines bestimmten Kriteriums beschreiben, der mindestens erreicht werden muss und bei dessen Über- bzw. Unterschreiten sich die Lösungsqualität unter Abwägung des Nutzen/Kosten-Verhältnisses bis zum Erreichen eines individuellen Optimums weiter verbessert. Damit stellt die Mindestforderung das Kernelement der Lösungsauswahl dar. Sie ist von zwingendem Charakter und gleichzeitig durch lösungsvorschlagsabhängige Varianz gekennzeichnet. Darüber hinaus hat ALBERS jedoch bereits Anfang der 90er-Jahre auf die Gefahr von Grenzforderungen hingewiesen und die Notwendigkeit von **Bereichsforderungen** postuliert. Demnach muss in der Zielsystemdefinition zwischen Kunden und Anbieter immer ein eindeutiger Bereich festgelegt werden, in dem sich die Kosten-Nutzen-Relation innerhalb der Kundenakzeptanz bewegt. D.h., dass aus einer Mindestanforderung, z.B. einer Mindesttraglast von 100kg für ein Regal, nicht hervor geht, ob der Kunde auch die Mehrkosten für die doppelte Traglast akzeptiert.

Maximalforderungen sind nach EHRENSPIEL (Muss-)Forderungen mit einem Toleranzbereich unterhalb eines festgelegten Maximalwertes, wohingegen **Festforderungen** (Muss-)Forderungen ohne Toleranzbereich sind. **Intervallforderungen** sind

³⁵¹ vgl. Ropohl 2009 S. 151

³⁵² vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 460

³⁵³ vgl. VDI 2221 1993 S. 39: Diese VDI-Richtlinie wird derzeit unter Beteiligung des IPEK Instituts für Produktentwicklung grundlegend überarbeitet.

³⁵⁴ vgl. Ehrlenspiel 2003

darüber hinaus (Muss-)Forderungen mit einer Intervallangabe. Maximal-, Mindest- und Intervallforderungen fasst EHRENSPIEL in Anlehnung an ALBERS zu **Bereichsforderungen** zusammen. **Wunschforderungen** sollen hierbei nach Möglichkeit erfüllt werden.³⁵⁵

Daneben gibt es in der Literatur eine Reihe an weiteren Klassifizierungsvorschlägen für Anforderungen. Hierzu sein an dieser Stelle auf die Arbeit von KRUSCHE verwiesen, der in diesem Zusammenhang auf Basis einer umfassenden Analyse von wissenschaftlichen Ansätzen zur Einteilung von Anforderungen, übergeordnete Anforderungsklassen identifiziert hat.³⁵⁶ KLÄGER unterscheidet in seiner Arbeit ferner zwischen Initial-, Detail-, Zwischen- und Elementaranforderungen, die auch Inhalt der Arbeit von JÖRG sind.³⁵⁷ JÖRG beschreibt in diesem Zusammenhang eine Anforderung als eine Eigenschaft eines zu entwickelnden Produktes, wobei sie sich auf verschiedene Merkmale und Lösungsphasen bezieht und sich entlang des Prozesses verändern kann. Zwischen einzelnen Anforderungen innerhalb der Anforderungsmenge eines Produktes ergeben sich dabei entsprechende Abhängigkeiten.³⁵⁸ Eine Anforderung bezieht sich darüber hinaus immer auf mindestens ein bestimmtes Merkmal des Produktes (Produktmerkmal), der technischen Konstruktionslösung (Lösungsmerkmal hinsichtlich Prinzip, Gestalt und Ausführung) oder der Lösungsmethode (Prozessmerkmal) und tritt deshalb immer paarweise mit einem zugehörigen Merkmal auf.³⁵⁹ PONN & LINDEMANN ergänzen, dass sich Anforderungen formal durch Merkmale und Ausprägungen ausdrücken lassen und hiermit eine geforderte Eigenschaft in Bezug auf das zu entwickelnde Produkt beschreiben.³⁶⁰ Die Ausprägung der Anforderung legt in diesem Zusammenhang den Lösungsbereich fest.³⁶¹ Dabei ist eine Anforderung immer einem bestimmten Typ zuzuordnen, um ihre Prüfbarkeit und ihre Dynamik festzulegen. JÖRG schlägt dabei eine weitere Verfeinerung der bisher gängigen Unterteilung in qualitative und quantitative Anforderungen in sechs Arten von Produkthanforderungen vor:³⁶²

Eindeutig quantitative Anforderungen sind eindeutig definiert, klar verständlich und können durch die binäre Aussage „wahr“ oder „falsch“ eindeutig auf ihre Erfüllung geprüft werden. Hierbei wird unterschieden in eindeutig quantitativ durch Angabe eines (1) Zahlenwerts oder Wertebereichs oder (2) einen sprachlichen Ausdruck.

³⁵⁵ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 379 f.

³⁵⁶ vgl. Krusche 2000 S. 66 ff. nach Lohmeyer 2013 S. 51

³⁵⁷ vgl. Kläger 1993 und Jörg 2005 S.87 f.

³⁵⁸ vgl. Jörg 2005 S. 86

³⁵⁹ vgl. Jörg 2005 S. 89 f.

³⁶⁰ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 428

³⁶¹ vgl. Jörg 2005 S. 89

³⁶² vgl. Jörg 2005 S. 91 ff.

Gemischte quantitative und qualitative Anforderungen sind für den Fachmann relativ eindeutig interpretierbar. (3) Referenzierend quantitative Anforderungen werden durch referenzierte Objekte und Terminologien definiert und beziehen sich auf allgemein zugängliches Fachwissen oder Dokumente (Gesetze, Normen, Richtlinien, Fachbücher, etc.). (4) Referenzierend qualitative Anforderungen werden durch Vergleiche mit firmeninternem oder speziellem Wissen definiert. Die Anforderung verweist auf andere Produkte, firmeninternes oder sehr spezielles Fachwissen.

Eindeutig qualitative Anforderungen können durch einen bestimmten Personenkreis (Kontrollgruppe) subjektiv geprüft werden. Sie müssen dabei immer im jeweiligen Anwenderkontext gesehen und bewertet werden. Die Interpretation (5) subjektiv qualitativer Anforderungen ist personen- und kontextabhängig. Eine Zerlegung bis zur quantitativen Anforderung ist aktuell nicht möglich, jedoch kann die Überprüfung durch die Befragung von Kontrollgruppen erfolgen. Hingegen ist bei (6) nicht konkretisierten Anforderungen eine Zerlegung zwar möglich. Diese ist jedoch zu aufwändig und bringt keinen Zusatznutzen.

FELDHUSEN ET AL. fasst diese sechs Anforderungstypen entsprechend nachfolgender Abbildung 2-30 zusammen.

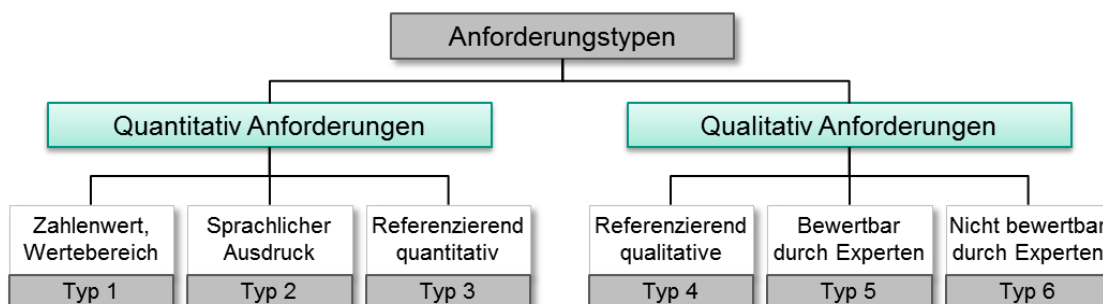


Abbildung 2-30: Anforderungstypen in Anlehnung an FELDHUSEN ET AL.³⁶³

Eigenschaften und Merkmale

Aus der Menge an konstruktionswissenschaftlichen Arbeiten ergibt sich kein einheitliches Verständnis des Merkmals- und Eigenschaftsbegriffs. Einigkeit herrscht jedoch darüber, dass mit beiden Begriffen meist sämtliche Charakteristika eines technischen Systems beschrieben werden. Nach DIN 2330 geben in diesem Kontext Merkmale diejenigen Eigenschaften von Gegenständen wieder, welche zur Begriffsbildung und Begriffsabgrenzung dienen. Dabei wird einerseits in die Merkmalsarten der Beschaffenheits- und Relationsmerkmale unterscheiden. Beschaffenheitsmerkmale geben Eigenschaften von Gegenständen an, z.B. die Form, Abmessung, Werkstoff, Farbe,

³⁶³ vgl. Feldhusen, Nagarajah & Schubert 2010

Härte, Lage (schwebend, hängend, stehend, etc.) und die Zeit (Herstellungsdatum, Verfallsdatum, etc.). Relationsmerkmale hingegen konstatieren eine Beziehung zwischen zwei Begriffen, z.B. Herkunftsmerkmale (Erfinder, Hersteller, Herkunftsort, etc.), Gebrauchsmerkmale (leicht handhabbar, transportfähig, etc.), Vergleichsmerkmale (größer, kleiner, etc.), Bewertungsmerkmale (billig, ausreichend, etc.).³⁶⁴ Hierbei wird keine klare Trennung zwischen Merkmalen und Eigenschaften beschrieben.

EHRENSPIEL bezieht sich bei der Einteilung von Produktmerkmalen auf die DIN 2330 (Beschaffenheits-, Relations- sowie Funktionsmerkmale), die einen gewollten Zweck eines Produktes betreffen, z.B. das zu übertragende Drehmoment. Eine Eigenschaft ist für EHRENSPIEL hingegen alles das, was u.a. durch Beobachtungen, Messungen oder allgemein akzeptierten Aussagen von einem Gegenstand festgestellt werden kann. Der Zusammenhang zum Merkmalsbegriff wird hierbei derart hergestellt, dass wichtige, kennzeichnende Eigenschaften zur besseren Hervorhebung mit dem Begriff Merkmal bezeichnet werden können. Eigenschaften (Merkmale) haben eine Bedeutung (Semantik, Qualität) und gegebenenfalls eine zahlenmäßige Ausprägung (Quantität). Das Merkmal „Farbe“ hat beispielsweise die Ausprägung „zinnoberrot“, wohingegen das Merkmal „Drehmoment“ die Ausprägung „200Nm“ haben kann.³⁶⁵

Nach ZINGEL ist ein Merkmal ein Attribut eines Strukturelements eines technischen Systems (z.B. Datenformat, Interfaceart, Form, Lage, Stoff, etc.) und wird durch den Entwickler festgelegt.³⁶⁶ Ein Attribut ist hierbei ein Sammelbegriff für Kennzeichen, Merkmale und Eigenschaften von Individuen bzw. Systemen, Relationen zwischen Individuen und Systemen, Eigenschaften von Eigenschaften, Eigenschaften von Relationen und dergleichen mehr.³⁶⁷ Eine Struktur ist dabei nach ROPHOHL die Menge der Relationen eines Systems.³⁶⁸ Im Gegensatz dazu ist eine Eigenschaft ein nicht unmittelbar vom Entwickler beeinflussbares Attribut eines technischen Systems.³⁶⁹

Nach PONN & LINDEMANN setzt sich eine Eigenschaft formal aus einem Merkmal und seiner Ausprägung zusammen. Gestaltbezogene Merkmale können dabei unter anderem Form, Lage, Größe oder die Anzahl der Systemelemente sein. In diesem Kontext ist die Ausprägung Teil einer merkmalspezifischen Wertemenge, die binären Charakter haben kann, diskrete Elemente (Form kann z.B. Würfel, Kugel oder Zylinder sein) oder einen kontinuierlichen Wertebereich (zahlenmäßig quantifizierbar) umfassen kann. Darüber hinaus kann in direkte und indirekte Eigenschaften unterschieden werden. Direkte Eigenschaften werden durch die Ausprägungen direkter Merk-

³⁶⁴ vgl. DIN 2330 1993

³⁶⁵ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 28

³⁶⁶ vgl. Zingel 2013

³⁶⁷ vgl. Stachowiak 1973; Ropohl 1975

³⁶⁸ vgl. Ropohl 1975

³⁶⁹ vgl. Zingel 2013

male beschrieben und können durch den Entwickler unmittelbar festgelegt werden (z.B. Geometrie, Werkstoff, etc.). Indirekte Eigenschaften werden demnach durch die Ausprägungen indirekter Merkmale beschrieben und könne vom Entwickler nur mittelbar beeinflusst werden (z.B. Gewicht, Kosten, etc.).³⁷⁰

Diese Unterscheidung von Eigenschaften gemäß ihrer Beeinflussbarkeit durch den Entwickler wird auch von HUBKA beschrieben. Für ihn sind externe Eigenschaften solche, die beim Konstruieren nicht unmittelbar festgelegt werden können. Interne Eigenschaften beziehen sich hingegen u.a. auf Geometrie, Toleranzen und Produktionsparameter, die während des Konstruktionsprozesses direkt festgelegt werden können.³⁷¹ Dabei ist eine Eigenschaft generell jedes Merkmal, das einem beliebigen Objekt eigen ist und dieses Objekt charakterisiert. Der Merkmalsbegriff wird hierbei von HUBKA in diesem Zusammenhang nicht beschrieben.³⁷²

Die Produkt- und Prozessmodellierung auf der Basis von Produktmerkmalen und Produkteigenschaften nach WEBER folgt ebenfalls dem Verständnis der Einflussnahme durch den Entwickler. Sein CPM/PDD-Ansatz³⁷³ basiert dabei auf der Unterscheidung zwischen Eigenschaften und Merkmalen. Die Merkmale erfassen dabei die Gestalt eines Produktes, die durch die (Teile-)Struktur, die räumliche Anordnung der Komponenten sowie die Formen, Abmessungen, Werkstoffe und Oberflächenparameter aller Bauteile definiert wird. Dabei hebt WEBER hervor, dass (nur) diese Parameter vom Produktentwickler direkt beeinflusst werden können. Auf der anderen Seite beschreiben Eigenschaften das Verhalten des Produktes, z.B. Funktion, Sicherheit, Zuverlässigkeit, ästhetische Eigenschaften, aber auch insbesondere Herstellkosten, Fertigungs-/Montage-/Prüfgerechtheit und Umweltgerechtheit. Die Eigenschaften können vom Produktentwickler nicht direkt festgelegt werden, sondern nur über den „Umweg“, indem bestimmte Merkmale geändert werden, die sich ihrerseits entsprechend auf bestimmte Eigenschaften auswirken.³⁷⁴ Nach WEBER entsprechen die Merkmale weitestgehend der Gruppe von Parametern, die HUBKA & EDER³⁷⁵ als innere Eigenschaften bezeichnen und nach SUH³⁷⁶ Konstruktionsparameter darstellen. Im Kern sind Merkmale nach WEBER die Summe der Parameter, welche die „Gestalt“ eines technischen Produktes oder Systems beschreiben.

³⁷⁰ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 137 nach Lindemann 2009

³⁷¹ vgl. Hubka 2002 S. 165; nach Wintergerst 2015 S. 49

³⁷² vgl. Hubka 1984 S. 14

³⁷³ Characteristics-Properties Modelling (CPM) und Property-Driven Development (PDD)

³⁷⁴ vgl. Weber 2012 S. 29 ff.

³⁷⁵ vgl. Hubka & Eder 1992 nach Weber 2012 S. 32

³⁷⁶ vgl. Suh 2001 nach Weber S. 32

Auch KOLLER verwendet den Parameterbegriff und beschreibt im Rahmen seiner Konstruktionslehre Parameter und Eigenschaften technischer Produkte.³⁷⁷ Dabei bedeutet Konstruieren für KOLLER die ein Produkt bestimmenden Parameterwerte so festzulegen, dass dieses Eigenschaften enthält, welche den an das Produkt gestellten Bedingungen (Forderungen) entsprechen. Daraus resultiert, dass Konstruieren das Umsetzen der an ein Produkt gestellten Forderungen in entsprechende Eigenschaften bedeutet. Dabei sind die Zusammenfassungen von möglichen Produkteigenschaften und an Produkte zu stellende Forderungen für KOLLER etwa identisch.³⁷⁸

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode sieht den Datenaustausch mit einem CAD-System vor, um emergente Produkteigenschaften von Systembaugruppen zu erhalten, indem vorhandene CAD-Referenzmodelle an neue Randbedingungen geometrisch angepasst und zusammengebaut werden. Im Zusammenhang mit dem Datenaustausch zu CAD- und Berechnungssystemen wird anstelle des Merkmals- oder Eigenschaftsbegriffs vielfach auch der Parameterbegriff verwendet. Daran anknüpfend wird auch, wie im folgenden Unterkapitel beschrieben, von parametrischen CAD-Systemen gesprochen und die Parameter im Sinne von Konstruktionsparametern verstanden, die zur geometrischen Beschreibung der Modelle erforderlich sind. JÖRG führt in seiner Arbeit im Zusammenhang mit der CAD-Kopplung den Parameterbegriff ein. Hierbei kann der Datenaustausch nur für quantitative Anforderungen erfolgen, da die verwendeten CAD-Modelle eindeutige Werte benötigen. Dies gilt insbesondere für die geometrischen Parameter, die direkt im CAD-System abgebildet werden können.³⁷⁹ Die Zusammenhänge von Parametern, die quantitative Soll- oder Ist-Eigenschaften repräsentieren, werden durch Constraints (engl. Einschränkung, Zwangsbedingung) beschrieben.³⁸⁰ Aus Sicht des Technikbereichs beschreibt LUTZ Constraints als mathematische Gleichungen und Ungleichungen die dazu genutzt werden können, um einen möglichen Lösungsraum einzuschränken oder auch zwingend zu erfüllende Randbedingungen abzubilden. Werden demnach mehrere Constraints (Gleichungen) miteinander verknüpft entstehen Constraint-Netze.³⁸¹ BRINKOP erläutert aus Sicht der Softwaretechnik, dass Constraints dazu eingesetzt werden, um Relationen-Systeme unter Ausnutzung lokaler Informationen zu lösen. Mittels eines Constraints wird eine Relation über eine Menge an Variablen (Parametern) beschrieben. Aus einer Menge an Constraints, die über gemeinsame Parameter (Variablen) verfügen, resultiert ein Constraint-Netz. Das Grundprinzip dieser Netzwerke besteht darin, dass Variablen Werte zugewiesen werden, die lokal einer einzelnen

³⁷⁷ vgl. Koller 1994 S. 64 ff.

³⁷⁸ vgl. Koller 1994 S. 67

³⁷⁹ vgl. Jörg 2005 S. 113 ff.

³⁸⁰ vgl. Jörg 2005 S. 100

³⁸¹ vgl. Lutz 2012 S. 45

Relation genügen, und die Auswirkungen dieser Wertzuweisung über andere Relationen durch das Constraint-Netz propagiert werden.³⁸² Constraints finden insbesondere im CAD-Umfeld eine breite Anwendung, indem diese Geometrieverknüpfungen beim Skizzieren von Designfeatures³⁸³ als auch bei der Zusammenstellung von Bauteilen und Baugruppe eingesetzt werden.³⁸⁴

Kriterien und Kennzahlen

Zur Überprüfung des Erfüllungsgrades von Zielen werden **Kriterien**³⁸⁵ eingesetzt. Im Falle einer Menge an gültigen Varianten können diese durch die kriterienbasierte Ermittlung variantenspezifischen Erfüllungsgrade miteinander verglichen werden, um eine zielführende Auswahl treffen zu können. GÄFGEN beschreibt in seiner Theorie der Wirtschaftlichen Entscheidung allgemein Kriterien als Wertindizes. Diese sollen einerseits objektiv messbar sein, da sie der objektiven Beschreibung der Wahlsituation dienen. Andererseits sollen sie aber möglichst endgültige Werte verkörpern, um als Bewertungsbasis zu dienen.³⁸⁶ Im Rahmen der **Objektivierung** wird dabei nach ALBERS ET AL. einerseits überprüft, inwieweit Elemente des Zielsystems die Erwartungen der Stakeholder objektiv wiedergeben. Andererseits werden Potentiale zur Erhöhung der Objektivität des Zielsystems identifiziert. Je objektiver die Ziele festgeschrieben sind, desto klarer ist die Ausgangslage für die Transformation in Objekte und desto besser können entstandene Objekte in Bezug auf das Zielsystem verifiziert werden. Wichtiger Bestandteil der Objektivierung ist damit die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen quantitativen Größen (Analysekriterien) und Empfindungen (Bewertungskriterien) aus Stakeholder-Sicht.³⁸⁷

Die **Bewertung** selbst ist nach ALBERS ET AL. eine Aktivität zur Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht.³⁸⁸ Dabei kann die Bewertung einerseits objektiv anhand von Zahlenwerten (z.B. Beschleunigung, Kraftstoffverbrauch) oder subjektiv auf Basis persönlicher Empfindungen erfolgen (z.B. Fahrdynamik, Effizienz).³⁸⁹ LINDEMANN beschreibt ein Bewertungskriterium als ein Merkmal eines Systems, das hinsichtlich seiner Ausprägungen bei unterschiedlichen Lösungs-ideen (bzw. Lösungsalternativen) bei einer Vorauswahl (bzw. Bewertung) untersucht

³⁸² vgl. Brinkop 1999 S. 45

³⁸³ In dieser Arbeit wird ein Feature als Aggregation von Elementen verstanden. Vgl. Vajna, Bley, Hehenberger, Weber & Zeman 2009 S. 499; Abulawi 2012 S. 93

³⁸⁴ vgl. Lutz 2012 S. 46

³⁸⁵ Bewertungskriterien und Entscheidungskriterien sind synonym zu verstehen und werden im Rahmen dieser Arbeit oftmals kurz als „Kriterien“ bezeichnet.

³⁸⁶ vgl. Gäfgen 1974 S. 111

³⁸⁷ vgl. Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger 2015

³⁸⁸ vgl. Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger 2015

³⁸⁹ vgl. Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

wird.³⁹⁰ PONN & LINDEMANN präzisieren zwei Jahre später, dass ein Bewertungskriterium ein Merkmal darstellt, das zum Vergleich und zur Beurteilung von Lösungsalternativen herangezogen wird. Die Auswahl von Bewertungskriterien ist dabei in Abhängigkeit vom Konkretisierungsgrad der zu vergleichenden Lösungen zu treffen.³⁹¹

Zur Quantifizierung der Kriterien werden **Kennzahlen**³⁹² definiert. Kennzahlen stellen charakteristische Zahlenwerte und insbesondere charakteristische Verhältniszahlen dar.³⁹³ Charakteristische Zahlenwerte sind absolute Werte, die unabhängig von anderen Zielgrößen sind. Demgegenüber setzen Verhältniszahlen zwei absolute Werte in Beziehung zueinander, diese zur Nachvollziehbarkeit zu dokumentieren sind.

Verständnis der Entscheidungsgrundlagen im Kontext der vorliegenden Arbeit

In dieser Arbeit wird, in Anlehnung an die KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung nach ALBERS, zwischen Zielen und Anforderungen unterschieden, wobei sich Anforderungen aus Zielen und Randbedingungen ableiten lassen. Dabei gelten die Definitionen nach LOHMEYER:³⁹⁴

Definition 2-7: Ziel

Ein Ziel ist die bewusste gedankliche Vorwegnahme eines zukünftigen Soll-Zustands, der gemeinsam vereinbart und durch aktives Handeln angestrebt oder vermieden wird. Ziele begründen die Funktion und die Gestalt von Objekten.

Definition 2-8: Anforderung

Eine Anforderung ist eine durch einen Wert oder einen Wertebereich festgelegte Beschreibung eines einzelnen Produktmerkmals. Eine Anforderung kann ein Ziel nicht ersetzen, sondern lediglich konkretisierend beschreiben.

Definition 2-9: Randbedingung

Eine Randbedingung ist eine aus dem Umfeld der Entwicklung resultierende Einschränkung, die von anderen verantwortet wird und daher zwar ermittelt, aber nicht eigenständig definiert oder geändert werden kann.

Darüber hinaus beschreiben ALBERS ET AL. unterschiedliche Beurteilungsdimensionen von Zielen.³⁹⁵ Diese sollen nach EBEL insbesondere eine implizite Beurteilung

³⁹⁰ vgl. Lindemann 2009 S. 330

³⁹¹ vgl. Ponn & Lindemann 2011 S. 431

³⁹² Die Begriffe Kennzahl und Kennwert sind in dieser Arbeit synonym zu verstehen.

³⁹³ Duden-Online, <http://www.duden.de/rechtschreibung/Kennzahl>, 15.07.2016, 15:10 Uhr

³⁹⁴ vgl. Lohmeyer 2013 S. 61

³⁹⁵ vgl. Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

von Zielen unterstützen. In diesem Zusammenhang definiert er in seiner Arbeit den Reifegrad, die Härte, die Auswirkung und die Beeinflussbarkeit von Zielen.³⁹⁶ Relevanz für diese Arbeit haben der Reifegrad und die Auswirkungen von Zielen die EBEL in seiner Arbeit wie folgt definiert:

Definition 2-10: Reifegrad von Zielen

Der Reifegrad von Zielen beschreibt die Vollständigkeit, mit der die Wissens- und Definitionslücken eines Ziels geschlossen sind.

Definition 2-11: Auswirkungen von Zielen

Die Auswirkung von Zielen beschreibt die Konsequenzen einer Zieldefinition oder -änderung hinsichtlich der erforderlichen Umsetzungsaufwände und der resultierenden Kundenzufriedenheit.

Der Reifegrad gemäß obiger Definition spielt für diese Arbeit eine wichtige Rolle, denn vielfach sind in der Angebotsphase nicht alle Anforderungen und Randbedingungen für ein konkretes Ziele hinreichend definiert, was sich in Unsicherheiten und daraus resultierenden Mehraufwänden im Rahmen der Variantenentwicklung äußern kann.³⁹⁷ Die Auswirkungen von Zielen sind insbesondere für die Entscheidungsgrundlage von Bedeutung, und zwar hinsichtlich der Beurteilung der variantenspezifischen Umsetzungsaufwände, um beispielweise eine Variante, die sich mit dem Kundenzielsystem zu 70% deckt, auf eine 100%-Lösung anzuheben.

Die die Ziele konkretisierenden Anforderungen können sich auf Eigenschaften und Merkmale beziehen. Dabei liegt dieser Arbeit das Verständnis zu Grunde, dass Eigenschaften (Bauteilmasse, Kosten, Funktionen, Bauraum, Steifigkeiten, etc.) nicht aktiv durch den Konstrukteur variiert werden können, sondern auf Systemebene abgeleiteter Varianten emergieren. Merkmale hingegen (Längen, Breiten, Durchmesser, etc.) kennzeichnen sich dadurch, dass sie aktiv vom Konstrukteur beeinflusst werden können.³⁹⁸ In der vorliegenden Arbeit handelt es sich bei den Merkmalen um Konstruktionsparameter zur Bestimmung der Gestalt der Komponenten und deren Positionen innerhalb der abgeleiteten Systembaugruppen. Aus diesem Grund werden die Begriffe **Parameter und Merkmal** synonym verstanden. Wegen der Affinität des Parameterbegriffs zu der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten parametrischen CAD-Modellierung, wird der Parameterbegriff bevorzugt eingesetzt.

³⁹⁶ vgl. Ebel 2015 S. 100 ff.

³⁹⁷ vgl. schematische Variantenauswahl entsprechend Abbildung 1-1 (S. 3) und Abbildung 2-22 (S. 60)

³⁹⁸ vgl. Abbildung 6-20 auf S. 215

2.3.2 Rechnerunterstützung in der Konstruktion

Der Rechnereinsatz ist aus der heutigen Konstruktionstätigkeit nicht mehr wegzu-denken. Zentral ist hierbei die Arbeit mit CAD-Systemen zur Erstellung von Modellen und davon abgeleiteten Zeichnungen. Für die vorliegende Arbeit spielt dabei der Zugriff auf bestehende CAD-Modelle und deren Wiederverwendbarkeit für neue, abgeleitete Varianten eine entscheidende Rolle. Modell- und Zeichnungsstände und deren korrespondierende Dateninformationssätze sind in diesem Zusammenhang in unternehmensspezifischen Produktdatenmanagementsystemen (PDM-Systeme) gespeichert. Für die Integration neuer Berechnungs- oder Bewertungstools in die Systemlandschaft eines Unternehmens muss demzufolge das PDM-System, das die Daten- und damit die Wissensbasis darstellt aus der die relevanten Informationen zur Weiterverarbeitung bezogen werden, als unternehmensspezifische Randbedingung berücksichtigt werden. Der effiziente Einsatz bestehenden Wissens ist dabei entscheidend für den Erfolg eines Unternehmens. Durch die hohe Technologiedynamik wird fortwährend neues Wissen³⁹⁹ generiert. Folglich veraltet bestehendes Fachwissen aber auch zunehmend schneller. Um dieser Entwicklung zu begegnen haben sich, neben der generellen Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess, Methoden zur rechnerbasierten Wissensspeicherung und Wissensverarbeitung etabliert, die u.a. in PDM-Systemen verankert werden können. Hierbei sind insbesondere die Gebiete der Diagnose, Planung und Beratung, Angebotserstellung und die in dieser Arbeit relevanten Felder der Produktkonfiguration und vor allem der Entscheidungsunterstützung zu nennen. Die rechnerbasierte Wissensverarbeitung geht dabei auf die Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) aus den 1950er-Jahren zurück.⁴⁰⁰

Die VDI-Richtlinie 2221 beschreibt in diesem Kontext ein Ablaufmodell zum durchgängigen, rechnergestützten Vorgehen für Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse. Geht dabei die Rechnerunterstützung über die Anwendung einzelner Berechnungs-, Zeichnungs- und Informationsbereitstellungsprogramme hinaus, indem eine Verknüpfung von Einzelprogrammen zu Programmsystemen realisiert wird, kann eine Durchgängigkeit des Daten- und Arbeitsflusses sowie eine flexible Anwendung für unterschiedliche Aufgabenstellungen erreicht werden. Voraussetzung hierfür ist, dass

³⁹⁹ In Anlehnung an die KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung nach Albers wird Wissen entsprechend der in der Produktentwicklung am häufigsten anzutreffende Beschreibung als „vernetzte Information“ bezeichnet die in die Lage versetzt, Vergleiche anzustellen, Verknüpfungen herzustellen und Entscheidungen zu treffen. (Verein Deutscher Ingenieure 2008) Information steht für strukturierte Daten, welche wiederum auf objektiven Fakten beruhen. Vgl. Schmalenbach 2013

⁴⁰⁰ vgl. Spur & Krause 1997 S. 41 ff. nach Lutz 2012 S. 37 f.

CAD-Systeme über die Programmteile Daten- und Wissensspeicher, Produktmodelle, Operationsmethoden sowie Editor und Geometriemodellierer verfügen.⁴⁰¹

Daran anknüpfend stellt sich die Frage, inwieweit Konstruktionswissen direkt im CAD-Modell in entsprechenden CAD-internen Wissensablagen gespeichert werden soll, oder in einer CAD-unabhängigen Wissensbasis. Für das produktbezogene Wissen, insbesondere mit Bezug zur Gestalt, bietet sich eine enge Verbindung mit dem CAD-Modell an, da hierbei vorhandene CAD-Basisfunktionen, wie Parametrik und Verknüpfungstechnik (Constraints), verwendet werden können. Arbeitsschritte, Abläufe und dergleichen mehr lassen sich hingegen, als geometrieunabhängiges Wissen, einfach vom CAD-Modell abkoppeln. Den Vorteilen einer CAD-integrierten Wissensspeicherung (Verarbeitungsgeschwindigkeit, teilweise einfache Regelformulierung) stehen Nachteile beim Zugriff und der Verwaltung der Regeln von außen gegenüber, weshalb beide Ansätze unternehmensspezifische zu bewerten sind.⁴⁰²

CAD- und PDM-Systeme bilden die Grundlage der täglichen Konstruktionsarbeit und sind bei der Variantenentwicklung auf Basis bestehender Referenzprodukte beteiligt. Zur Auswahl zielführender Varianten muss zunächst eine Menge an gültigen Varianten erzeugt (abgeleitet) und bewertet werden. Hierzu müssen die relevanten Referenzprodukte gemäß der neuen Anforderungen und Randbedingungen variiert und zu neuen Varianten kombiniert werden.⁴⁰³ Mit dem Einsatz von CAD- und PDM-Systemen lässt sich die Variantenableitung nur bedingt realisieren. Die Schwierigkeit bei derartigen Konfigurationsproblemen liegt darin, dass die einzelnen Komponenten nicht unabhängig voneinander gewählt werden können, da sie in vielfältigen Abhängigkeiten zueinander stehen. BRINKOP verweist deshalb in seinem „Marktführer Produktkonfiguration“ auf eine gängige Einteilung von Konfigurationsproblemen anhand ihrer Komplexität. Diese Klassifizierung bezieht sich nach SCHÖNSLEBEN auf die Logistik- und Produktionsressourcen und wird als Merkmal der Produktionsumgebung verstanden. LUTZ greift das Verständnis nach SCHÖNSLEBEN zur Einordnung von Produkten nach ihrem Produktionskonzept auf. Auf diesen drei Quellen basieren die Ausprägungen der folgenden Klassen:⁴⁰⁴

Make-to-Stock (MTS) oder auch **Pick-to-Order (PTO)**: Entspricht der klassischen Lagerfertigung, die unabhängig von Aufträgen und Kundenanforderungen erfolgt. Die Kunden wählen dabei Produkte aus dem Lagerbestand der angebotenen Produktpalette aus, wobei zwischen den Produkten (z.B. Fernseh- oder Haushaltsgeräte) keine Abhängigkeiten bestehen. Aus Sicht des Produktes selbst ist dies derart zu interpretieren:

⁴⁰¹ vgl. VDI 2221 1993 S. 13 ff.

⁴⁰² vgl. Lutz 2012 S. 60 f.

⁴⁰³ vgl. Definition 6-1: Variantenauswahlprozess im erweiterten ZHO-Modell auf S. 229

⁴⁰⁴ vgl. Schönsleben 2011 S. 206 ff. Brinkop 2016 S. 5; Lutz 2012 S. 15 f.

tieren, dass die Einzelkomponenten des Produktes (Angebots) im Grunde unabhängig, und damit ohne den Einsatz eines Produktkonfigurators, ausgewählt werden können. Etwaige Abhängigkeiten zwischen den Komponenten werden hierbei durch den Benutzer berücksichtigt.

Configure-to-Order (CTO): Hier sind die Abhängigkeiten der Produktkomponenten zu berücksichtigen, da diese nicht unabhängig voneinander gewählt werden können.

Assemble-to-Order (ATO) stellt eine Unterklasse von CTO dar, bei der die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten weitestgehend einfacher Natur sind und die Produktkomponenten in vollständig detaillierter Form idealerweise bereits vorgefertigt im Lager vorliegen. Der Kerngedanke liegt dabei in einer auftragsneutralen Vorfertigung in Kombination mit einer kundenspezifischen Endfertigung oder Montage (z.B. PKW, PC, etc.).

Make-to-Order (MTO) ist ebenfalls als eine Unterklasse von CTO zu sehen. Im Vergleich zu ATO sind die Abhängigkeiten komplexer Natur, was u.a. zur bedarfsweisen Fertigung einzelner Komponenten führt. Die Produkte werden demnach auftragspezifisch konfiguriert. Dabei werden sowohl vordefinierte Komponenten als auch neue Teile nötig, die auf die Kundenanforderungen entsprechend angepasst werden müssen. Die Variabilität der Produkte ist dabei zwar begrenzt, jedoch kann die Anzahl an gültigen Varianten sehr hoch werden (z.B. Maschinen- und Schiffsbau, Sonder- und Werkzeugmaschinen, NFZ, etc.).

Engineer-to-Order (ETO): Die Komponenten sind nicht notwendigerweise alle vorher bekannt. Die charakterisierenden Eigenschaften können jedoch aufgrund der Abhängigkeiten bestimmt werden, um diese im Auftragsfall zu konstruieren. Dadurch, dass diese Produkte nicht vollständig vorausgedacht werden können, ist der Spezialisierungsgrad sehr hoch. Aufgrund des umfassenden Anteils an Komponenten, die im Auftragsfall zu konstruieren sind, werden so gut wie keine Lagerbestände gehalten. Vor der Beschaffung und Produktion müssen demzufolge große Teile des Kundenauftrags die Entwicklungsabteilung durchlaufen (z.B. klassische Einzelfertigung, Anlagenbau, komplexe Maschinen zur Herstellung von Spezialprodukten, etc.).

CAD- und PDM-Systeme sind als etablierte IT-Systeme zur Rechnerunterstützung der Konstruktion bereits genannt worden. Ebenso die Produktkonfiguration zur Unterstützung bei Konfigurationsproblemen. Diese Basistechnologien werden nach LUTZ durch die wissensbasierte Konstruktion ergänzt und nachfolgend vorgestellt.⁴⁰⁵

⁴⁰⁵ vgl. Lutz 2012 S. 52 ff.

CAD – Computer Aided Design

Die Arbeit mit CAD-Systemen ist heutzutage die Kerntätigkeit von Konstrukteuren. In der Automobilbranche werden dabei fast ausschließlich parametrische 3D-CAD-Systeme eingesetzt. Diese ermöglichen es dem Konstrukteur realitätsnahe 3D-Modelle von Produkten zu erstellen. Diese 3D-Modelle bilden die Basis zur Ableitung von Zeichnungen, wobei 2D- und 3D-Modelle bidirektional-assoziativ miteinander verknüpft sind. Eine Geometrieänderung am 3D-Modell resultiert in einer entsprechenden Anpassung der Zeichnung. Ebenso führen Maßänderungen in Zeichnungen zur Anpassung der 3D-Geometrie. In diesem Zusammenhang sieht ABULAWI das Ziel der parametrisch-assoziativen Konstruktion darin, schnelle und konsistente Modelanpassungen an geplante Änderungen zu realisieren. Dabei beschreibt ein parametrisch-assoziatives CAD-Modell nicht ausschließlich eine explizite Gestaltungsvariante, sondern darüber hinaus die zugehörige Konstruktionsabsicht, indem die beim Modellieren vom Konstrukteur definierten Attribute der Erzeugungsfunktionen in modellinternen Variablen gespeichert werden. Diese Variablen werden als Parameter bezeichnet. Bei jeder neuen Berechnung der Geometrie⁴⁰⁶ greifen die in der Historie⁴⁰⁷ gespeicherten Erzeugungsfunktionen auf die aktuellen Parameterwerte zu, die entweder explizit im Modell gespeichert sind oder durch algebraische oder bedingte Ausdrücke ermittelt werden.⁴⁰⁸ Im Zusammenhang mit der parametrischen Modellierung verweist LUTZ bei der Erstellung von Designfeatures auf die bidirektionale Assoziativität zwischen Geometrie und Maßzahl. Der Konstrukteur skizziert dabei zunächst grob eine Geometrie und präzisiert diese im Anschluss, indem den skizzierten Geometrieelementen (Abstände, Winkel, Radien, etc.) konkrete Bemaßungswerte zugewiesen werden.⁴⁰⁹ Mittels weiterer, geometrischer Bedingungen (parallel, rechteckig, tangential, symmetrisch, etc.) können zusätzlich Freiheitsgrade eingeschränkt werden, bis die Skizze vollständig beschrieben ist. Geometriebedingungen (z.B. Symmetrie oder Parallelität) reduzieren in diesem Zusammenhang die Anzahl an Bemaßungen in einer Skizze. Ein Designfeature wird abschließend erzeugt, indem eine entsprechende Erzeugungsfunktion (Skizze drehen um Achse, Skizze ziehen entlang Kurve, etc.) gewählt wird. Darüber hinaus kann beim Feature-basierten Modellierungsansatz für häufig verwendete Designfeatures (Gewinde, Bohrungen, Nuten, Fasen, Rundungen, etc.) auf vordefinierte Features zurückgegriffen werden,

⁴⁰⁶ Die Neuberechnung der gespeicherten Erzeugungsfunktionen auf Basis der aktuellen Parameterwerte wird in der CAD-Konstruktionspraxis als Modellregeneration bezeichnet.

⁴⁰⁷ Historienbasierte CAD-Systeme speichern zusätzlich zur Ergebnisgeometrie die Entstehungsgeschichte in Form eines Modell- bzw. Historienbaumes ab.

⁴⁰⁸ vgl. Abulawi 2012 S. 78

⁴⁰⁹ vgl. Lutz 2012 S. 53 f.

die durch die Eingabe der erforderlichen Parameterwerte an die Randbedingungen angepasst werden können.⁴¹⁰

Bemaßungen und Geometriebedingungen stellen für das Modell Randbedingungen (Constraints) dar. SPUR ET AL. sprechen dabei von einem Constraint-basierten Entwurf.⁴¹¹ Hieraus leitet sich zunächst ab, dass Constraints Zwangsbedingungen für die Gestalt der Modelle sind. Daneben können sich Constraints auf die Lage von Designfeatures sowie die Position von Bauteilen in einer Baugruppe beziehen. Hiermit können bestehende CAD-Modelle eines Baukastens angepasst werden, indem die entsprechenden Geometrieelemente variiert werden. Zudem können diese angepassten CAD-Modelle anschließend durch Zusammenbaubedingungen an der geforderten Position innerhalb einer Baugruppe eingebaut werden. Zur Anpassung von CAD-Modellen einer Klasse (Antriebselemente, Abtriebselemente, etc.) bietet es sich an, einheitliche Skelettmodelle zu verwenden. Diese bestehen ausschließlich aus Referenzen (Ebenen, Achsen, Punkte, Referenzflächen, etc.). Alle CAD-Modelle einer Klasse beinhalten das gleiche Skelettmodell. Bei der Geometrieerstellung wird dann konsequent nur auf das Skelett referenziert, das die Constraints abbildet. Diese werden dann bei einer Variation durch die entsprechenden Parameter adressiert. Ebenso wird auf Baugruppenebene verfahren. Auch hier lässt sich über ein entsprechendes Skelettmodell die Lage der Baugruppenkomponenten regeln.

Entscheidungsunterstützung durch CAD-Systeme

Durch die Definition von Zwangsbedingungen (Constraints) können sowohl die Geometrie der CAD-Modelle eines Baukastens als auch deren Zusammenbau zu Variantenbaugruppen mittels entsprechenden Parameterwerten gesteuert werden. Dabei kann die bedingte Kombination der zur Verfügung stehenden CAD-Modelle des Baukastens durch das CAD-System nur sehr eingeschränkt abgebildet werden. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten hierzu auch sehr stark vom verwendeten CAD-System selbst abhängig. Neben dem CAD-basierten Ableiten der Varianten stellt die Bewertung eine weitere Herausforderung dar. Durch die Parametrik können CAD-intern entsprechende, mathematische Ausdrücke formuliert werden, um die unterschiedlichsten, geometriegebundenen Bewertungszielgrößen (Masse, Rotationsmoment, Steifigkeiten, etc.) zu ermitteln. Teilweise kann dabei auf bereits vorimplementierte Funktionen zurückgegriffen werden. Um vergleichende Untersuchungen anstellen zu können, müssen diese, zunächst implizit im CAD-Modell vorhandenen Bewertungszielgrößen, expliziert werden und Werten anderer Varianten gegenübergestellt werden. Würde z.B. nur die Masse als Auswahlkriterium herangezogen werden, könnte

⁴¹⁰ vgl. Abulawi 2012 S. 93; Lutz 2012 S. 54 f.

⁴¹¹ vgl. Spur & Krause 1997 S. 166 ff. nach Lutz 2012 S. 54

mit entsprechendem Aufwand zwischen mehreren Varianten ausgewählt werden. In der Regel sind aber für die Auswahl mehrere Zielgrößen ausschlaggebend, die zudem in wechselseitigen Beziehungen untereinander stehen. Demzufolge kann eine ausschließlich CAD-basierte Entscheidungsunterstützung nicht zielführend sein.

PDM – Produktdatenmanagement

Zentrales Arbeitswerkzeug für den Konstrukteur bildet, neben dem CAD-System, das PDM-System, in dem die erzeugten Daten (2D- und 3D-CAD-Modelle, beschreibende Informationen zu den Daten, etc.) zentral gespeichert werden. Über das PDM-System werden darüber hinaus Änderungen sowie die Variantenerzeugung dokumentiert. Die Verwendbarkeit der vom Konstrukteur produzierten Daten wird zudem durch Statusvergabe über das PDM-System geregelt wodurch es zum zentralen Abstimmungsorgan zwischen Konstruktion und den produzierenden Werken wird.

EIGNER & STELZER verstehen schwerpunktmäßig unter Produkt- und Dokumentenmanagement die Zuordnung von beliebigen IT- oder manuell erzeugten Dokumenten (2D-Zeichnungen, 3D-Modelle, textuelle Dokumente, Berechnungsergebnisse, Projektdaten). Zwischen Dokumenten, Produkt- und Projektdaten bestehen demzufolge beliebige Beziehungen. Heutige PDM-Systeme basieren auf relationalen Datenbanken und kennzeichnen sich durch die getrennte Handhabung physischer Dateien, die aus beliebigen Erzeugersystemen stammen und damit vielfältige Formate haben können.⁴¹² EIGNER & STELZER beschreiben ferner zwölf Grundfunktionen von PDM-Systemen. Die technische Stamm- und Stücklistenverwaltung, das Dokumentenmanagement und die Funktionen der Klassifizierung sind dabei in der Regel Standardfunktionen allen marktüblichen PDM-Systemen. Daneben sind ein vollständiges Konfigurations- und Projektmanagement sowie Publishing-, Archivierungs- und Backup-Funktionen eher die Ausnahme.⁴¹³ LUTZ fasst in seiner Arbeit die Kernfunktionen zusammen, die auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit von Interesse sind:⁴¹⁴

Produktdaten- und Dokumentenmanagement: Verwaltung der die Produkte definierenden Daten und Dokumente (2D- und 3D-CAD-Modelle, Stücklisten, Projektdaten, etc.) sowie der unterschiedlichen Dateitypen mit Kopplung zu den Erzeugersystemen. Dazu zählt das Änderungsmanagement mit Versions- und Statusverwaltung.

Produktstruktur- und Konfigurationsmanagement: Erstellung und Bearbeitung von Produktstrukturen mit Ableitung unterschiedlicher Stücklisten und Verwendungsnachweise. Ferner das Management von Produktvarianten und von Produktstrukturveränderungen über der Zeit in Form von Konfigurationen und Versionen.

⁴¹² vgl. Eigner & Stelzer 2009 S. 31 f.

⁴¹³ vgl. Eigner & Stelzer 2009 S. 35 f.

⁴¹⁴ vgl. Lutz 2012 S. 56

Klassifizierung und Teilefamilienmanagement: Bereitstellung von effizienten Recherche Mechanismen zum Auffinden von Teile- und Produktinformationen sowie geeigneter Möglichkeiten zur Teileklassifizierung.

Entsprechend der VDI-Richtlinie 2219 sind PDM-Systeme technische Datenbank- und Kommunikationssysteme, um Produktinformationen und deren Entstehungsprozesse konsistent zu speichern, zu verwalten und transparent für alle Unternehmensbereiche zur Verfügung zu stellen und bilden damit eine Integrationsplattform für die verschiedenen Erzeugersysteme.⁴¹⁵ Für FELDHUSEN & GEBHARDT ist in Anlehnung daran ein PDM-System ein rechnerunterstütztes Datenbank- und Kommunikationssystem zur Speicherung, Verwaltung und Bereitstellung aller produktbeschreibenden Daten während des gesamten Produktlebenszyklus.⁴¹⁶ EIGNER & STELZER definieren PDM darüber hinaus als das Management des Produkt- und Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen. Dabei beziehen sie sich darauf, dass letztlich alle Aktivitäten im Sinne des Konfigurationsmanagements nach ISO 10007⁴¹⁷ darauf abzielen, zu jedem Zeitpunkt des Lebenslaufs eines Produktes über seinen derzeitigen Bauzustand (Konfiguration) Auskunft geben zu können. Ferner liegt die Historie zur Entstehung des aktuellen Bauzustandes vor (Änderungsindex, Änderungsbeschreibung, etc.).⁴¹⁸

Entscheidungsunterstützung durch PDM-Systeme

Eine Konfiguration ist eine Beschreibung eines Produkts zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. in einem definierten Auslieferungsstatus.⁴¹⁹ Dies ist die zentrale Aufgabe eines PDM-Systems. Moderne PDM-Systeme stellen ferner eine vereinfachte Art eines Produktkonfigurators dar, denn diese Systeme sind grundsätzlich dazu in der Lage Varianten anhand einer modularen Produktstruktur regelbasiert abzuleiten und können deshalb vorzugsweise für ATO-Konfigurationsprobleme verwendet werden. Durch entsprechende Programmieraufwände könnten die über das PDM-System verfügbaren Daten von Referenzprodukten auf Variantenebene aggregiert werden und variantenspezifische Kennzahlen auf Grundlage zuvor definierter Anforderungen und Randbedingungen zur Entscheidungsunterstützung herangezogen werden. Sollen hingegen auf Grundlage bestehender Referenzprodukte aus dem PDM-System Varianten abgeleitet werden, die auf Basis emergenter Zielgrößen auf deren Eignung für einen konkreten Anwendungsfall hin untersucht werden sollen, so genügt es nicht mehr, die statischen Produktinformationen zu den Referenzmodellen in den Feldern

⁴¹⁵ vgl. VDI 2219 2002 S. 4

⁴¹⁶ vgl. Feldhusen & Gebhardt 2008 S. 75

⁴¹⁷ vgl. Eigner & Stelzer 2009 S. 131; DIN ISO 10007 2004

⁴¹⁸ vgl. Eigner & Stelzer 2009 S. 33 f.

⁴¹⁹ vgl. Eigner & Stelzer 2009 S. 113

der Dateninformationssätze zu verwenden. Hierzu wird eine dynamische Variation der relevanten Parameter erforderlich, die sich durch Anpassung der CAD-Modelle an die neuen Anforderungen und Randbedingungen constraint-basiert ergeben. Hierzu wird eine enge Kopplung an das CAD-System erforderlich, die entsprechend hohe Programmieraufwände mit sich bringt und hinsichtlich produkt- und unternehmensspezifischen Randbedingungen wirtschaftlich bewertet werden muss.

Produktkonfiguration

Die rechnergestützte Konfiguration ist insbesondere mit der zunehmenden Forderung nach individualisierten Produkten zu einer der Kernfunktionen des Marketings geworden. Als Folge der Konfigurationspolitik bieten nach Auffassung von LINDEMANN & REICHWALD Unternehmen am Markt letztlich keine Produkte an, sondern vielmehr die unternehmensspezifischen Fähigkeiten, für und vor allem mit jedem Kunden eine individualisierte Lösung zu gestalten. Konfiguratoren haben als Interaktionsplattform zwischen Hersteller und Abnehmer deshalb, neben ihrer technischen Funktion der Produktauswahl und Produktgestaltung, auch eine wesentliche Marketingaufgabe.⁴²⁰ Im Umfeld variantenreicher Serienprodukte sprechen LINDEMANN & REICHWALD hinsichtlich der technischen Umsetzung der Konfigurationspolitik von Produktkonfiguratoren.⁴²¹ Nach SCHUH bedeutet Produktkonfiguration die Zusammenstellung von Produkten und Systemlösungen gemäß Kundenspezifikationen auf Grundlage standardisierter Bauteile und in einer Wissensbasis gespeicherter Konfigurationsregeln.⁴²² HÖHNE UND SCHNEIDER betonen stärker die Anbietersicht und definieren Produktkonfiguration als das Konzipieren eines Produktes auf Grundlage der Kundenanforderungen und des technologischen Know-hows des Anbieters.⁴²³ BLUMÖHR ET AL. verwenden hingegen den Begriff „Variantenkonfiguration“ und sehen diese als eine Verallgemeinerung der Produktkonfiguration.⁴²⁴ BRINKOP beschreibt ganz allgemein einen Produktkonfigurator als ein Werkzeug das dabei hilft, ein Produkt so zu bestimmen, dass es vorgegebenen Anforderungen genügt. Dabei kann ein Produktkonfigurator auf verschiedene Weise erstellt werden. Er kann speziell programmiert oder mit Hilfe einer Konfigurationssoftware erstellt werden.⁴²⁵ Zur Abwicklung von Kaufprozessen individualisierter Produkte mittels eines Konfigurators führen LINDEMANN & REICHWALD entsprechende Aufgaben auf, die an den Konfigurator gestellt werden. Hierbei stellt u.a. die Visualisierung der aktuellen Produktkonfiguration eine techni-

⁴²⁰ vgl. Lindemann & Reichwald 2006 S. 26

⁴²¹ vgl. Lindemann & Reichwald 2006 S. 28

⁴²² vgl. Link & Hildebrand 1993 S. 118 nach Schuh 2005 S. 240

⁴²³ vgl. Höhne & Schneider 1998 S. 197

⁴²⁴ vgl. Blumöhr, Münch & Ukalovic 2011 S. 38

⁴²⁵ vgl. Brinkop 2016 S. 3

sche Herausforderung dar.⁴²⁶ Auch LUTZ räumt ein, dass bei Produktkonfiguratoren einerseits die wissensbasierte Unterstützung bezüglich der Konfiguration zwar hoch ist. Andererseits sind die Möglichkeiten, gleichzeitig auch konstruktive Unterstützung anzubieten, eher bescheiden. Aus dieser Marktanforderung haben sich 3D-Produktkonfiguratoren oder auch CAD-Konfiguratoren entwickelt.⁴²⁷ BRINKOP führt in seiner Arbeit Problemlösungsmethoden für Konfigurierungsprobleme auf und bewertet sie hinsichtlich ihrer Eignung für die Variantenkonstruktion.⁴²⁸ Sein Fazit beschreiben nachfolgend die Tabelle 2-2 und die Tabelle 2-3:⁴²⁹

Verfahren	Beschreibung	Bewertung der Eignung	
Suchverfahren	Suche im Raum der möglichen Konfigurationen. Einsatz allgemeiner, heuristischer Suchverfahren. Interessant hierbei Verfahren, die auf AND/OR-Graphen arbeiten.	Vorausgesetzt ist die Formulierung von Bewertungsfunktionen für Eigenschaften für Teilkonstruktionen. Lokale Bewertungen lassen sich aber nicht ohne weiteres auf die Gesamtkonstruktion übertragen.	bedingt
logikorientiertes Konfigurieren	Beschreibung der Objektauswahl, Parametrisierung und hierarchischen Verfeinerung der Konfiguration auf einer logischen Ebene.	Sprachumfang reicht nicht aus für praxisrelevante Aufgabenstellungen.	nicht
Assoziatives Konfigurieren	Orientiert sich an der Baustuktur und zur Transformation einer Anforderungsspezifikation in eine Entwurfsspezifikation durch multiple, rückgekoppelte Selektion. Jede konstruktive Teilaufgabe muss dabei isoliert gelöst werden können.	Voraussetzung sind voneinander unabhängig lösbare Teilkonstruktionen und von der Anzahl der Elemente (Kardinalität) her kleine Wertebereiche.	bedingt
Ressourcenorientiert	Ausgehend von einer Anforderung an das System werden geeignete Komponenten ausgewählt, um diese Leistung zu erbringen.	Domänenmodellierung als ressourcenbereitstellende und -verbrauchende Konstruktionsbauteile. Die Behandlung zyklischer Abhängigkeiten ist problematisch.	bedingt
strukturorientiert	Orientiert sich an der Baustuktur der Konstruktionsobjekte und ist gekennzeichnet durch Regeln, AND/OR-Bäume, Skelettpläne und Typisierung von Komponenten.	Domänenmodellierung analog zur Baustuktur, an der sich auch die Ablaufsteuerung orientiert.	geeignet

Tabelle 2-2: Eignung von Problemlösungsmethoden für die Variantenkonstruktion (Teil 1/2)

⁴²⁶ vgl. Lindemann & Reichwald 2006 S. 120 ff.

⁴²⁷ vgl. Lutz 2012 S. 52

⁴²⁸ vgl. Brinkop 1999 S. 11 ff.

⁴²⁹ vgl. Brinkop 1999 S. 22 f.

Verfahren	Beschreibung	Bewertung der Eignung	
funktionso- rientiert	Konstruktionsobjekte werden ihren Funktionalitäten entsprechend charakterisiert.	Domänenmodellierung analog zur Funktionsstruktur.	geeignet

Tabelle 2-3: Eignung von Problemlösungsmethoden für die Variantenkonstruktion (Teil 2/2)

Entscheidungsunterstützung durch Produktkonfiguration

Produktkonfiguratoren können, unter Verwendung fallspezifisch geeigneter Problemlösungsmethoden entsprechend Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3, zur Lösung auch komplexerer Konfigurationsaufgaben verwendet werden. Dabei bedient sich die Produktkonfiguration einer expliziten Wissensbasis, die sowohl die zu kombinierenden Elemente als auch die Konfigurationsregeln umfasst, die die Produktexperten im Unternehmen definieren. Dabei kann die Anzahl der gültigen Elementkombinationen rasch sehr hohe Werte annehmen.⁴³⁰ Das Hauptanwendungsgebiet für Produktkonfiguratoren sieht LUTZ in CTO-Konfigurationsproblemen (ATO/MTO).⁴³¹ BRINKOP sieht insbesondere bei Konfigurierungsproblemen der ETO-Kategorie mit hohem konstruktivem Anteil eine Integration des Produktkonfigurators in die CAD-Umgebung als vorteilhaft.⁴³² Die CAD-Schnittstelle kann dabei uni- oder bidirektional betrieben werden. Vielfach ist eine Visualisierung der Konfigurationsergebnisse in einer 2D- oder auch 3D-Darstellung sinnvoll. Dazu werden die Konfigurationsdaten, entweder am Ende des Konfigurationsprozesses oder auch kontinuierlich, an das CAD-System übertragen, um die erforderlichen Darstellungen zu erstellen. Die erzeugten 2D- oder 3D-Modelle können damit bei Bedarf dem Kunden mitgeliefert werden. Eine noch engere Kopplung kann bei ETO-Aufgabestellungen sinnvoll sein, indem das CAD-System darüber hinaus als Eingabeoberfläche für den Konfigurator genutzt werden kann.⁴³³ Auch LUTZ sieht die zunehmende Kopplung zwischen CAD-System und Konfigurator als ein Resultat einer steigenden Nachfrage an konfigurationsbegleitenden, technischen Unterlagen (Zeichnungen, 3D-Ansichten, 3D-CAD-Modelle, etc.), wobei das CAD-System von außen regelbasiert gesteuert und die Konfigurationsintelligenz im Konfigurator verortet wird. Voraussetzung für eine Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl mit einem Konfigurator ist, dass mehrere, gültige Varianten parallel abgeleitet werden, die anhand kunden- und anbieterspezifischer Anforderungen und Randbedingungen zu bewerten sind. Entsprechende Erfüllungsgrade

⁴³⁰ vgl. Berechnung der produktspezifischen Elementtypenkombinationen (AP08) auf S. 201: Für das Anwendungsbeispiel in dieser Arbeit ergaben sich 29.393.280 Kombinationsmöglichkeiten, die durch Anwendung produktspezifischer Regeln auf 74.196 Kombinationen reduziert werden konnten.

⁴³¹ vgl. Lutz 2012 S. 25

⁴³² vgl. Brinkop 2016 S. 6

⁴³³ vgl. Brinkop 2016 S. 8

können dabei ermittelt und für vergleichende Zwecke herangezogen werden. Zentral für die Variantenbewertung sind darüber hinaus geometrieebundene, emergente Produkteigenschaften, die nicht einfach auf Grundlage der Referenzprodukte in der Wissensbasis auf die Gesamtsysteme übertragen werden können. Diese können sich auch auf den Konfigurationsprozess auswirken, so dass die Explizierung der zunächst implizit in den CAD-Modellen enthaltenen, emergenten Produkteigenschaften in die Wissensbasis zu einer entscheidenden Aktivität im Zusammenhang mit der Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl mit Hilfe eines Konfigurationssystems wird. Produktkonfiguratoren im klassischen Sinne (z.B. internetbasierte Konfiguratoren unterschiedlicher Automobilhersteller) sind grundsätzlich dazu geeignet, beispielsweise die Kundenkaufentscheidung zu unterstützen. Für eine Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl im unternehmensinternen Entwicklungsbereich muss die Konfiguration weit enger an CAD- und PDM-Systeme gekoppelt werden, und der CAD-Einsatz über die reine Visualisierung hinausgehen.

KBE – Wissensbasierte Konstruktion

Sowohl die Definition als auch die Zielsetzung der wissensbasierten Konstruktion wird in der Literatur sehr vielfältig beschrieben. ABULAWI versteht unter KBE Ansätze und Methoden, mit denen Konstruktionswissen (Prüfungen, Regeln, ereignisgesteuerte Aktionen, gezielte Wertzuweisungen und Beziehungen zwischen Konstruktionselementen) derart repräsentiert werden kann, dass die Wissens Elemente unabhängig von den zu ihrer Verarbeitung benötigten Mechanismen erstellt und modifiziert werden können.⁴³⁴ Das wissensbasierte Konstruieren geht dabei auf die Mitte der 1980er-Jahre zurück als Unternehmen nach Möglichkeiten gesucht haben Produktentwicklungszyklen mit Hilfe geeigneter CAD-Methoden zu reduzieren. Aus den Entwicklungsbereichen kamen daher Bestrebungen etablierte, wissensbasierte Systeme um Geometriefunktionen zu erweitern und in den Konstruktionsprozess zu integrieren.⁴³⁵ Nach VAJNA ET AL. kann KBE heute als die natürliche und logische Ergänzung der rechnerunterstützten Produktentwicklung betrachtet werden. Das Bereitstellen von Wissen, z.B. über das CAD-System, ermöglicht zum frühestmöglichen Zeitpunkt nicht nur fundierte Entscheidungen, sondern bildet auch die Ergänzung zur vollständigen, digitalen Beschreibung des Lebenszyklus eines Produktes. Deshalb beschreibt KBE nach VAJNA ET AL. Systeme zur Wissensnutzung in der Produktentwicklung. Dabei betonen sie insbesondere Vorteile für den Einsatz von KBE, wenn zur Problemlösung oder zur Erfüllung der Aufgabenstellung eine Kombination aus Konfiguration, (Ingenieur-)Wissen und Geometrie benötigt wird.⁴³⁶ Daran anknüpfend wird

⁴³⁴ vgl. Abulawi 2012 S. 96

⁴³⁵ vgl. Lutz 2012 S. 59

⁴³⁶ vgl. Vajna, Bley, Hehenberger, Weber & Zeman 2009 S. 432

die Rolle des CAD-Systems im Zusammenhang mit KBE recht einheitlich verstanden. In diesem Kontext wird vordergründig die Integration von Produkt- und Prozesswissen in die CAD-Modelle beschrieben. KBE stellt damit eine Weiterentwicklung der Feature-basierten Konstruktion dar, indem die erweiterten Features neben der Geometrie zusätzlich Produkt- und Prozesswissen sowie Funktionen und Eigenschaften beinhalten.⁴³⁷ Darüber hinaus kann das integrierte Wissen Regeln über die Anwendbarkeit und Gültigkeit von Bauteilen und Baugruppen sowie deren Kombination und Positionierung zueinander beinhalten. Insbesondere bei der Produktstrukturierung sowie der Beschreibung funktionaler und parametrischer Beziehungen zwischen Einzelteilen und Baugruppen kommen diese Regeln zum Einsatz, um das Einhalten von Konstruktionsrichtlinien, Fertigungsbedingungen, Montierbarkeit und dergleichen mehr zu prüfen.⁴³⁸ Nach ABULAWI dient KBE damit auch der Automatisierung von Konstruktionsprozessen, allerdings spielen hier der erreichbare Automatisierungsgrad und die damit einhergehende Entbehrlichkeit des Konstrukteurs eine untergeordnete Rolle. Vielmehr steht für sie die Entlastung des Konstrukteurs im Vordergrund, und zwar durch das Vermeiden von Unterforderung durch anspruchslöse, zeitraubende Routineaufgaben und das Vermeiden von Überforderung durch zu hohe Aufgabenkomplexität oder fehlendes Expertenwissen. Mit KBE soll nach Auffassung von ABULAWI keine vollautomatische Konstruktion erreicht werden. Stattdessen soll der Konstrukteur durch die vom CAD-System automatisch ausgeführten Anwendungen bestimmter Konstruktionsregeln unterstützt werden.⁴³⁹ DANJOU ET AL. stellen hingegen einen Ansatz zur automatisierten Modulierung auf KBE-Basis vor.⁴⁴⁰

Für den zunehmenden Bedarf von Konstrukteuren, Abläufe ihrer täglichen Konstruktionsarbeit ohne den Einsatz umfangreicher KBE-Systeme selbstständig für ihre Belange zu automatisieren, sind unter dem Begriff **Design Automation** neue Systemarten entstanden, die als Weiterentwicklung der Makroprogrammierung verstanden werden können. Dabei steht das Ziel im Vordergrund, Vorgänge in der Konstruktionspraxis zu erleichtern.⁴⁴¹ ABULAWI stellt neben der Makroprogrammierung weitere Automatisierungsarten (z.B. API-Programmierung) vor mit denen versucht wird, eine Teil- oder gar Vollautomatisierung von Konstruktionsabläufen zu realisieren.⁴⁴²

Auf Grundlage der langjährigen Konstruktionspraxis des Autors kann eine Automatisierung von Standardabläufen grundsätzlich Vorteile bringen. Mit zunehmendem Grad der Automatisierung können sich jedoch auch Nachteile hinsichtlich der Wie-

⁴³⁷ vgl. Jandeleit, Zirkel, Strohmeier & Vajna 2000 nach Vajna 2009 S. 433

⁴³⁸ vgl. Vajna, Bley, Hehenberger, Weber & Zeman 2009 S. 432

⁴³⁹ vgl. Abulawi 2012 S. 96

⁴⁴⁰ vgl. Danjou, Lupa & Köhler 2008

⁴⁴¹ vgl. Lutz 2012 S. 61

⁴⁴² vgl. Abulawi 2012 S. 99 ff.

derverwendung bestehender Referenzprodukte ergeben, und zwar vor allem dann, wenn die Automatisierung an das CAD-System gebunden ist. Hierbei entstehen mitunter Probleme hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Funktionsweise der Automatisierung und des, bedingt durch den Grad der Parametrisierung, erstellen Constraint-Netzes. Dadurch, dass jeder Konstrukteur eine Automatisierung an seiner individuellen Arbeitsweise ausrichtet kann der Fall eintreten, dass derartige CAD-Modelle nicht als Referenzmodelle von anderen Konstrukteuren verwendet werden können und bestehende Modelle demnach nochmal CAD-technisch aufgebaut werden. Dies bindet zusätzliche Konstruktionskapazitäten und führt zudem zu redundanten Konstruktionen. Die Automatisierung hat demnach nach Ansicht des Autors klare Grenzen. Sie kann aber auch durchaus fallspezifische Vorteile bieten. Hierzu eignet sich ein abteilungs- bzw. unternehmensweit abgestimmtes Parametermodell, das in entsprechenden Standards beschrieben ist.

Entscheidungsunterstützung durch KBEs

Bei der Erweiterung der Feature-basierten Konstruktion durch die zusätzliche Integration von Produkt- und Prozesswissen in die CAD-Modelle steht die Unterstützung des wissensbasierten Konstruierens im Fokus. Im Gegensatz zur Charakterisierung wissensbasierter Funktionen in der Produktkonfiguration ist die wissensbasierte Konfiguration in KBE-Systemen von untergeordneter Bedeutung.⁴⁴³ Dadurch, dass KBE-Systeme nicht auf das Ableiten von Varianten abzielen, können diese Systeme auch nur bedingt eine Entscheidungsunterstützung zur Identifikation einer fallspezifisch zielführenden Kombination aus bestehenden Referenzprodukten bieten. DANJOU ET AL. nutzen KBE-Systeme vielmehr zur Automatisierung des Konstruktionsprozesses auf Grundlage von KBE-Systemen, wie beispielweise Pro/Toolkit (PTC) oder Knowledgware (Dassault Systèmes), die speziell für die Einbindung in die CAD-Umgebung von CAD-Systemanbietern zur Verfügung gestellt werden. In der Anbindung von KBE-Systemen an CAD-Systeme ist auch deren signifikanter Unterschied zu sehen. Alleinstehende KBE-Systeme bedingen geeignete Austauschformate, um Geometriedaten an CAD-Systeme zu übertragen. Andere Systeme bieten über API-Schnittstellen eine direkte CAD-Integration und können an individuelle Bedürfnisse angepasst werden.⁴⁴⁴ In ihren Untersuchungen konnten DANJOU ET AL. durch den KBE-Einsatz die Konstruktionszeit am Beispiel von Komponenten eines Kompressors deutlich reduzieren. Der Ansatz umfasst dabei das Zusammentragen, die Gliederung und die Verknüpfung relevanter Informationen sowie den Modellierungsprozess mit

⁴⁴³ vgl. Lutz 2012 S. 61

⁴⁴⁴ vgl. Danjou, Lupa & Köhler 2008 S. 625

der Zeichnungserstellung.⁴⁴⁵ Die Eignung möglicher, Feature-basierter Konstruktionen für eine Entscheidungsunterstützung wird dabei nicht thematisiert.

Rechnereinsatz im Kontext der vorliegenden Arbeit

Die Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl auf Grundlage bestehender Referenzprodukte eines unternehmensinternen Baukastens erforderte einerseits die Ableitung gültiger Varianten mit Hilfe von produktspezifischen Regeln. Zudem sollen die Referenzprodukte unter neue Anforderungen und Randbedingungen eingesetzt werden, was eine entsprechende Anpassung der CAD-Modelle bedingt. Da die Referenzprodukte aufgrund wechselseitiger Abhängigkeiten nicht unabhängig voneinander gewählt werden können, lassen sich die Konfigurationsprobleme im Kontext der vorliegenden Arbeit in die CTO-Kategorie einordnen. Zudem werden die Referenzprodukte des Baukastens auftragsspezifisch variiert und konfiguriert, was sich im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS durch Übernahme- und Gestaltvariationsanteile beschreiben lässt.⁴⁴⁶ Demzufolge können die hier behandelten Konfigurationsprobleme der CTO-Unterkategorie der MTO-Probleme zugeordnet werden. Um diese lösen zu können wird, gemäß den vorhergehenden Ausführungen zu Basistechnologien zur Rechnerunterstützung in der Konstruktion, die Konfiguration erforderlich, und zwar in der Ausprägung der CAD-Konfiguration. Dabei gehen die Anforderungen an die CAD-Konfiguration über die schlichte Visualisierung des Konfigurationszustands hinaus. Zur Bewertung der fall-spezifischen Eignung der abgeleiteten Varianten hinsichtlich geometriegebundener, emergenter Bewertungszielgrößen auf Gesamtsystemebene, wird eine bidirektionale Kopplung zwischen CAD-System und einem System zur Entscheidungsunterstützung (EUS) erforderlich, um geeignete, variantenspezifische Kennwerten zu ermitteln. Die PDM-Anbindung spielt hierbei eine entscheidende Rolle zur Beurteilung der abgeleiteten Varianten unter Einbeziehung der Unternehmensexpertise, da diese in den PDM-Datensätzen zu den einzelnen Referenzprodukten beschrieben ist und auf Gesamtsystemebene variantenspezifisch aggregiert werden kann. Zur Bauteilpositionierung und insbesondere für den Zusammenbau von Baugruppenmodellen im Rahmen der CAD-Konfiguration können darüber hinaus effiziente Funktionen aus der Domäne der KBE-Systeme herangezogen werden. Daneben kann aus dem Bereich der Feature-basierten Konstruktion der Einsatz benutzerdefinierter Konstruktionselemente (UDF) Vorteile für die Parametrisierung der Referenzprodukte bieten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für die Variantenauswahl eine Kombination aus einem PDM-System zur Bereitstellung der Wissensbasis, einem

⁴⁴⁵ vgl. Danjou, Lupa & Köhler 2008 S. 627

⁴⁴⁶ vgl. Produktentwicklung aus Sicht der PGE - Produktgenerationsentwicklung auf S. 16 ff.

CAD-Konfigurationssystem mit wechselseitiger Kopplung an das PDM-System sowie einem Entscheidungsunterstützungssystem (EUS)⁴⁴⁷ zur Beurteilung der variantenspezifischen Eignung erforderlich wird.

2.3.3 Ansätze zur Entscheidungsunterstützung

In diesem Unterkapitel steht die Fragestellung im Fokus, welche Systemtypen zur Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden können. Mit Bezug auf die Ausführungen des vorhergehenden Kapitels stehen hierbei Entscheidungsunterstützungssysteme sowie Konfigurationssysteme im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Konfigurationssysteme

Zur Unterstützung der Kaufentscheidung, etwa für eine neuen Küche, ein neues Fahrzeug oder eine Reise, sind **internetbasierte Konfigurationssysteme** im Einsatz. **Küchenplaner** führen in diesem Zusammenhang den Kunden schrittweise zu seiner individuell geplanten Küche. Dabei spielt die Visualisierung des Konfigurationszustands eine entscheidende Rolle. Hierzu wird der kundenseitig zur Verfügung stehende Stellraum berücksichtigt. Über eine CAD-Schnittstelle können dann das gewählte Mobiliar, die Küchengeräte und Dekore dargestellt werden. Die Konfigurationsdaten, beispielsweise in Form von Datenblättern der kombinierbaren Elemente, werden dabei entsprechend der Benutzereingaben durch die Konfigurationslogik verarbeitet, wobei das CAD-System die reine Visualisierung übernimmt. Bei einer Spülmaschine gibt es z.B. die Möglichkeit zwischen einer 60cm und einer 45cm breiten Variante zu wählen. Maschinen unterschiedlicher Breiten unterscheiden sich u.a. hinsichtlich der Wasserverbräuche. Das Konfigurationsergebnis gibt es dann in Form einer Liste, die Informationen über die Beschaffung der Elemente enthält (z.B., Standort im unternehmensinternen Lager, Beschaffung über Sublieferanten, etc.). Wird eine andere Breite oder Effizienzklasse selektiert, dann wird die Maschine durch eine andere, den neuen Anforderungen genügende, Maschine mit korrespondierendem Datenblatt ausgetauscht. Es erfolgt keine Variation des ursprünglich gewählten Referenzproduktes im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung⁴⁴⁸, d.h., es findet keine Beurteilung der ursprünglich gewählten Maschine auf Basis der neuen Anforderungen und Randbedingungen statt.

Dies trifft gleichermaßen auf Konfiguratoren von Automobilherstellern zu. Die meisten Hersteller bieten ihren Kunden **Fahrzeugkonfiguratoren** im Internet an, mit denen sich Kunden selbstständig ihre Fahrzeuge zusammenstellen können. Jedoch kann

⁴⁴⁷ Denkbar ist die Einbindung der Entscheidungsunterstützung als integrierter Bestandteil in das PDM-System. In Kapitel 2.3.3 werden hierzu Entscheidungsunterstützungssysteme thematisiert.

⁴⁴⁸ vgl. Produktentwicklung aus Sicht der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS, S. 16 ff.

die Bestellung in den meisten Fällen nicht über das Internet ausgelöst werden, sondern muss durch einen schriftlichen Kaufvertrag beim Händler getätigt werden.⁴⁴⁹ Das vom Kunden spezifizierte Fahrzeug wird dann Bestandteil des Kaufvertrages und vom Fahrzeughersteller genau nach Kundenanforderung gebaut.⁴⁵⁰ Die damit einhergehende Wartezeit bis zur Fertigstellung des Fahrzeugs sowie der aggregierte Kaufpreis für die konkrete Fahrzeugkonfiguration stellen dabei zentrale Entscheidungsgrundlagen für den Kunden dar. Fahrzeugkonfiguratoren fallen in die Kategorie der CAS-zentrischen Konfiguratoren⁴⁵¹, die darauf abzielen aus bestehenden Komponenten eine oder mehrere Varianten abzuleiten und preislich zu bewerten.

Die zuvor genannten Ausprägungen internetbasierter Produktkonfiguratoren erzeugen typischerweise keine Auswahlliste von in Frage kommenden Produkten, d.h., es wird eine Varianten auf Grundlage der Kundenanforderungen und dem produktspezifische Konfigurationsregelwerkes erzeugt. Aber gerade die vergleichende Bewertung von fallspezifisch möglichen Lösungen trägt nach Auffassung des Autors erheblich zur Entscheidungsunterstützung bei. **Reiseportale** geben in diesem Zusammenhang eine Trefferlist für die Kundenvorgaben (Reisedauer, Reiseziel, Unterbringung, Anzahl der Reisenden, etc.) aus. Eine Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Reisevarianten aus der Trefferliste bieten unter anderem Kennzahlen⁴⁵² zur variantenspezifischen Übereinstimmung mit den Kundenvorgaben, zur Weiterempfehlungsbewertung durch andere Kunden sowie zur Verfügbarkeit der jeweiligen Reise.

Die zuvor aufgeführten Konfigurationssysteme sind primär für die Nutzung durch den Endkunden vorgesehen. Für die Begeisterungssteigerung des Kunden für sein individuell konfiguriertes Produkt spielt dabei die **3D-Visualisierung** eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Bei einem Konfigurator, der hingegen im unternehmensinternen Entwicklungsbereich zur Unterstützung der Variantenentwicklung auf Basis bestehender Referenzprodukte zum Einsatz kommen soll, kommt dem CAD-Einsatz im Konfigurationsprozess eine weitaus höhere Bedeutung zu, da bestehende Referenzprodukte auf deren fallspezifische Eignung überprüft und darüber hinaus an die neuen Anforderungen und Randbedingungen angepasst werden müssen. Andererseits erfordern derartige Konfigurationsprozesse produktspezifisches Expertenwissen. Demzufolge sind unter anderem das Einsatzgebiet und die Zielgruppe entscheidende Kriterien für die Ausprägung des Konfigurators. Im Hinblick auf die Benutzergruppen eine Konfigurators unterscheidet BRINKOP gemäß der folgenden Abbildung 2-31 zwischen Kunden, Vertriebspartner, Vertriebsmitarbeiter, und Innendienstmitarbeiter.

⁴⁴⁹ vgl. Herlyn 2012 S. 116

⁴⁵⁰ vgl. Herlyn 2012 S. 68

⁴⁵¹ CAS steht für (engl.) Computer Aided Selling

⁴⁵² vgl. Kriterien und Kennzahlen auf S. 93 f.

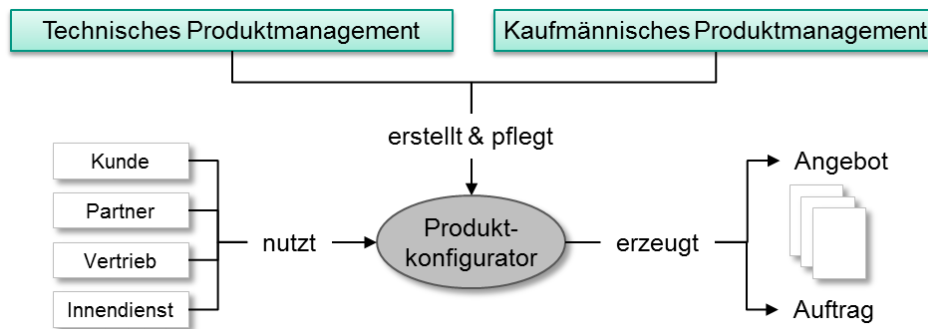


Abbildung 2-31: Rollenverteilung der am Produktkonfigurator beteiligter Personengruppen⁴⁵³

Dabei vertritt BRINKOP die Ansicht, dass die Pflege des Produktkonfigurators auf jeden Fall durch die Fachabteilung, und idealerweise durch das technische und kaufmännische Produktmanagement, erfolgen sollte.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Unterstützung bei der Auswahl von Varianten⁴⁵⁴, die auf Basis bestehender Referenzprodukte für die konkrete Kundenanfrage aus Sicht eines automobilen Zulieferunternehmens abgeleitet werden. Die fallspezifische Variantenentwicklung basiert hierbei auf der unternehmensinternen Expertise. In Anlehnung an die Abbildung 2-31 übernimmt demzufolge die Erstellung und Pflege des Konfigurators der Innendienst, d.h., aus Sicht des fallgebenden Zulieferunternehmens für Motorkomponenten, der Entwicklungsbereich in Abstimmung mit den produzierenden Werken (Prozessentwicklung und Produktkalkulation).

Die Identifikation geeigneter Referenzprodukte und die Anpassung der fallspezifisch relevanten CAD-Konstruktionen an neue Anforderungen und Randbedingungen sowie deren Zusammenbau auf Systemebene erfordern eine enge Kopplung zwischen Konfigurator und CAD-System. Hierzu hat sich die Rubrik der **CAD-Konfiguratoren** etabliert, die nachfolgend vorgestellt wird.

CAD-Konfiguratoren

Anstelle von CAD-Konfiguration ist häufig auch von 3D-Produktkonfiguration oder CAD-zentrischer Konfiguration die Rede. Das Verständnis von CAD-Konfiguratoren ist in der Literatur weitestgehend einheitlich beschrieben. Hiernach wird die CAD-Konfiguration überwiegend erforderlich, wenn komplexe Produkte aus einer Menge an bestehenden Referenzprodukten abzuleiten und zu variieren sind. Dabei kann es sinnvoll sein, neben der Kopplung mit PDM-Systemen auch Schnittstellen von CAD-Konfiguratoren zu ERP-Systemen⁴⁵⁵ und CRM-Systemen⁴⁵⁶ zu nutzen. Dabei kann

⁴⁵³ vgl. Brinkop 2016 S. 5

⁴⁵⁴ vgl. Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE (S. 64 f.)

⁴⁵⁵ Enterprise-Resource-Planning (ERP): Einsatzplanung der Ressourcen im Unternehmen.

⁴⁵⁶ Customer-Relationship-Management (CRM): Verwaltung von Kunden- und Projektinformationen.

zwischen einer uni- und einer bidirektionale CAD-Kopplung unterschieden werden. Eine unidirektionale Kopplung ermöglicht die Visualisierung des Konfigurationszustandes, indem CAD-relevante Informationen aus dem Konfigurationsergebnis extrahiert und an das CAD-System übermittelt werden. Nach BRINKOP wird bei einer bidirektionalen CAD-Kopplung darüber hinaus das CAD-System als Eingabeoberfläche für die Konfiguration verwendet.⁴⁵⁷ Im Rahmen dieser Arbeit beinhaltet die bidirektionale CAD-Kopplung zudem die Übermittlung und damit die Explizierung der in den konfigurierten CAD-Modellen zunächst implizit enthaltene Bewertungszielgrößen, um sie für den Konfigurationsprozess und damit die variantenspezifische Bewertung zur Entscheidungsunterstützung für die Variantenauswahl einsetzen zu können.

Die Einbindung von CAD-Systemen in den Konfigurationsprozess wird in vielen Arbeiten beschrieben. Wie bereits in den vorhergehenden Ausführungen dargelegt, ist dabei die Bedeutung des CAD-Einsatzes für den Konfigurationsprozess sehr unterschiedlich, weshalb für die Kategorie der CAD-Konfiguratoren entsprechende Einteilungskriterien erforderlich werden. In Anlehnung an BRINKOP⁴⁵⁸ müssen nach Auffassung des Autors im Kontext der vorliegenden Arbeit folgende Kriterien gegeben sein:

- Der Konfigurator hilft dem Innendienst (der Konstruktion) bei der Auftragsbearbeitung und unterstützt bei der Produktfindung, der technischen Produktauslegung, der Produktvisualisierung und vor allem bei der Produktkonstruktion und
- eignet sich für Aufgaben, bei denen Produkte konfiguriert werden (CTO).
- Charakterisierung des Konfigurationsansatzes: Regelbasiertes Expertensystem⁴⁵⁹ mit bidirektionaler CAD-Kopplung bei dem das Beziehungswissen primär durch Regeln und Constraints ausgedrückt wird.

Auf dem Markt gibt es eine Vielzahl an Anbietern, die kommerzielle Softwarelösungen für die unterschiedlichsten Konfigurationsprobleme anbieten. BRINKOP führt in seinem „Marktführer Produktkonfiguration“ 31 derartiger Anbieter auf.⁴⁶⁰ Auf Basis der zuvor aufgeführten Kriterien sowie Informationen zu produkt- und unternehmensspezifischen Verwendungen der Konfiguratoren der einzelnen Anbieter in der industriellen Praxis kommen, auf Basis der recherchierten Informationen, fünf Anbieter in

⁴⁵⁷ vgl. Brinkop 2016 S. 8

⁴⁵⁸ vgl. Brinkop 2016 S. 11 ff.

⁴⁵⁹ Erläuterungen zu Expertensystemen auf S. 116 ff.

⁴⁶⁰ vgl. Brinkop 2016 S. 28 f. (1), 36 f. (2), 40 f. (3), 44 f. (4), 72 f. (5) und (1) customX GmbH, <http://www.customx.de>, 13.08.2016, 10:02 Uhr sowie Mensch und Maschine Software SE, <http://www.mum.de>, 13.08.2016, 10:10 Uhr, (2) itelligence AG und ACATEC Software GmbH, <http://itelligencegroup.com/de>, 13.08.2016, 10:21 Uhr, (3) it-motive AG, <http://www.it-motive.de>, 13.08.2016, 10:28 Uhr, (4) Lino GmbH, <http://www.lino.de>, 13.08.2016, 10:40 Uhr sowie (5) Ventacor GmbH – Tacton Joint Venture, <http://www.ventacor.de>, 13.08.2016, 10:49 Uhr und <http://www.tacton.com/de>, 13.08.2016, 10:55 Uhr.

die engere Auswahl, vielversprechende Lösungen für CTO-Konfigurationsprobleme im Kontext der vorliegenden Arbeit zur Verfügung stellen zu können.

Die Entwicklungen kommerzieller Lösungen wurden dabei fortwährend durch Forschungsaktivitäten begleitet. GRASMANN beschäftigt sich in seiner Arbeit mit der Produktkonfiguration auf Basis von EDM-Systemen und stellt eine Methode zum Aufbau und zur Pflege der Wissensbasis von Konfigurationssystemen und deren Einsatz in Verkaufsprozessen vor. Dabei steht das Ziel im Fokus, ein Konfigurationssystem zur Unterstützung der Kunden und des Vertriebs zu erstellen zur Stärkung der Kundenorientierung und Unterstützung des Verkaufsprozesses. Das Expertensystem umfasst dabei (1) eine Interviewkomponente zur Steuerung des Dialoges mit dem Anwender (Kunde bzw. Vertriebsmitarbeiter), (2) eine Problemlösungskomponente, die die Eingaben über die Interviewkomponente auswertet, sowie eine (3) Erklärungskomponente, die die Historie und Begründung für das Konfigurationsergebnis liefert. Die merkmalsbasierte Konfiguration wird hierbei mit Hilfe eines Konfigurationsassistenten visualisiert.⁴⁶¹ Zur Unterstützung des Verkaufsgesprächs kommen dann die Interviewkomponente und der Konfigurationsassistent zum Einsatz.⁴⁶²

FELDHUSEN ET AL. untersuchen eine Data-Mining-Methode⁴⁶³, um aus Sicht der automobilen Zulieferindustrie als Entwicklungsbasis für neue Kundenanfragen aus bestehenden Lösungen geeignete Produktvarianten auswählen zu können. Das Ziel des Forschungsprojektes ist hierbei, sämtliche Anforderungen mit den Produktkomponenten zu verknüpfen und die verfügbaren Produktvarianten hinsichtlich der Erfüllung der neuer Anforderungen miteinander zu vergleichen. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass sowohl die Anzahl als auch die Beschreibungen der Anforderungen nicht variiert werden, was typischerweise bei wiederverwendeten Komponenten der Fall ist. Zur Unterstützung der Auswahl aus bestehenden Produktvarianten wird die Data-Mining-Methode SOM⁴⁶⁴ verwendet, deren Algorithmus numerische Zusammenhänge identifizieren und visualisieren kann.⁴⁶⁵

Daran anknüpfend beschreibt der Ansatz von SCHUBERT ET AL. wie mit Hilfe der parametrischen CAD-Modellierung, der Prozess der Variantenkonstruktion für die zuvor identifizierten Produktvarianten effizienter gestaltet werden kann. Hierzu ist es gängi-

⁴⁶¹ vgl. Grasmann 2000 S. 104 ff.

⁴⁶² vgl. Grasmann 2000 S. 122 f.

⁴⁶³ Unter Data Mining wird sinnbildlich das Graben nach neuem Wissen in einem anscheinend wertlosen Datenberg verstanden. Duden-online beschreibt Data Mining als eine automatische Auswertung großer Datenmengen zur Ermittlung von Regelmäßigkeiten, Gesetzmäßigkeiten und verborgener Zusammenhänge (<http://www.duden.de/suchen/dudenonline/Data%20Mining>, 13.08.16, 13:40 Uhr).

⁴⁶⁴ Self-Organizing Map (SOM)

⁴⁶⁵ vgl. Feldhusen, Nagarajah & Schubert 2010; für weiterführende Informationen zu Data Mining siehe Otte, Otte & Kaiser 2004

ge Konstruktionspraxis, die bestehenden Produkte an die neuen Anforderungen anzupassen. Da viele dieser Referenzprodukte mehrfach in neuen Projekten wiederverwendet werden, werden diese zunehmend komplexer und unstrukturierter, so dass die Wiederverwendung dieser CAD-Modelle zunehmend aufwändiger wird. Durch den Einsatz der parametrischen CAD-Modellierung wird, nach Auffassung von SCHUBERT ET AL., dieser Aufwand reduziert. Die Funktionsstruktur der Produkte sowie die Parameterwerte kommen dabei aus einer FMEA, die mittlerweile durch die Kunden von ihren Zulieferunternehmen gefordert werden.⁴⁶⁶

SCHEER zeigt in seiner Arbeit den Bedarf auf, Produktkonfiguratoren stärker am Kunden zu orientieren, um, bei Präferenzlosigkeit und Sonderwünschen des Kunden während der Produktspezifikation, kundeninitiierte Abbrüche des Konfigurationsprozesses zu vermeiden. Mit seinem erweiterten Produktkonfigurationskonzept verfolgt SCHEER einerseits das Ziel, bei Präferenzlosigkeit dem Kunden Konfigurationsvorschläge als Anhaltspunkte für die Konfigurationsentscheidung anzubieten. Diese Vorschläge umfassen aus Sicht des Anbieters einen oder mehrere geeignete Produktkomponenten, Komponenteneigenschaften und Eigenschaftswerte.⁴⁶⁷ Dieses Ergebnis wird dem Kunden in Form von Optionsentscheidungen zur Verfügung gestellt, die aus Optionsmöglichkeiten und Optionswertvorschlägen bestehen. Zusätzlich wird zur Unterstützung der Entscheidung für eine Option, der angewendete Vorschlagsgenerierungsmechanismus erklärt. Die Kundenentscheidung wird dann für den weiteren Konfigurationsprozess berücksichtigt.⁴⁶⁸ Auf der anderen Seite umfasst das erweiterte Produktkonfigurationskonzept einen Spezifikationsspielraum, in diesem der Kunde seine Sonderwünsche, die zum Zeitpunkt der Konfiguration nicht vorgesehen sind, selbst spezifizieren kann.

RIESNER beschreibt in seiner Arbeit eine Methode zur ähnlichkeitsbasierten Produktkonfiguration, um aus bestehenden Produktvarianten die Kosten-Nutzen-optimale Lösung zu ermitteln. Dabei besteht das übergeordnete Ziel darin, die frühe Phase des Auftragsabwicklungsprozesses von variantenreichen Produkten zu unterstützen.⁴⁶⁹ Sein Detailkonzept zur ähnlichkeitsbasierten Produktkonfiguration sieht dabei vor (1) bestehende Produktaufträge einheitlich und systematisch zu beschreiben, (2) Ähnlichkeiten zwischen Produktaufträgen unter Anwendung der Ähnlichkeitsanalyse und der multidimensionalen Skalierung zu ermitteln und darzustellen, (3) Änderungssensitivitäten der Produktkonfiguration durch entsprechende Kriterien zu bewerten

⁴⁶⁶ vgl. Schubert, Nagarajah & Feldhusen 2011

⁴⁶⁷ vgl. Scheer 2006 S. 120

⁴⁶⁸ vgl. Scheer 2006 S. 129

⁴⁶⁹ vgl. Riesener 2015 S. 5 f.

und damit den Produktkonfigurationsprozess gezielt zu steuern sowie (4) die optimale Produktkonfiguration iterativ zu ermitteln.⁴⁷⁰

Die aufgeführten Werkzeuge und Ansätze zur Produktkonfiguration fokussieren primär auf das fallspezifische Ableiten geeigneter Varianten auf Basis bestehender Referenzprodukte. Weniger im Fokus steht dabei die Fragestellung, wie, gerade bei einer Menge an gültigen Varianten, die Entscheidung konkret unterstützt werden kann. Für die Aufbereitung entscheidungsrelevanter Grundlagen hat sich der Bereich der Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) etabliert.

Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS)

Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) zählen nach WERNER zur Klasse der Managementinformationssysteme (MIS), die der Beschaffung und Bereitstellung entscheidungsrelevanter Informationen (z.B. aggregierte oder gefilterte Daten, Berichte und Analysen) dienen. MIS fokussieren demnach auf der Informationsversorgung und erfüllen damit im Wesentlichen Berichts- und Auskunftsfunktionen. Durch die Verwendung von Methoden und Modellen unterstützen EUS gegenüber MIS zusätzlich den Planungs- und Entscheidungsprozess und ermöglichen eine computerbasierte Weiterverarbeitung der bereitgestellten Informationen.⁴⁷¹ Die Zielgruppe von MIS sind dabei betriebliche Entscheidungsträger vom unteren Management bis zum Top-Management.⁴⁷² EUS können hingegen auf allen Unternehmensebenen und allen Tätigkeitsbereichen (operativer, taktischer, strategischer Bereich) eingesetzt werden.⁴⁷³ Für MECHLER sind hingegen rechnergestützte EUS allgemein Softwaresysteme, die einen Entscheidungsträger während des Entscheidungsprozesses wirkungsvoll unterstützen.⁴⁷⁴ Anknüpfend an WERNER präzisiert JAHRKE, dass EUS betriebliche Informationssysteme sind, die Entscheidungsträger gerade in unstrukturierten oder teilstrukturierten Entscheidungssituationen unterstützen.⁴⁷⁵ Im Wirtschaftslexikon von GABLER wird der Begriff des Entscheidungsunterstützungssystems definiert als ein computergestütztes Planungs- und Informationssystem (computergestütztes Planungssystem, Führungsinformationssystem (FIS)), das die Entscheidungsvorbereitung auf den Führungsebenen unterstützt, indem entscheidungsrelevante Informationen verdichtet und geeignet dargestellt werden (z.B. in Tabellen oder Grafiken). Dabei finden EUS vor allem bei schlecht strukturierbaren Problemen eines betrieblichen Funktionskreises (z.B. Werbebudgetplanung, Cashflow-Planung) Anwendung

⁴⁷⁰ vgl. Riesener 2015 S. 194 f.

⁴⁷¹ vgl. Werner 1992 S. 32 f.

⁴⁷² vgl. Werner 1992 S. 35 f.

⁴⁷³ vgl. Werner 1992 S. 53

⁴⁷⁴ vgl. Mechler 1994 S. 1

⁴⁷⁵ vgl. Jahrke 1987; nach Mechler 1994 S. 10

und kennzeichnen sich dabei durch eine leichte Handhabbarkeit sowie durch die einfache Durchführung von Alternativrechnungen und Simulationen und sind zudem in der Lage Modellvarianten und Modelländerungen zu berücksichtigen. Hilfsmittel sind hierbei u.a. einfache Datenbanken und der Zugriff auf umfassende externe Datenbanken und Planungssprachen.⁴⁷⁶

WERNER weist auf vier unterschiedliche Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) hin. (1) Konventionelle EUS sind quantitativ orientiert, während (2) wissensbasierte EUS auch auf Methoden aufbauen, die qualitative Aspekte von Problemstellungen berücksichtigen können. Daneben unterstützen (3) institutionalisierte EUS bei Entscheidungen, die eine enge inhaltliche Verwandtschaft aufweisen und in regelmäßigen Intervallen wiederholt werden, wohingegen bei Problemstellungen, die für einen bestimmten Anwendungskontext eher einmalig und mit nicht vorherbestimmbarem Charakter auftreten, (4) Ad-hoc-EUS eingesetzt werden. Eine Datenkomponente, eine Modell- und Methodenkomponente sowie eine Komponente zur Ablauf- und Dialogsteuerung sind dabei entsprechend Abbildung 2-32 die EUS-Kernbestandteile. Darüber hinaus können auch mit diesen Komponenten in Verbindung stehende interne und externe Datenquellen sowie andere, computerbasierte Informationssysteme als Elemente eines EUS bezeichnet werden.

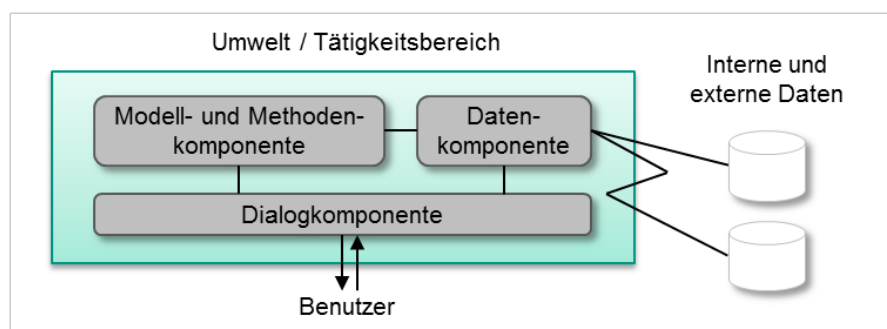


Abbildung 2-32: Grundstruktur eines Entscheidungsunterstützungssystem (EUS)⁴⁷⁷

Die Datenkomponente bildet dabei das zentrale Element eines EUS, da Daten die potentiellen Informationen und daher die Grundlage jedes Entscheidungs- und Problemlösungsprozesses sind. Die Modell- und Methodenkomponente ist, wie bereits erwähnt, EUS-charakteristisch und stellt Entscheidungshilfen in Form von Methoden und Modelle zur Verfügung. Dabei erfolgt die Nutzung von Daten, Modellen und Methoden durch den Anwender mit Hilfe der Dialogkomponente. Die Qualität und Leis-

⁴⁷⁶ Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Decision Support System (DSS), online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/75090/decision-support-system-dss-v9.html>, 06.09.2016, 12:35 Uhr. Vgl. auch Brich, Winter & Achleitner 2014, Gabler-Wirtschaftslexikon Band 2 C-F: Entscheidungsunterstützungssystem.

⁴⁷⁷ vgl. Werner 1992 S. 46

tungsfähigkeit des EUS hängt hierbei nach WERNER maßgeblich von der Mensch-Maschine-Interaktion und damit von der Gestaltung der Dialogkomponente ab.⁴⁷⁸

In die Weiterentwicklung der Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) sind zunehmend Forschungsergebnisse aus der Entwicklung von Expertensystemen (ES) eingeflossen, die einen Teilbereich auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) darstellen. Der Begriff „Expertensystem“ leitet sich dabei aus dem Bestreben ab, problemlösungsspezifisches Wissen von Experten zu erfassen und zu formalisieren, um dieses Expertenwissen für nachfolgende Problemstellungen zu nutzen. Demzufolge werden in der Literatur Expertensysteme auch als „Wissensbasierte Systeme (WBS)“ bezeichnet.⁴⁷⁹ Der WBS-Einsatz verfolgt demnach die Zielsetzung menschliche Problemlösungsfähigkeiten zu simulieren, wobei nicht der Lösungsprozess, sondern vielmehr das Ergebnis des Prozesses nachgebildet wird. Hiermit lässt sich personengebundenen Expertenwissen vervielfältigen, indem es von vielen Menschen genutzt werden kann. EUS verfolgen hingegen das übergeordnete Ziel die Problemlösungsfähigkeit zu unterstützen und damit die Entscheidungsgüte der Nutzer zu verbessern. Nach WERNER haben in diesem Kontext WBS darüber hinaus auch immer eine Unterstützungsfunktion.⁴⁸⁰ Die aus der Erweiterung von Entscheidungsunterstützungssystemen um WBS-Komponenten resultierenden wissensbasierten EUS eignen sich nach MERTENS ET AL. im betriebswirtschaftlichen Bereich besonders gut zur Bearbeitung von Aufgaben aus den Bereichen der Diagnose, Beratung, Konfiguration und Planung.⁴⁸¹ In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Einbindung einer Wissensbasis für das Ableiten und Bewerten fallspezifisch geeigneter Varianten im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Variantenauswahl von zentraler Bedeutung.

In der Literatur wird für die Kombination wissensbasierter EUS mit Führungsinformationssystemen (FIS/EIS) der Begriff „Executive Support Systeme (ESS)“ verwendet, der durch ROCKART & DELONG geprägt wurde. ESS werden dabei oftmals mit EIS gleichgesetzt, wobei es bei der Unterstützung mittels ESS über die reine Informationsbereitstellung und Informationsmanipulation von EIS hinausgeht.⁴⁸² Nach GLUCHOWSKI ET AL. sind ESS arbeitsplatzbezogene Kombinationen aus problemlösungsorientierten EUS-Funktionalitäten und präsentations- und kommunikationsorientierten EIS-Funktionalitäten, die an Anwendertypen und Problemspektren ausgerichtet sind. Unter Umständen werden neben konventionellen EUS auch wissensbasierte EUS einbezogen. ESS streben damit eine ganzheitliche, phasen- und problemübergrei-

⁴⁷⁸ vgl. Werner 1992 S. 47 ff.

⁴⁷⁹ vgl. Werner 1992 S. 144

⁴⁸⁰ vgl. Werner 1992 S. 156 f.

⁴⁸¹ vgl. Mertens, Borkowski & Geis 1990 S. 325 nach Werner 1992 S. 180 f.

⁴⁸² vgl. Rockart & DeLong 1988 nach vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 82

fende Unterstützung des Management-Arbeitsplatzes an, indem auf der einen Seite Visualisierungs- und Präsentationsformen von EIS zur Aufdeckung grundlegender Zusammenhänge genutzt werden und auf der anderen Seite betriebswirtschaftliche Kausalmodelle und Methoden zur Analyse, Prognose, Simulation und Optimierung im Kontext einer EUS-Unterstützung eingesetzt werden. Konventionellen Möglichkeiten der EUS sind hierbei um wissensbasierte Ansätze zu erweitern.⁴⁸³

Management Support Systeme (MSS)

Die in den vorhergehenden Ausführungen genannten Informations- und Unterstützungssysteme lassen sich unter dem in der Wissenschaft etablierten Oberbegriff der „Management Support Systeme (MSS)“ zusammenfassen.⁴⁸⁴ Dabei bilden Executive Support Systeme (ESS), als Bindeglied zwischen Entscheidungsunterstützungssystemen (EUS/DSS) und Führungsinformationssystemen (FIS/EIS), den wichtigsten Bestandteil von MSS.⁴⁸⁵ Der besseren Übersichtlichkeit wegen stellt Abbildung 2-33 in Anlehnung an GLUCHOWSKI ET AL. und WERNER die im Rahmen der vorhergehenden Ausführungen aufgeführten Informations- und Unterstützungssysteme in einem Gesamtzusammenhang dar.

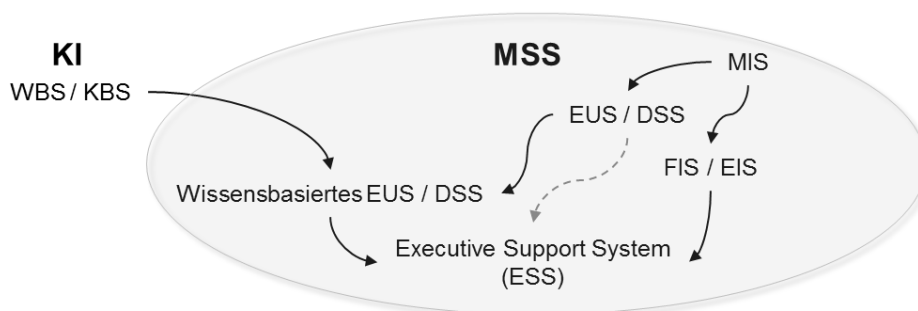


Abbildung 2-33: Entstehungszusammenhang von Management Support Systemen (MSS) mit Einflussnahme wissensbasierter Systeme aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI)⁴⁸⁶

Managementinformationssysteme (MIS) fokussieren rein auf der Datenzusammenstellung und bieten keine ordnende Problemstrukturierungshilfen (Modelle) und keine algorithmische Problemlösungsverfahren (Methoden) an. MIS dienen demzufolge der Beschaffung und Bereitstellung entscheidungsrelevanter Informationen (Datenfokus). Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) unterstützen Entscheidungsträger darüber hinaus mit Modellen, Methoden und problembezogenen Daten (Modellfokus). EUS gehen damit über die reine Aufbereitung, entscheidungsrelevanter Daten hinaus. Führungsinformationssysteme (FIS) können als Weiterentwicklung von MIS ver-

⁴⁸³ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 82 f.

⁴⁸⁴ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 89

⁴⁸⁵ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 87 f.

⁴⁸⁶ Eigene Darstellung in Anlehnung an Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 und Werner 1992

standen werden, und stellen dialog- und datenorientierte Informationssysteme für das Management dar (Präsentationsfokus). Executive Support Systeme (ESS) vereinen die Visualisierungs- und Präsentationsformen der FIS mit den konventionellen EUS oder wissensbasierten EUS. Letztere verwenden zur Entscheidungsunterstützung zusätzliche Elemente wissensbasierter Systeme (WBS), die auf die Problemlösung fokussieren und darauf, wie vorhandenes Expertenwissen in einer Wissensbasis formalisiert und für folgende Problemstellungen eingesetzt werden kann.⁴⁸⁷

Business Intelligence (BI)

Analyseorientierte Anwendungen orientieren sich seit Ende der 90er-Jahre zunehmend nicht mehr ausschließlich auf die Nutzung durch das Management. In der Praxis etablierte sich in diesem Kontext der Begriff „Business Intelligence“, der zusehends auch in die wissenschaftliche Diskussion als feststehende Begrifflichkeit Einzug hielt. Das Grundverständnis besteht dabei darin, dass die Techniken und Anwendungen des Business Intelligence entscheidungsunterstützenden Charakter haben und insbesondere der besseren Einsicht in das eigene Geschäft durch das Verständnis der Mechanismen relevanter Wirkungsketten dienen.⁴⁸⁸ Business Intelligence kann dabei allgemein als Sammelbegriff für den IT-gestützten Zugriff auf Informationen, sowie die IT-gestützte Analyse und Aufbereitung dieser Informationen verstanden werden. Ziel dieses Prozesses ist es, aus dem im Unternehmen vorhandenen Wissen, neues Wissen zu generieren. Bei diesem neu gewonnenen Wissen soll es sich um relevantes, handlungsorientiertes Wissen handeln, welches Managemententscheidungen zur Steuerung des Unternehmens unterstützt.⁴⁸⁹ Aus analyseorientierter Sicht umfasst Business Intelligence hingegen vor allem den Einsatz modell- und methodenbasierter Komponenten, die eine zielgerichtete Analyse von vorhandenem Datenmaterial ermöglichen. Hierzu eingesetzte BI-Werkzeuge sind aus dem Bereich des „Online Analytical Processing (OLAP)“ und insbesondere aus dem Bereich des „Data Mining“.

Daran anknüpfend verwies bereits zu Beginn dieses Kapitels die EUS-Definition nach JAHRKE auf die Eignung von EUS zur Anwendung bei unstrukturierten oder teilstrukturierten Entscheidungssituationen. Im GABLER-WIRTSCHAFTSLEXIKON wird darüber hinaus betont, dass EUS vor allem bei schlecht strukturierbaren Problemen Anwendung finden. In der Literatur werden zur Lösung derartiger Entscheidungsprobleme unter anderem EUS beschrieben, um zusammenhangslos erscheinende Daten mit

⁴⁸⁷ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008; Werner 1992

⁴⁸⁸ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 89

⁴⁸⁹ Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Business Intelligence, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/75968/business-intelligence-v10.html>, 06.09.2016, 12:50 Uhr.

Hilfe von Technologien und Verfahren des Data Mining (Datenmustererkennung)⁴⁹⁰, wie z.B. Clusterverfahren, Visualisierungstechniken, Entscheidungsbaumverfahren, Assoziationsanalysen und künstlich, neuronale Netze, zu analysieren. Im GABLER-WIRTSCHAFTSLEXIKON wird in diesem Kontext Data Mining definiert als die Anwendung von Methoden und Algorithmen zur möglichst automatischen Extraktion empirischer Zusammenhänge zwischen Planungsobjekten, deren Daten in einer hierfür aufgebauten Datenbasis bereitgestellt werden.⁴⁹¹

Data Mining und Online Analytical Processing (OLAP) zählen zudem nach GLUCHOWSKI ET AL. zu den prominentesten Konzepten im Bereich der Analyse entscheidungsrelevanter Daten.⁴⁹² Klassenbildungen, ein Verfahren des Data Mining, finden z.B. im Bereich der Marktsegmentierung Anwendung, bei der die Kunden in Gruppen eingeteilt werden, um kundengruppenspezifische Marketingaktionen durchführen zu können. Ferner wird Data Mining bei Warenkorbanalysen dazu eingesetzt, dem Handel wertvolle Erkenntnisse für die Angebotsstruktur und Regalgestaltung zu liefern. Darüber hinaus bietet vor allem der Marketing-Sektor ein interessantes und breites Betätigungsfeld für Data Mining-Systeme. Dieser Anwendungsbereich beinhaltet u.a. Aufgabenstellungen wie Kundenbestandssicherung, Markt-/Kanal-/Preisanalysen, Kampagnenmanagement und die erwähnte Kundensegmentierung.⁴⁹³ OLAP kann, gemäß der Definition des GABLER-WIRTSCHAFTSLEXIKON, als ein Konzept für die im Dialogbetrieb realisierte Verdichtung und Darstellung von managementrelevanten Daten aus einem Data Warehouse⁴⁹⁴ angesehen werden. Bei den Daten handelt es sich um Faktendaten, wie z.B. Umsatz- oder Kostenkennzahlen, denen eine Vielzahl von Dimensionsmerkmalen zugeordnet sind, wie z.B. Merkmale von Regionen, Produkten oder Zeiträumen, für die die Kennzahlen angefallen sind. Diese Dimensionen sind in Hierarchien angeordnet, d.h., es gibt über- und untergeordnete Regionen, Produktgruppen und Zeiträume. OLAP-Software unterstützt vor allem die Aggregation von Kennzahlen über bestimmte Dimensionen und Hierarchieebenen sowie die grafische Darstellung der Kennzahlen.⁴⁹⁵ Das „Data Warehouse“ ist hierbei eine von den operativen Datenverarbeitungssystemen separierte Datenbank, auf die nur Leszugriff besteht. In regelmäßigen Abständen werden aus den operativen DV-Systemen unternehmensspezifische, historische und daher unveränderliche Daten

⁴⁹⁰ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 195 ff.

⁴⁹¹ Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Data Mining, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57691/data-mining-v8.html>, 06.09.2016, 12:30 Uhr

⁴⁹² vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. VI

⁴⁹³ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 194

⁴⁹⁴ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 117 ff.

⁴⁹⁵ Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Online Analytical Processing (OLAP), online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/75659/online-analytical-processing-v8.html>, 06.09.2016, 12:40 Uhr.

zusammengetragen, vereinheitlicht, nach Nutzungszusammenhängen geordnet, verdichtet und dauerhaft in der Datenbasis des Data Warehouse archiviert. Ziel ist die Verbesserung der unternehmensinternen Informationsversorgung (Wissensmanagement) und damit die Unterstützung strategischer Entscheidungen. Als analytisches System liefert es Informationen zur Problemanalyse (OLAP), die durch die Anwendung von Methoden (z.B. des Data Mining) generiert werden.⁴⁹⁶

2.3.4 Zwischenfazit

Mit Bezug auf den in der Einleitung skizzierten Fokus dieser Arbeit wird das übergeordnete Ziel verfolgt, eine Methode zu entwickeln, die Konstrukteure beim Ableiten, Bewerten und Auswählen von Varianten auf Grundlage bestehender Referenzprodukte unterstützt. Die Methode ist dabei zur rein entwicklungsinternen Anwendung im Rahmen der auftragsbezogenen Konzeptentwicklung in der Angebotsphase vorgesehen.⁴⁹⁷ Zum Ableiten kunden- und anbietergerechter Varianten werden in der Literatur Ansätze und Methoden zur Konfiguration beschrieben. Viele dieser Ansätze und Methoden sind, in Abgrenzung zu der in dieser Arbeit avisierten, entwicklungsinternen Anwenderzielgruppe⁴⁹⁸, für Mitarbeiter aus dem Vertrieb und direkt für den Endkunden konzipiert, um die unternehmensinterne Variantenvielfalt zu reduzieren. LUTZ verweist hierzu in seiner Arbeit darauf, dass durch die in der Wissensbasis des Configurators enthaltenen Konfigurationsregeln von Produktspezialisten es Vertriebsmitarbeiter ermöglicht wird, ein detailliertes, kundenindividuelles und technisch machbares Produktangebot ohne zeitaufwändige Rückfragen in der Konstruktion erstellen zu können. Darüber hinaus werden CAD-Konfiguratoren⁴⁹⁹ vorzugsweise durch technische Vertriebsmitarbeiter genutzt, die einen Zugriff als auch ein Basisverständnis für CAD-Systeme haben.⁵⁰⁰ BRINKOP beschreibt im Zusammenhang mit seinem Verfahren zur rechnergestützten Problemlösung von Konfigurationsproblemen im Rahmen der Variantenkonstruktion in der Angebotsphase, dass dabei der Vertriebsingenieur die maßgeblichen Konstruktionsentscheidungen trifft.⁵⁰¹ Des Weiteren sind auch sehr viele Konfigurationssysteme verfügbar, die auch technisch weniger interessierte Endkunden dabei unterstützen, ihr Produkt nach ihren Vorstellungen selbstständig zu konfigurieren. Hierzu beschreibt SCHEER in seiner Arbeit Mög-

⁴⁹⁶ Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Data Warehouse, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/56463/data-warehouse-v11.html>, 06.09.2016, 12:20 Uhr.

⁴⁹⁷ vgl. Kapitel 1.1, S. 6 ff.

⁴⁹⁸ vgl. Anspruchsgruppe und Anwendungskontext der Ziele auf S. 8 f.

⁴⁹⁹ vgl. CAD-Konfiguratoren auf S. 112 ff.

⁵⁰⁰ vgl. Lutz 2012 S. 58 f.

⁵⁰¹ vgl. Brinkop 1999 S. 2

lichkeiten der elektronischen Produktberatungen, die sich an den Vorkenntnissen der Kunden orientieren.⁵⁰² Dem ist im Kontext des fallgebenden Unternehmens entgegenzuhalten, dass eine Konfiguration vor Ort beim Kunden aufgrund der Komplexität der Produkte und der Herstellprozesse keine praxistaugliche Option darstellt. Ebenso verhält es sich mit der selbstständigen Konfiguration der Produkte durch den Kunden. Trotz des in den Konfigurationsprozess eingebrachten, produktspezifischen Expertenwissens wird das Ergebnis aus dem Konfigurationsprozess niemals ein fertig ausdetailliertes und preislich bewertetes Produkt sein. Der Versuch sämtliches Detailwissen in die Konfiguration einzubringen würde die Komplexität des Regelwerkes massiv in die Höhe treiben und entsprechend hohe Aufwände hinsichtlich der Anpassung, Erweiterung, Wartung und Pflege des Konfigurationswissens mit sich bringen. Zudem würde eine CAD-Kopplung unverhältnismäßig aufwändiger und wäre damit nicht mehr zielführend einzusetzen. Zielführender ist es vielmehr den Detaillierungsgrad derart zu wählen, dass eine fundierte Entscheidungsunterstützung möglich ist. Die Variantenauswahl muss dabei immer dem Konstrukteur mit seinem produktspezifischen Expertenwissen in enger Abstimmung mit dem Entwicklungsteam obliegen. Die konstruktive Ausdetaillierung beschränkt sich hiernach auf die gewählten Varianten.

Ein grundlegendes Ziel der Konfiguration ist es, die Auswahl von konfigurierbaren Produkten zu unterstützen. Vielfach werden hierzu Konfigurationsprozesse beschrieben, mit denen die angedachten Benutzergruppen Produkte gemäß ihren Anforderungen konfigurieren und wählen können. Ein Auswählen im klassischen Sinne ist aber erst dann möglich, wenn eine oder mehrere, mögliche Lösungen zur Auswahl stehen. Durch eine vergleichende Betrachtung wird hiermit die Entscheidung für die Wahl einer oder auch mehrerer Varianten zusätzlich abgesichert. Für eine fundierte Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl muss demnach stärker die vergleichende Betrachtung mehrerer in Frage kommender Varianten berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang fokussieren jedoch verfügbare Ansätze und Methoden zur Konfiguration primär auf die Generierung fallgerechter Konfigurationsergebnisse und weniger darauf wie Ergebnisse aus der Konfiguration die Entscheidung konkret unterstützen können. Daran anknüpfend sind Anforderungen, die sich auf emergente, geometriegebundene Bewertungszielgrößen beziehen (Masse, Herstellkosten, etc.), im Konfigurationsprozess zur Ableitung gültiger Varianten zu berücksichtigen. Diese Größen können aber erst durch Rückkopplung im Konfigurationsprozess explizit verarbeitet werden. Hierzu muss der Variantenauswahlprozess stärker am Verständnis der bidirektionalen Abhängigkeit von Zielen und Objekten ausgerichtet werden. Für die im Rahmen der Operationalisierung der Methode erforderliche

⁵⁰² vgl. Scheer 2006 S. 108 ff.

Ermittlung emergenter Bewertungszielgrößen spielt die Kopplung zwischen Konfiguration und CAD-System eine entscheidende Rolle. Aus den Methoden und Ansätzen in der Literatur sowie den Beschreibungen zu kommerziellen Softwaretools zur CAD-Konfiguration geht hervor, dass der CAD-Einsatz vorwiegend zu Visualisierungszwecken verwendet wird. Zur Abbildung der zuvor beschriebenen, expliziten Rekursion muss der CAD-Einsatz über die reine Visualisierung hinausgehen.

Die CAD-Konfiguration oder auch die CAD-zentrische Konfiguration ist seit Ende 2005 durch ein gewährtes Patent des Europäischen Patentamtes geschützt.⁵⁰³ Das Patent beschreibt hierbei ein Verfahren zur rechnergestützten Konfiguration eines Produkts mit Hilfe eines Konfigurationsprogramms. Dieses ermöglicht die Auswahl und Eingabe von Dimensionierungs- und Arbeitsparametern und schlägt darauf basierend automatisch die für das gewählte Systemkonzept relevanten Einzelkomponenten aus einer vorhandenen Datenbank vor und konfiguriert diese zu Produkten. Die Produkte und Produktkombinationen inklusive der erforderlichen Variationen an Einzelkomponenten werden zur Laufzeit durch ein CAD-System visualisiert. Für die in dieser Arbeit vorgestellte Methode ist von zentraler Bedeutung, dass sich (1) Ziele und Objekte wechselseitig aufeinander auswirken und sich (2) Bewertungszielgrößen nicht auf Komponentenebene bestimmen lassen, sondern erst im Rahmen einer gültigen Kombination auf Systemebene emergieren. Die hierfür nötige Rekursion durch eine iterative Prozessgestaltung wird im Patent nicht beschrieben. Ferner wird die (3) Variantenauswahl aus einer Menge an gültigen Varianten nicht thematisiert, indem u.a. emergente Bewertungszielgrößen im Konfigurationsprozess zur variantenspezifischen Bewertung als Entscheidungsgrundlage genutzt werden.

Naheliegender ist der Einsatz von Entscheidungsunterstützungssystemen (EUS), um bei Entscheidungsproblemen entsprechende Hilfestellung zu erhalten. EUS sind gemäß der Definition von GLUCHOWSKI ET AL. interaktive, EDV-gestützte Systeme, die Manager (Entscheidungsträger) mit Modellen, Methoden und problembezogenen Daten in ihrem Entscheidungsprozess unterstützen.⁵⁰⁴ Derartige Lösungen zur Unterstützung betrieblicher Fach- und Führungskräfte sind bereits seit mehr als drei Jahrzehnten fest im Architekturportfolio der Unternehmen verankert und können unter dem vor allem in der wissenschaftlichen Diskussion noch immer sehr gebräuchlichen Oberbegriff der Management Support Systeme (MSS) zusammengefasst werden.⁵⁰⁵ Informations- und Unterstützungssysteme dieser Kategorie sind primär managementorientiert und werden bevorzugt zur Unterstützung von Entscheidungsproblemen bei schlecht sowie nicht strukturierbaren Daten eingesetzt. Im Kontext des

⁵⁰³ vgl. Machau, Zhou & Lang 2005

⁵⁰⁴ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 63

⁵⁰⁵ vgl. Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008 S. 89

fallgebenden Unternehmens dieser Arbeit liegt ein Konfigurations- und damit Entscheidungsproblem der Kategorie CTO vor. Die für die Lösung dieses Problems relevanten Informationen sind strukturierte Daten die auf objektiven Fakten beruhen, wobei erst durch die Vernetzung von Informationen Wissen entsteht, um vergleichen, verknüpfen und entscheiden zu können.⁵⁰⁶

Entsprechend der vorhergehenden Ausführungen bedarf eine Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl demnach eine Kombination aus PDM-System zur Bereitstellung der Wissensbasis, einem CAD-Konfigurationssystem mit wechselseitiger Kopplung an das PDM-System sowie einem wissensbasierten EUS zur Beurteilung der variantenspezifischen Eignung. Zudem kann die CAD-Konstruktion und CAD-Konfiguration um effiziente Funktionen aus den Bereichen der Feature-basierten und wissensbasierten Konstruktion bereichert werden. Hierfür wird der Begriff Variantenentscheidungsunterstützungssystem bzw. Variant Decision Support System (VDSS) verwendet.⁵⁰⁷

⁵⁰⁶ vgl. Fußnote 399 in Kapitel 2.3.2 auf S. 96

⁵⁰⁷ vgl. Albers, Walch & Bursac 2016; Walch & Albers 2014; Albers, Walch & Lohmeyer 2012

3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Wie in der Einleitung dieser Arbeit beschrieben bedarf es aus Sicht der automobilen Zulieferindustrie aufgrund steigender Produktkomplexitäten und der zunehmenden Forderung nach kundenindividuellen Lösungen einer Effizienzsteigerung hinsichtlich der Konstruktionsleistungen, die in der Angebotsphase aufgewendet werden, um fristgerecht kunden- und anbietersgerechte Lösungen anbieten zu können. Dabei muss für die überwiegende Anzahl der Kundenanfragen auf abgeleitete Varianten zurückgegriffen werden, die auf Basis bestehender Komponenten und Baugruppen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten aufgebaut werden. Zunächst müssen hierzu die grundsätzlich in Frage kommenden Produktlösungen identifiziert und auf deren Eignung für die konkrete Kundenanfrage analysiert werden. Darüber hinaus müssen Komponenten- und Bauteilkompatibilitäten im Kontext der produktspezifischen Randbedingungen und Abhängigkeiten berücksichtigt werden, um gültige Varianten auf Systemebene ableiten zu können.

Neben den Produkteigenschaften hinsichtlich geforderten Funktionen und Bauteilverwendungen (PKW, NFZ, reibleistungsreduzierte Variante, Standardvariante, etc.) müssen auch die geometrischen Gegebenheiten und damit die produkt- und funktionsbestimmenden Parameter realisiert werden. Dazu sind zum Teil Variationen an den verwendeten Komponenten gegenüber den Referenzprodukten nötig. Dabei können auch Systeme und Teilsysteme eingesetzt werden, die lediglich in geringem Umfang variiert werden müssen oder sogar unverändert für die neue Kundenanfrage verwendet werden können. Die Information über die Variationsanteile der gültigen Varianten für die konkrete Kundenanfrage kann nutzenstiftend für die Entscheidungsunterstützung in der Angebotsphase eingesetzt werden. Auf Basis der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS können diese Variationsanteile beschrieben und auf System- und Subsystemebene berechnet werden.

Die grundsätzliche Herausforderung bei der Variantenauswahl auf Basis einer entsprechenden Entscheidungsunterstützung liegt darin, dass sich die für die Bewertung relevanten Zielgrößen (Masse, Bauteilsteifigkeiten, Kosten, etc.) nicht auf Subsystemebene sondern erst im Rahmen einer gültigen, abgeleiteten Variante auf Gesamtsystemebene ergeben. Da zum Zeitpunkt der Bewertung diese Werte in der Regel nicht vorliegen, muss in kurzer Zeit viel Konstruktionsleistung aufgebracht werden, um alle in Frage kommenden Varianten zu konstruieren. Dabei werden häufig Varianten generiert, die nach hinreichender Ausdetaillierung auf Basis variantenspezifischer Bewertungszielgrößen als nicht zielführend für das vorliegende Angebot bewertet werden. Für das anbietende Unternehmen ist es in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung, ihren Kunden auf deren Anfragen in kurzer Zeit fundierte Angebote zur Verfügung zu stellen, um konkurrenzfähig am Markt zu sein.

Hierzu muss eine frühzeitige Konkretisierung des Zielsystems zur Schärfung des Lösungsraums ermöglicht werden, um auf die relevanten Varianten zu fokussieren. Darüber hinaus müssen unternehmensintern und kundenseitig erforderliche Änderungen effizient berücksichtigt und nachvollziehbar dokumentiert werden. Aus Sicht der Praxis ist der Einsatz einer methodischen Entscheidungsunterstützung in der Angebotsphase dadurch motiviert, durch eine schnellstmögliche Fokussierung der Entwicklungsaktivitäten auf die aussichtsreichsten Varianten die geforderten Zeitvorgaben des Kunden einhalten zu können und Entwicklungskosten durch die Reduktion nicht zielführender Konstruktionsaktivitäten einzusparen.

Für den Umgang mit der Variantenvielfalt sind Ansätze verfügbar, die bei der bedarfsorientierten Variantengenerierung unterstützen und damit die innere Variantenvielfalt reduzieren, um Lagerkapazitäten einzusparen. Demnach wird für die konkrete Kundenanfrage die Variante, unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen und der bedingten Kompatibilitäten der verfügbaren Elemente, zusammengestellt. Vielmehr bedarf es jedoch einer Methode, die die Auswahl aus einer Menge an gültigen, abgeleiteten Varianten unterstützt, um fundiert auf die zielführenden kunden- und anbietergerechten Varianten zu fokussieren und damit Entwicklungskosten und Zeit einzusparen. Um die nötigen Grundlagen für eine methodische Unterstützung zu schaffen, muss zunächst aus Sicht der industriellen Konstruktionspraxis geklärt werden, ob es bei der Variantenentwicklung in der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt, und ob dadurch der Bedarf der Effizienzsteigerung durch die Reduktion der Konstruktionsumfänge, die zur Ermittlung der kunden- und anbietergerechten Varianten nötig sind, begründet wird. Die daraus resultierenden Ergebnisse bilden die Berechtigungsgrundlage für alle nachfolgenden Untersuchungen und sind demnach von grundlegender Bedeutung für die vorliegende Arbeit.

Ziel 1

Ermittlung der Problem- und Bedarfssituation bei der Variantenentwicklung im Rahmen der Angebotsphase aus Sicht der realen Konstruktionspraxis in Unternehmen.

Aus Sicht der Wissenschaft ist es von großem Interesse, die in der Industrie erkannten Bedarfe mit wissenschaftlichen Lösungsansätzen zu beschreiben. Zur Befriedigung der Bedarfe werden Produktentstehungsmodelle erforderlich, die die Aktivitäten in der Angebotsphase inklusive deren Wechselwirkungen abbilden können. Aufgrund der Herausforderung, dass für ein Angebot Informationen aus späteren Phasen erforderlich sind, eignen sich sequentielle Prozessmodelle nicht zur Bearbeitung der Fragestellung, wie Informationen ermittelt werden können, die zu Beginn der Ange-

botsphase noch nicht vorliegen. Die in Frage kommenden Prozessmodelle müssen demnach einen iterativen Charakter haben und zusätzlich auch die wechselseitigen Auswirkungen der Ziele auf die Objekte beschreiben können. Hierzu wird das erweiterte ZHO-Modell eingesetzt.

Die Entscheidung für eine geeignete Variante basiert für die konkrete Kundenanfrage auf der Auswahl aus einer Menge an gültigen, abgeleiteten Varianten. Hierzu müssen zunächst die in Frage kommenden Varianten ermittelt und hiernach für die finale Variantenauswahl bewertet werden. Dabei ist bei der Bewertung abgeleiteter Varianten die Berücksichtigung der emergenter Bewertungszielgrößen entscheidend für die Ermittlung variantenspezifischer Kennwerte zur fundierten Entscheidungsunterstützung. Klassische Konfiguratoren, wie sie z.B. von Automobilherstellern für deren Endkunden zur Verfügung gestellt werden, basieren auf einer bedingten Selektion von Ausstattungspaketen und Dienstleistungen. Hierzu sind die kombinierbaren Elemente in dem Zustand verfügbar, in dem sie verbaut werden, d.h., die Elemente werden abhängig von der Kompatibilität und dem derzeitigen Konfigurationsstand in das Gesamtsystem aufgenommen. Gibt es hierbei Konflikte aufgrund der Schnittstellengeometrie der Bauteile oder aufgrund von funktionalen Inkompatibilitäten, können alternative Auswahlmöglichkeiten angeboten werden. Die Elemente werden dabei ausgetauscht und nicht durch Variation an die neuen Gegebenheiten angepasst.

Aus wissenschaftlicher Sicht liegt die Motivation in diesem Zusammenhang darin herauszufinden, wie bestehende Lösungen des Baukastens⁵⁰⁸ beschrieben werden können, um sie für neue Kundenanfragen, die mit neuen Zielsystemen beschrieben werden, anpassen und auf deren kunden- und anbietersgerechte Eignung hin bewerten zu können. Die Methode muss hierbei in der Lage sein (1) Varianten in Abhängigkeit der Eigenschaften der Baukastenelemente abzuleiten, die grundsätzlich mit dem Kundenzielsystem konform sind, (2) den Grad der Eignung der in Frage kommenden Kombinationen zu quantifizieren und vor allem aufzuzeigen, (3) dass auf Grundlage des aktuellen Baukasteninhaltes keine gültigen Varianten ableitbar sind und damit die aktuelle Kundenanfrage nicht bedient werden kann.

Eine nutzenstiftende Erweiterung der Kennwerte zur Entscheidungsunterstützung bietet die Berechnung der Variationsanteile auf Grundlage der PGE - Produktgenerationsentwicklung.⁵⁰⁹ Die Informationen über die Höhe der Variationsanteile können, ergänzend zur Ermittlung der Erfüllungsgrade der emergenten Bewertungszielgrößen, die Entscheidung für oder gegen die Aufnahme einer konkreten Variante in das Angebot absichern. Hierfür ist Expertenwissen von entscheidender Bedeutung, da

⁵⁰⁸ Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015 und Bursac 2016 S. 52 ff.

⁵⁰⁹ s. Kapitel 2.1.1 und Kapitel 6.2

letztlich die finale Entscheidung für die konkrete Angebotsvariante von dem verantwortlichen Konstrukteur in enger Abstimmung mit dem Entwicklungsteam getroffen werden muss und demnach der Mensch die zentrale Rolle bei jeder Methodenanwendung einnimmt.⁵¹⁰ Die industrielle Praxis ist in diesem Kontext daran interessiert, wie sich der wissenschaftlich beschriebene Lösungsansatz in ein praxistaugliches Entwicklungswerkzeug implementieren lässt, um zu einem frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase auf die relevanten Entwicklungsaktivitäten zur Ableitung von kunden- und anbietergerechten Lösungen fokussieren zu können. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird bereits bei der Beschreibung der Methode auf Grundlage des wissenschaftlichen Erklärungsmodells das Leitbeispiel⁵¹¹ dieser Arbeit verwendet, um damit die Übertragbarkeit des präferierten wissenschaftlichen Erklärungsmodells auf das konkrete Praxisbeispiel zu verdeutlichen. Die praxisorientierte Beschreibung der Methode sowie der Elemente des Baukastens liefert dabei die relevanten Informationen zur Erstellung eines Softwareprototyps, der zur Verifikation der Methode am konkreten Praxisbeispiel eingesetzt wird.

Ziel 2

Entwicklung einer Methode zur Variantenauswahl auf Grundlage des erweiterten ZHO-Modells und unter Einbeziehung der Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung für die Entscheidungsunterstützung, sowie Entwicklung eines Softwareprototyps zur Operationalisierung und Verifikation der Methode am konkreten Industriebeispiel.

Neben der Verifikation der Methode muss diese auch im Kontext des fallgebenden Unternehmens evaluiert werden, um das Methodenpotential hinsichtlich eines zukünftigen Praxiseinsatzes zur Unterstützung der Variantenentwicklung in der Angebotsphase im Vergleich zur gängigen Konstruktionspraxis zu bewerten. Zur Gewährleistung der Nutzbarkeit der Methode in der industriellen Praxis müssen ferner die unternehmensseitigen Randbedingungen berücksichtigt werden. Zum einen muss die Methode in der Form eines anwendbaren Softwareprogramms mit der etablierten Softwarestruktur kompatibel sein. Neben der Kompatibilität der eingesetzten Software zur Operationalisierung der Methode unterliegt auch die Struktur der methodenbasierten Ein- und Ausgabedaten internen und externen Anforderungen. In diesem Zusammenhang stellt die parametrische CAD-Modellierung einen wichtigen Baustein für die Methode zur Ermittlung geometriegebundener Bewertungszielgrö-

⁵¹⁰ vgl. Albers 2011

⁵¹¹ vgl. Leitbeispiel S.10 f.

ßen dar. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die CAD-Daten den Anforderungen des unternehmensinternen Datenmanagementsystems sowie den kundenseitigen Anforderungen gerecht werden. Daneben hängt die Nutzbarkeit maßgeblich von den Anforderungen und Erwartungen der Mitarbeiter ab. Demnach sind Faktoren, die einen Einfluss auf die Mitarbeiterakzeptanz haben gleichermaßen zu berücksichtigen.

Ziel 3

Evaluation der Methode im Kontext des fallgebenden Unternehmens.

Für die Bearbeitung der Ziele im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens werden die im nachfolgenden Kapitel aufgeführten Forschungshypothesen und Forschungsfragen verwendet, die auf der Grundlage des gewählten Forschungsdesigns mit entsprechenden Methoden beantwortet werden.

4 Forschungsdesign

Zur Bearbeitung der Zielsetzung, die sich aus den Erfahrungen des Autors als Konstrukteur im Entwicklungsbereich des fallgebenden Zulieferunternehmens und der Analyse des Stands der Forschung ableitet, werden drei aufeinander aufbauende Forschungshypothesen mit korrespondierenden Forschungsfragen formuliert, die zur Erreichung der Ziele dieser Arbeit beantwortet werden müssen. Den Zusammenhang zwischen den Zielen und den Hypothesen zeigt hierzu Abbildung 4-1.

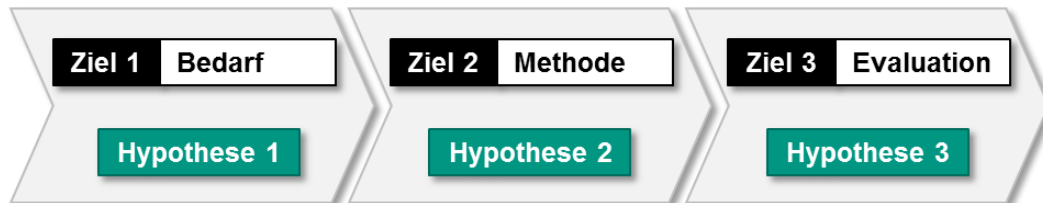


Abbildung 4-1: Zusammenhang zwischen Zielen und Forschungshypothesen

Im nachfolgenden Kapitel werden die Forschungshypothesen und Forschungsfragen vorgestellt. Bei den aufgeführten Forschungsfragen handelt es sich um übergeordnete Fragestellungen, die in den Arbeitskapiteln 5 bis 8 teilweise in weitere Detailfragestellungen untergliedert werden. Im Anschluss wird das gewählte Forschungsvorgehen erläutert, das sich in vier Phasen gliedert und sich an der Design Research Methodology von BLESSING UND CHAKRABARTI⁵¹² orientiert.

4.1 Forschungshypothesen und Forschungsfragen

Die Basis für den Forschungsgegenstand dieser Arbeit bildet ein in der industriellen Praxis des fallgebenden Zulieferunternehmens bekanntes Problem von hohen Konstruktionsaufwänden im Rahmen der Variantenentwicklung in der Angebotsphase. Hiermit steht die Behauptung im Zusammenhang, dass dieser Sachverhalt in der Durchführung vermeidbarer bzw. unnötiger⁵¹³ Konstruktionsaktivitäten begründet ist. Diese Behauptung muss zunächst überprüft werden, da sie die grundlegende Motivation und Berechtigungsgrundlage für diese Arbeit aus Sicht der Wissenschaft und der Industrie darstellt. Zur Klärung der Problem- und Bedarfssituation (Ziel 1) wird die Forschungshypothese 1 verwendet. Zur Beleuchtung relevanter Teilaspekte, die im weiteren Verlauf für die Erarbeitung der nachfolgenden Ziele erforderlich werden, dienen konkrete Forschungsfragen.

⁵¹² vgl. Blessing & Chakrabarti 2009

⁵¹³ vgl. Abbildung 5-7 auf S. 148

Forschungshypothese 1

Im Rahmen der Variantenentwicklung in der Angebotsphase kommt es zur Generierung von vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten.

Forschungsfragen zur Forschungshypothese 1

- FF1.1** Kommt es in der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten?
- FF1.2** Welche Faktoren haben Einfluss auf die Unsicherheit bei der kunden- und anbietersgerechten Konzeptentwicklung und können zusätzliche Iterationen im Rahmen der Angebotserstellung generieren?
- FF1.3** Gibt es einen Bedarf zur Unterstützung der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase und wovon hängt dieser Bedarf ab?

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Bearbeitung der ersten Forschungshypothese sind einerseits relevant, um die in der Praxis identifizierten Problemstellungen und Bedarfe zunächst wissenschaftlich zu beschreiben. Darüber hinaus werden die hieraus hervorgehenden Erklärungsmodelle für die Entwicklung einer praxisorientierten Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl und deren Überführung in ein anwendbares Entwicklungswerkzeug für die Konstruktionspraxis genutzt (Ziel 2). Zur Erarbeitung der hierfür nötigen Grundlagen wird die zentrale Forschungshypothese 2 mit entsprechenden Forschungsfragen zur Untersuchung relevanter Detailaspekte eingesetzt.

Forschungshypothese 2

Durch die Beschreibung der Baukastenelemente als korrespondierende Paare aus Objekt und Objektbeschreibung ist es möglich, für neue Kundenanfragen geeignete Elementkombinationen zu finden.

Forschungsfragen zur Forschungshypothese 2

- FF2.1** Wie kann die Variantenentwicklung im Kontext des erweiterten ZHO-Modells beschrieben werden und wie können für die Variantenauswahl die Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung für die Entscheidungsunterstützung genutzt werden?
- FF2.2** Wie sind die Elemente des Baukastens als korrespondierende Paare aus Objekt (Teilsystem) und Objektbeschreibung (Teilzielsystem) zu beschreiben, um sie auf neue Kundenzielsysteme anpassen zu können?

FF2.3 Wie kann die Methode im Rahmen einer prototypischen Softwareanwendung operationalisiert werden?

Die Forschungshypothese 3 adressiert die Evaluation der Methode im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens hinsichtlich eines zukünftigen Einsatzes der Methode in der Konstruktionspraxis (Ziel 3). Mittels korrespondierender Detailfragestellungen zu den formulierten Forschungsfragen werden im Kapitel 8 auch die unternehmens- und mitarbeiterseitigen Randbedingungen zur Gewährleistung der Nutzbarkeit der Methode im Praxiseinsatz erörtert, die für den nutzenstiftenden Einsatz der Methode zu berücksichtigen sind.

Forschungshypothese 3

Der Einsatz der Methode zur Variantenauswahl auf Grundlage einer Softwareanwendung unterstützt die Konzeptentwicklung in der Angebotsphase.

Forschungsfragen zur Forschungshypothese 3

- FF3.1** Ist die Methode derart beschrieben, dass sie lehr- und lernbar ist und damit der Transfer der wissenschaftlichen Methodenbeschreibung durch eine Softwareanwendung für den Praxiseinsatz geleistet werden kann?
- FF3.2** Wie wird das Potential der Methode hinsichtlich eines Einsatzes in der Konstruktionspraxis aus Expertensicht bewertet?
- FF3.3** Kann das Potential der auf der PGE - Produktgenerationsentwicklung basierenden Entscheidungsunterstützung der Methode durch retrospektive Anwendung auf abgeschlossene Anfrageprojekte nachgewiesen werden?

Das folgende Unterkapitel zeigt das in vier Phasen gegliederte Forschungsvorgehen, das die verwendeten Forschungsmethoden und die daraus resultierenden Forschungsergebnisse mit den Zielen und den Hypothesen in Zusammenhang bringt.

4.2 Forschungsvorgehen

Zur Erreichung der Zielsetzung durch die Bearbeitung der abgeleiteten Forschungshypothesen und Forschungsfragen wird das Forschungsvorgehen in Anlehnung an die Design Research Methodology (DRM) nach BLESSING UND CHAKRABARTI⁵¹⁴ entsprechend Abbildung 4-2 in vier Phasen unterteilt. Zur Orientierung am Aufbau und

⁵¹⁴ vgl. Blessing & Chakrabarti 2009 S. 29 ff.

der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sind die Kapitelnummern, Ziele und Hypothesen den einzelnen Phasen des Forschungsdesigns zugeordnet.

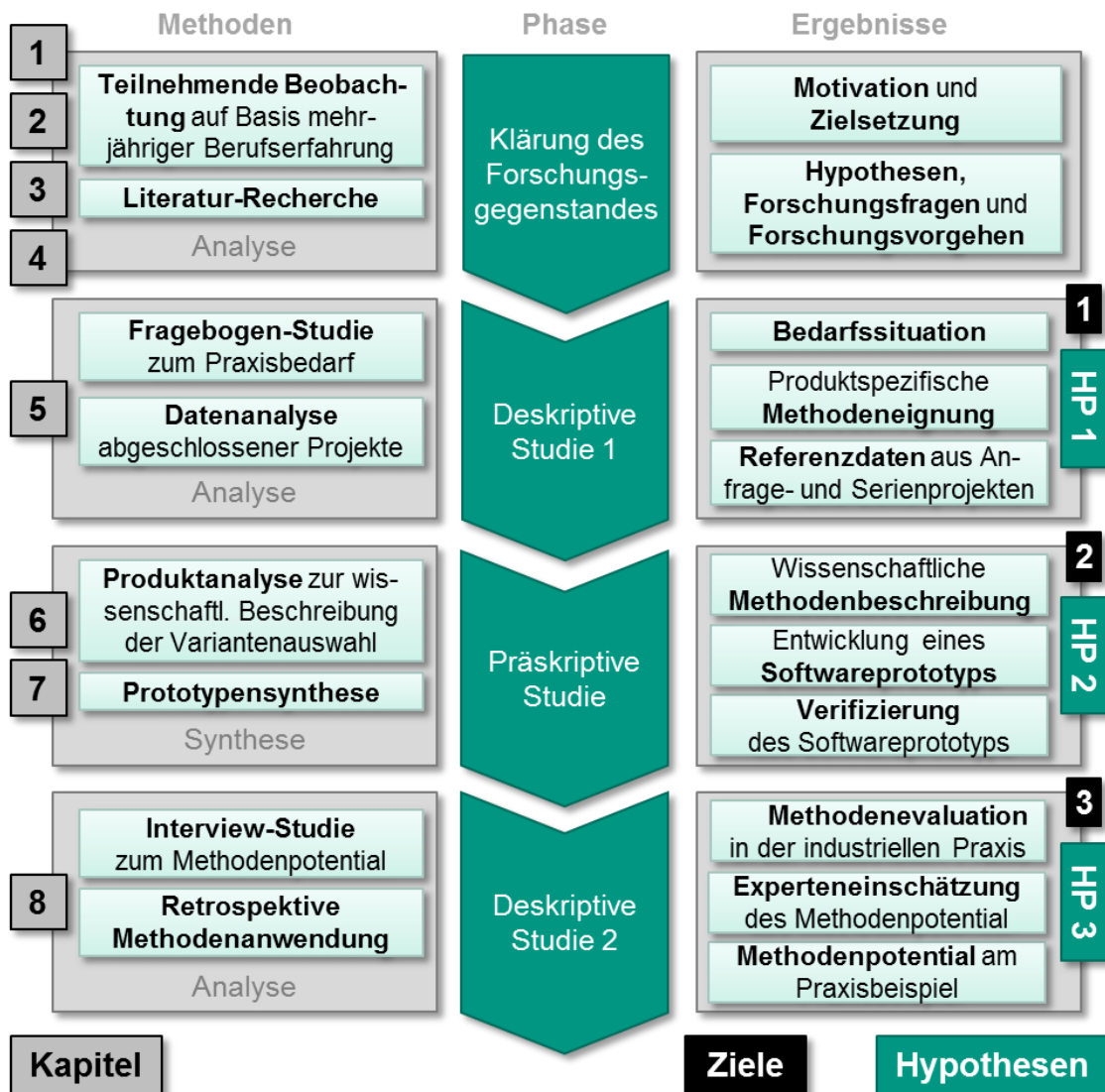


Abbildung 4-2: Forschungsdesign der Arbeit

Klärung des Forschungsgegenstandes (DRM: Research Clarification)

Die erste Phase dient der Klärung des Forschungsgegenstandes. Die in Kapitel 1 beschriebene Problemstellung und der daraus resultierende Bedarf stützen sich zum einem auf teilnehmende Beobachtungen⁵¹⁵ des Autors im Rahmen seiner mehrjährigen Berufserfahrung in der Konstruktionspraxis. Dabei wird gleich zu Beginn der Fokus der Arbeit dargelegt, um neben der Bedarfssituation aus Sicht der Industrie zu verdeutlichen, in welchem Kontext die Ziele der Arbeit verfolgt werden. Daneben wird die Arbeit durch die Analyse des Stands der Forschung gemäß Kapitel 2 motiviert,

⁵¹⁵ vgl. Marxen 2014 S. 81 ff.

indem im relevanten Forschungsumfeld Bedarfe aufgezeigt werden, die zusammen mit den teilnehmenden Beobachtungen die Basis für die Formulierung der Zielsetzung bilden. Neben der Motivation und der Zielsetzung in Kapitel 3 sind weitere Ergebnisse aus der ersten Phase die Aufstellung der Forschungshypothesen und der Forschungsfragen in Kapitel 4, die zur Erreichung der definierten Zielstellung beantwortet werden müssen.

Deskriptive Studie 1 (DRM: Descriptive Study I)

In der sich anschließenden Deskriptiven Studie 1 (DRM: Descriptive Study I) wird der Bedarf aus Sicht der teilnehmenden Beobachtungen des Autors und der Analyse des Stands der Forschung in der Konstruktionspraxis des fallgebenden Unternehmens untersucht (Ziel 1). Zu diesem Zweck wird in drei Konstruktionsabteilungen die in Kapitel 5 vorgestellte Fragebogen-Studie⁵¹⁶ durchgeführt, um die tatsächlichen Praxisbedarfe hinsichtlich einer Unterstützung der Konstruktionsaktivitäten in der Angebotsphase auf Basis der Forschungshypothese 1 zu untersuchen.⁵¹⁷ Das Studiendesign wird hierzu in fünf Phasen untergliedert. Zunächst werden die Fragestellungen definiert und in einem Fragebogen zusammengestellt (1).⁵¹⁸ Die Fragestellungen resultieren dabei aus der begleitenden Studie des Autors in der Konstruktionspraxis über einen Zeitraum von zehn Jahren. Diese Fragestellungen sollen durch die Befragung von 23 Experten aus der Konstruktion mittels der Fragebogen-Studie abgesichert werden. Hierzu kommen zwei Fragetypen zum Einsatz. Zum einen Fragestellungen mit vordefinierten Antwortmöglichkeiten, die aus der begleitenden Studie des Autors resultieren. Die Teilnehmer haben darüber hinaus die Möglichkeit durch entsprechende Leerzeilen jeden Fragenblock entsprechend ihrer Erfahrungen aus der Praxis zu ergänzen. Daneben werden Fragen mit Freitextantworten gestellt. Nach der Erstellung des Fragebogens werden zunächst Vorbesprechungen (2) auf Gruppenleiterenebene geführt, um die Freigabe zur Durchführung der Fragebogen-Studie zu klären und die konkreten Teilnehmer festzulegen. Im Anschluss daran finden Vorbesprechungstermine mit den Konstrukteuren statt, um den Fragebogen in Papierform auszugeben und offene Fragen zu klären. Nach dem festgelegten Bearbeitungszeitraum (3) werden mit denjenigen Konstrukteuren, die auf dem Fragebogen ihre entsprechende Zustimmung vermerkt haben, Nachbesprechungen durchgeführt (4). Abschließend werden die Fragebögen ausgewertet und die Ergebnisse aufbereitet (5).

⁵¹⁶ vgl. Marxen 2014 S. 100 ff.

⁵¹⁷ Die Zielsetzung dieser Arbeit wird gezielt im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens untersucht. Zur Ermittlung der Problem- und Bedarfssituation wird dabei bewusst auf drei Konstruktionsabteilungen (Kolben-, Nockenwellen- und Zylinderkopfhauptkonstruktion) fokussiert.

⁵¹⁸ vgl. Kapitel 11.1.1 im Anhang zu Kapitel 5

Parallel zur Fragebogen-Studie dient eine Datenanalyse von abgeschlossenen Entwicklungsprojekten dazu, die Forschungshypothese 1 aus Sicht der Datenstände im Datenmanagementsystem zu beleuchten. Die Ergebnisse aus der zweiten Phase sind, neben der Bedarfssituation, Informationen zur produktspezifischen Methodeneignung und zu geeigneten Referenzprojekten durch retrospektive Analyse abgeschlossener Anfrage- und Serienprojekte. Die hierzu im Datenmanagementsystem dokumentierten Konstruktionsaktivitäten werden zum Abgleich mit den Aussagen aus der Fragebogen-Studie eingesetzt.

Präskriptiven Studie (DRM: Prescriptive Study)

In der dritten Phase wird, aufbauend auf den Analyseergebnissen der beiden vorhergehenden Phasen, die Methode in Kapitel 6 zunächst grundlegend mit Hilfe des erweiterten ZHO-Modells erklärt sowie die Ermittlung und Verwendung der Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung für die Variantenauswahl beschrieben. Durch eine detaillierte Produktanalyse von gebauten Nockenwellensystemen⁵¹⁹ wird die Methode praxisorientiert weiterentwickelt und das produktspezifische Regelwerk für das Ableiten von Varianten hergeleitet und verifiziert. Mit Bezug auf Ziel 2 wird hiernach das Entscheidungsunterstützungssystem aufgestellt, das die Grundlage für die in Kapitel 7 beschriebene Realisierung eines anwendbaren Softwareprototyps darstellt. Die wissenschaftliche Beschreibung der Methode und deren Verifikation während der Prototypensynthese auf Basis eines anwendbaren Softwareprototyps beziehen sich auf die Untersuchung der Forschungshypothese 2.

Deskriptive Studie 2 (DRM: Descriptive Study II)

In der letzten Phase wird entsprechend Ziel 3 die Methode zur Variantenauswahl auf Grundlage des Softwareprototyps auf deren Eignung für einen zukünftigen Einsatz in der Praxis evaluiert. Hierzu werden zwei wissenschaftliche Methoden verwendet.

Im ersten Teil der Deskriptiven Studie wird das Methodenpotential im Rahmen einer Interview-Studie⁵²⁰ mit Experten aus der Konstruktion hinsichtlich des Potentials für einen Praxiseinsatz bewertet. Die semistrukturierten Interviews werden mit sieben Konstrukteuren aus der Konstruktionsgruppe für Ventiltriebkomponenten des fallgebenden Unternehmens durchgeführt. Da diese Konstruktionsmitarbeiter sehr gut mit dem verwendeten Leitbeispiel vertraut sind und zudem an der Fragebogen-Studie⁵²¹ teilnehmen und dadurch bereits Vorkenntnisse zur Methode haben, eignen sich diese sehr gut für eine Teilnahme an den Interviews. Die Planung der Interviews wird

⁵¹⁹ vgl. Leitbeispiel S.10 f.

⁵²⁰ vgl. Marxen 2014 S. 101 ff.

⁵²¹ vgl. Klärung des Forschungsgegenstandes (DRM: Research Clarification) auf S. 134 f.

auf Gruppenleiterenebene abgestimmt, bevor die Teilnehmer im Anschluss daran zu einer Einführungsveranstaltung eingeladen werden. An diesem Termin wird der Fragebogen zur Durchführung der semistrukturierten Interviews vorgestellt und diskutiert. Hiernach werden die Teilnehmer zu den Interview-Terminen eingeladen. Mit der Zustimmung der Teilnehmer finden bei Bedarf Nachbesprechungen statt.

Im zweiten Teil wird die Methode mit Hilfe des Softwareprototyps auf historische Daten abgeschlossener Entwicklungsprojekte angewendet. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf die Eignung der Methode für einen Einsatz im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens ziehen. In dieser Arbeit wird dies als retrospektive Methodenabwendung verstanden. In der Literatur wird hier von historischem Rückvergleich bzw. Backtesting gesprochen. Hierbei werden Prozesse, Strategien, Theorien, Modelle und Methoden bewertet, indem, wie im Falle der vorliegenden Arbeit, eine Methode auf historische Daten angewendet wird. Backtesting-Verfahren werden häufig im Risikomanagement des Bankenwesens⁵²² sowie bei Vorhersagen von Klimamodellen eingesetzt. Übertragen auf die vorliegende Arbeit werden im Rahmen der retrospektiven Methodenabwendung bereits abgeschlossene Projekte, die mit gängigen Methoden und etablierten Vorgehensweisen in der Angebotsphase bearbeitet wurden, nochmals auf Grundlage der neuen Methode durchgeführt, um Aussagen hinsichtlich des Methodenpotentials aus heutiger Sicht abzuleiten. Diese Untersuchungen und die daraus resultierenden Aussagen hinsichtlich des Methodenpotentials dienen der Erreichung von Ziel 3 und werden auf Grundlage der Forschungshypothese 3 und den korrespondierenden Forschungsfragen bearbeitet.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass zwischen der Durchführung der Interview-Studie und der Potentialanalyse mittels retrospektiver Methodenabwendung die Kennwerte zur Entscheidungsunterstützung um die variantenspezifischen Variationsanteile gemäß der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS⁵²³ erweitert wurden. Der Grund hierfür ist, dass im Rahmen der Experten-Interviews mehrfach der Mehrwert einer variantenspezifischen Berechnung der Gleich- und Variationsanteile gegenüber den Referenzprodukten genannt wurde, um frühzeitig Aufwand, Risiko und Potential der abgeleiteten Varianten fundiert abwägen zu können. Die PGE wurde deshalb nach der Interview-Studie zusätzlich integriert und im Rahmen der retrospektiven Methodenabwendung evaluiert.

Auf das in diesem Kapitel vorgestellte Forschungsdesign folgen vier Arbeitskapitel, in denen die Ergebnisse vorgestellt werden. Die nachfolgende Abbildung 4-3 stellt abschließend in diesem Kapitel die Zusammenhänge zwischen Zielen, Kapiteln, Hypo-

⁵²² vgl. Engel 2008

⁵²³ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015a

thesen und Forschungsfragen her. Zur Orientierung an der Zielsetzung und dem Forschungsvorgehen wird diese Darstellung in kapitelspezifischer Form in den Einleitungen der nachfolgenden Arbeitskapitel verwendet.

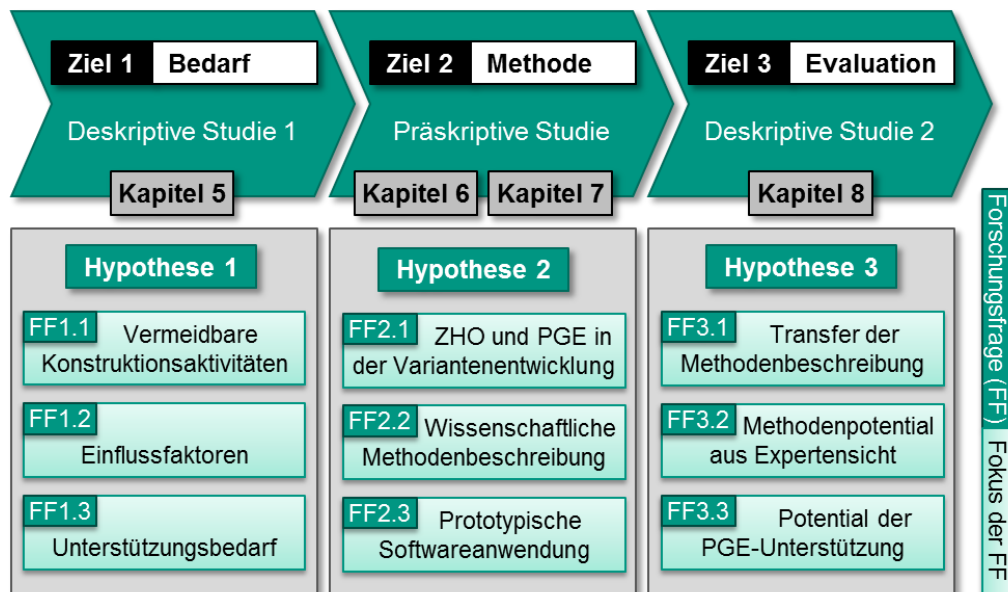


Abbildung 4-3: Zuordnung von Forschungszielen, Forschungshypothesen und Forschungsfragen zu den folgenden Arbeitskapiteln 5, 6, 7 und 8

5 Analyse der Konzeptentwicklung in der Praxis

In diesem Kapitel wird die Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotserstellung im Kontext der industriellen Praxis analysiert (Ziel 1). Hierbei liegt der Fokus auf der Analyse der Bedarfssituation aus Sicht von Konstruktionsmitarbeitern, um konkrete, praxisrelevante Verbesserungspotentiale abzuleiten.⁵²⁴ Hierzu wurde in fünf Konstruktionsabteilungen des fallgebenden Zulieferunternehmens für Motorkomponenten eine Fragebogen-Studie durchgeführt, an der 23 Mitarbeiter teilgenommen haben.⁵²⁵ Die verwendeten Fragebögen⁵²⁶ beinhalteten quantitativ als auch qualitativ zu beantwortende Fragestellungen. Gemäß der nachfolgenden Abbildung 5-1 lassen sich die Abteilungen drei Produktgruppen zuordnen, die sich mit Produkten unterschiedlicher struktureller Komplexität beschäftigen. Zusätzlich enthält Abbildung 5-1 die Anzahl der Teilnehmer je Produktgruppe und deren Einteilung nach Berufserfahrung in die Gruppe kleiner gleich oder größer zehn Jahre. Neben der Gesamtauswertung auf Grundlage der Antworten aller Produktgruppenvertreter wird mit einer produktgruppenaufgelösten Auswertung der Antworten zu ausgewählten Fragen das Ziel verfolgt, Rückschlüsse auf geeignete Zielgruppenkonstrukteure zu ziehen.

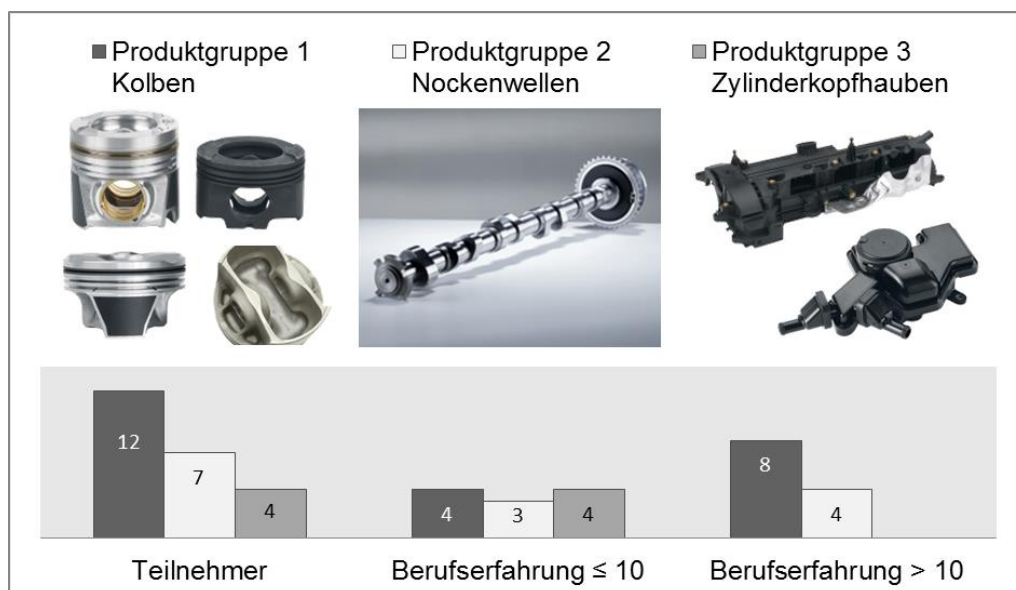


Abbildung 5-1: Anzahl der befragten Konstrukteure je Produktgruppe⁵²⁷

Die strukturelle Komplexität nimmt in diesem Zusammenhang ausgehend von Produktgruppe 1, über Produktgruppe 2 nach Produktgruppe 3 zu. Bei Gruppe 1, die sich mit Kolbensystemen für Verbrennungsmotoren beschäftigt, liegt der Konstrukti-

⁵²⁴ Basis ist die Mitarbeiterbefragung in Walch & Albers 2014

⁵²⁵ Studiendesign zur Fragebogen-Studie in Kapitel 4.2 S. 135 f.

⁵²⁶ Fragebögen zur Fragebogen-Studie im Anhang in Kapitel 11.1

⁵²⁷ Quelle der Darstellungen <http://www.mahle.com>, 11.06.2015

onsschwerpunkt auf der wechselseitigen Abstimmung und Ausdetaillierung von Roh- und Fertigteilen. Bei Kolbensystemen, in Form von Kolbenbaugruppen, werden zusätzlich die Komponenten Kolbenringe, Kolbenbolzen, Buchsen und ggf. Eingsussteile berücksichtigt. Die Konzeptentwicklung im Anfragefall auf Grundlage bestehender Lösungen basiert hier im Wesentlichen auf der Variation und Kombination von Konstruktionselementen, wie z.B. Nut- oder Kolbenmuldengeometrie. Bei gebauten Nockenwellensystemen⁵²⁸ rücken bei der auftragsspezifischen Konzeptentwicklung verstärkt die Kombinationsmöglichkeiten in den Fokus, die sich aufgrund der Kompatibilitäten unterschiedlicher Komponenten ableiten lassen. Bei Produktgruppe 3, die sich mit der Konstruktion von Zylinderkopfhauben befasst, ergeben sich abgeleitete Varianten wie bei der Gruppe 2 durch Kombination von Konstruktionselementen und Komponenten, die in wechselseitigen Beziehungen und Abhängigkeiten stehen. Durch die hohe Anzahl an kombinierbaren Komponenten und Unterbaugruppen ist es für Konstrukteure der Produktgruppe 3 sehr schwierig den Überblick zu bewahren. Konstrukteure unterschiedlicher Produktgruppen haben demnach auch unterschiedliche, produktspezifische Anforderungen beispielsweise an die Ablage und Dokumentation bestehender Produktlösungen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten, um im Anfragefall passende Vorarbeiten effizient finden und auch nutzen zu können.

Im folgenden Kapitel 5.1 werden ausgewählte Ergebnisse der Fragebogen-Studie aufgeführt und diskutiert.⁵²⁹ In der Studie werden dazu die folgenden Forschungsfragen zur Forschungshypothese 1 aus Sicht der Konstrukteure beantwortet.

Forschungsfragen zur Fragebogen-Studie (HP 1)

- FF1.1** Kommt es in der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten?
- FF1.2** Welche Faktoren haben Einfluss auf die Unsicherheit bei der kunden- und anbietergerechten Konzeptentwicklung und können zusätzliche Iterationen im Rahmen der Angebotserstellung generieren?
- FF1.3** Gibt es einen Bedarf zur Unterstützung der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase und wovon hängt dieser Bedarf ab?

Zur besseren Orientierung am Forschungsdesign bildet die Abbildung 5-2 die Forschungsfragen zur Hypothese 1 im Gesamtkontext des Forschungsvorgehens ab.

⁵²⁸ vgl. Leitbeispiel S.10 f.

⁵²⁹ Weitere Ergebnisse aus der Fragebogen-Studie befinden sich im Anhang zu Kapitel 5 in Kap. 11.1

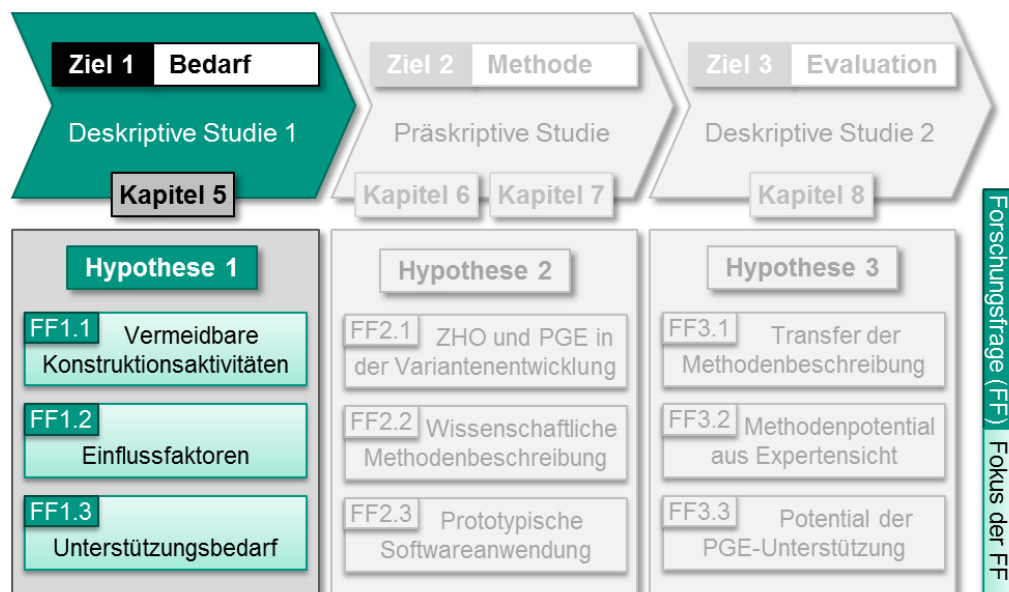


Abbildung 5-2: Einordnung der Forschungsfragen zur Präskriptiven Studie 1 (Bedarfsanalyse) in den Gesamtkontext des Forschungsvorhabens

Im Anschluss an die Vorstellung der Ergebnisse zu den Forschungsfragen werden in Kapitel 5.2 die Aussagen der Konstruktionsmitarbeiter aus der Fragebogen-Studie den Ergebnissen einer retrospektiven Betrachtung abgeschlossener Entwicklungsprojekte aus dem Bereich der Ventiltriebssysteme gegenübergestellt. In Kapitel 5.3 werden die identifizierten Handlungsbedarfe zusammengefasst. Die Summe der Handlungsbedarfe wird dabei auf diejenigen reduziert, die methodenbasiert unterstützt werden können. Diese Bedarfe bilden die Eingangsgrößen für die Methodenentwicklung (Kapitel 6) sowie deren Überführung in ein prototypisches Entwicklungswerkzeug (Kapitel 7) zur Entscheidungsunterstützung in der Angebotsphase.

5.1 Durchführung einer Fragebogen-Studie

Mit der nachfolgenden Mitarbeiterbefragung wird die grundsätzliche Berechtigung für die vorliegende Arbeit aus Konstruktionsmitarbeitersicht im Kontext des betrachteten Zulieferunternehmens untersucht. Im Rahmen der Unternehmensplanung wurden in einigen Entwicklungsbereichen hohe Entwicklungszeiten festgestellt. Dies liegt an dem Sachverhalt, dass viele Entwicklungsschleifen getätigt werden.⁵³⁰ Zur Untersuchung dieser Sachlage wurde in Kapitel 4.1 die Hypothese 1 aufgestellt, dass es im Rahmen der Angebotserstellung bei der Konzeptentwicklung zur Generierung vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten kommt. Interessante Fragestellungen sind dabei, was aus Sicht der befragten Konstrukteure vermeidbare Konstruktionsaktivitäten im

⁵³⁰ vgl. Abbildung 1-1 auf S. 3

Rahmen der Angebotserstellungsphase charakterisiert und welche Faktoren einen Einfluss auf die Unsicherheit, und hiermit auf zusätzliche Iterationen bei der Erarbeitung kunden- und anbietersgerechter Konzepte im Anfragefall, haben.

Im Rahmen der Fragebogen-Studie wurden zur Klassifizierung der Konstruktionsaktivitäten die Begriffe der klassischen Konstruktionsmethodik verwendet, da diese in der industriellen Praxis etablierte Begrifflichkeiten darstellen. Aus Gesprächen mit Mitarbeitern aus der Konstruktion lässt sich das Begriffsverständnis von Anpassungskonstruktion (synonym: Änderungskonstruktion⁵³¹), Varianten- und Neukonstruktion entsprechend Abbildung 5-3 darstellen.

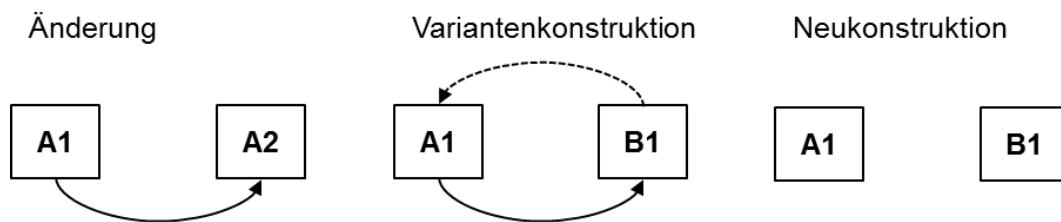


Abbildung 5-3: Verständnis der Begrifflichkeiten der klassischen Konstruktionsmethodik aus Sicht der Mitarbeiter der Konstruktion des fallgebenden Unternehmens

Eine Änderung mit der entsprechenden Änderungskonstruktion wird durchgeführt, wenn beispielsweise eine Zeichnung A in der Version 1 im weiteren Projektverlauf nicht mehr relevant werden wird. Hierbei wird von einer Versionierung gesprochen, bei der aus der Zeichnung A1 eine neue Version A2 generiert wird, auf der die Änderungshistorie entsprechend im Änderungsfeld dokumentiert wird. Die Zeichnungsbenennung A bleibt dabei bestehen, d.h., es wird kein neuer Dateninformationssatz⁵³² angelegt. Eine Wiederherstellung der Ausgangsversion ist nur möglich, indem eine neue Version A3 erzeugt wird, die die Änderung wieder rückgängig macht.

Eine Variantenkonstruktion hingegen wird bevorzugt, wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass die ursprüngliche Zeichnung A in der Version 1 für den weiteren Verlauf des Projektes nochmals relevant werden wird. Ein weiterer Grund für eine Variantenerstellung ist, wenn eine Versionierung aufgrund des Änderungsumfangs und der Änderungsinhalte nicht zielführend wäre. Demzufolge wird basierend auf der Zeichnung A1 eine neue Variante B1 mit neuem Dateninformationssatz erstellt. Dabei wird eine Verknüpfung der neuen Variante B1 auf die alte Variante A1, beispielsweise in Form eines einfachen Zeichnungseintrages, erstellt.

⁵³¹ vgl. Lindemann & Reichwald 2006 S. 135

⁵³² Der Dateninformationssatz (DIS) wird im weiteren Verlauf noch näher beschrieben. An dieser Stelle genügt die Information, dass für jedes Modell und jede Zeichnung bei Neuanlage vom PDM-System eine Dokumentennummern vergeben wird, die Zeichnungen und Modelle mit Informationen zum Projekt über eine Nummer eindeutig zuordnet.

Unter Neukonstruktion wird abweichend zur Definition in der klassischen Konstruktionsmethodik eine neue Konstruktion für ein neues Projekt verstanden, die auf einem leeren CAD-Startmodell basiert. Die erzeugte Konstruktion lässt sich aber dennoch in der überwiegenden Zahl der Fälle auf unternehmensintern bekannten Lösungsprinzipien zurückführen. Die Wortverwendung weicht demzufolge von der Definitionen der klassischen Konstruktionsmethodik ab. Darüber hinaus wird häufig zwischen den Begriffen Neukonstruktion und Neuentwicklung nicht differenziert. Nach Ansicht des Autors kann an dieser Stelle die Beschreibung der Produktentwicklung aus der Sicht der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS⁵³³ einen entscheidenden Beitrag leisten, um Entwicklungsprojekte praxisgerecht zu charakterisieren.

Bevor die Ergebnisse der Fragebogen-Studie im nächsten Unterkapitel vorgestellt werden, muss zunächst noch geklärt werden, wie die Begriffe Designfestlegung und Konzeptentwicklung aus Sicht der befragten Konstrukteure zusammenhängen. Im Rahmen der Fragebogen-Studie wurde der im Unternehmen übliche Begriff „Designfestlegung in der Angebotsphase“ zur Beschreibung des Forschungsvorhabens verwendet. Im weiteren Verlauf der Forschungsaktivitäten im Anschluss an die Befragung wurden die eingesetzten Begriffe nochmal grundsätzlich dahingehend hinterfragt, ob mit Ihnen der tatsächliche Kern des Forschungsvorhabens zum Ausdruck gebracht werden kann. Dabei stellte sich der Begriff Designfestlegung als ungeeignet heraus, da die hier vorgeschlagene Methode das Design nicht festlegt. Vielmehr werden mit Hilfe der Methode passende Konzepte für die konkrete Kundenanfrage vorgeschlagen, aus denen der Konstrukteur auf Basis seines Expertenwissens auswählen kann. Deshalb wurde der Begriff Designfestlegung durch Konzeptentwicklung ersetzt, da damit zum Ausdruck gebracht wird, dass in der Angebotsphase mehrere Konzepte generiert werden, die dann auf deren kunden- und anbietergerechte Eignung untersucht werden.⁵³⁴ Am Ende der Angebotsphase wird dann das Design für das Angebot durch das Entwicklungsteam festgelegt. Im Rahmen von semistruktu-

⁵³³ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

⁵³⁴ vgl. Ergebnisse der Interview-Studie zur Frage 5.2 in Kapitel 11.4.1: Zur Absicherung, dass der Zusammenhang zwischen Designfestlegung und Konzeptentwicklung mit dem Verständnis der Umfrageteilnehmer vereinbar ist, wurde im Rahmen von semistrukturierten Interviews (April und Mai 2015) einer Auswahl an Mitarbeitern, die auch an der Fragebogen-Studie in 2014 teilgenommen hatten, die Frage gestellt, was sie unter Designfestlegung und Konzeptentwicklung verstehen und wie diese Begrifflichkeiten ihrer Meinung nach zusammenhängen. In den Interviews mit den Konstruktionsmitarbeitern wurde deutlich, dass die Konzeptentwicklung als ein Prozess verstanden wird, der mehrere gültige und auf Basis eines Baukastens abgeleitete Konzepte zum Ergebnis hat. Nach Aussage der Befragten war ihnen zum Zeitpunkt der Fragebogen-Studie in 2014 klar, dass vor der Designfestlegung in der Angebotsphase methodengestützt realisierbare Varianten ermittelt werden müssen, aus denen der Konstrukteur in Abstimmung mit dem Entwicklungsteam auswählen und damit das Design für die Anfrage festlegen muss.

rierten Interviews wurde hierzu bestätigt, dass aus Sicht der befragten Konstrukteure die Begriffe Designfestlegung und Konzeptentwicklung synonym verstanden werden. Für die Diskussion der Ergebnisse aus den Befragungen kann auf Basis der Ausführungen im vorigen Absatz der Begriff Designfestlegung verwendet werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit findet hingegen der Begriff Konzeptentwicklung Verwendung, wie er im Titel der Arbeit zur Beschreibung des Forschungsinhaltes verwandt wird.

5.1.1 Ergebnisse aus der Fragebogen-Studie

Zur Klärung der Bedarfssituation wurde einleitend die Frage gestellt, ob es aus Sicht der Konstruktionsmitarbeiter im Rahmen der Angebotserstellung bei der Festlegung des Designs zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt (FF1.1).⁵³⁵ Die nachfolgende Abbildung 5-4 zeigt hierzu das Bewertungsergebnis über alle Produktgruppen, wobei alle 23 Teilnehmer (N=23) ihre Wertung abgegeben haben.⁵³⁶

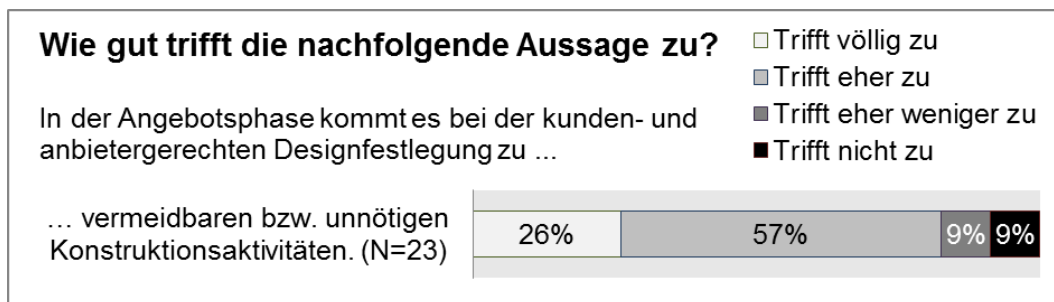


Abbildung 5-4: Bewertungsergebnis zu vermeidbaren bzw. unnötigen Konstruktionsaktivitäten bei der kunden- und anbiertergerechten Designfestlegung in der Angebotsphase

Bei der Auswertung über alle Produktgruppen ergibt sich, dass über 80% der Befragten der Auffassung sind, dass es zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten in der Angebotserstellungsphase kommt. Dabei stimmen 26% völlig und 57% eher zu. Die nachfolgende Abbildung 5-5 zeigt einen Vergleich der Bewertungsergebnisse zwischen der Produktgruppe 1, die sich vorwiegend mit der Konstruktion von Fertig- und Rohteilen unter Berücksichtigung bidirektionaler Abhängigkeiten beschäftigt, und den Produktgruppen 2 (Nockenwellen) und 3 (Zylinderkopfschalen), die sich mit der Ausdetaillierung von Baugruppen und deren Wechselwirkungen auseinandersetzen.⁵³⁷

⁵³⁵ vgl. Abbildung 5-2 auf S. 141

⁵³⁶ Anzahl der abgegebenen Bewertungen wird mit N = Stichprobengröße angegeben.

⁵³⁷ Zur Erhebung offener und ehrlicher Bewertungsergebnisse wurde bewusst die Fragebogen-Technik eingesetzt, da hier die Teilnehmer eher gewillt sind, offen und ehrlich zu antworten.

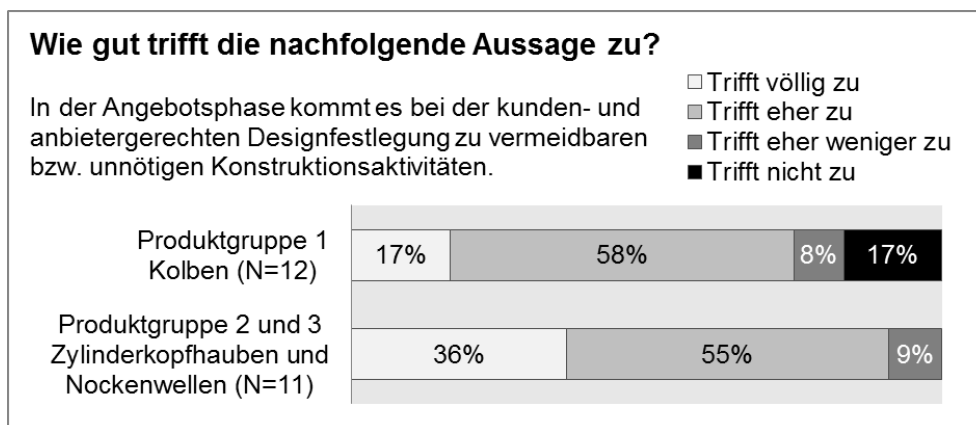


Abbildung 5-5: Vergleich der Bewertungsergebnisse zu vermeidbaren bzw. unnötigen Konstruktionsaktivitäten zwischen Produktgruppen 1 und den Produktgruppen 2 und 3

Die Bewertungsergebnisse in Abbildung 5-5 sind ein Indiz dafür, dass mit steigender, struktureller Komplexität es für Konstrukteure zunehmend schwieriger wird, zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in der Angebotserstellung, basierend auf einem existierenden Baukasten, relevante Systeme und Subsysteme für die vorliegende Konstruktionsaufgabe zu identifizieren und in einer gültigen Kombination zu einem Gesamtsystem zusammensetzen, so dass sowohl die kunden- als auch die anbieterseitigen Erwartungen an das Produkt erfüllt werden und im weiteren Verlauf der Produktdetaillierung auch erfüllt bleiben. Bekräftigt wurde dies zusätzlich durch persönliche Gespräche des Autors mit Teilnehmern aus den einzelnen Gruppen im Nachgang an die Befragung, aber auch bereits durch Anmerkungen von Mitarbeiter im Rahmen der Vorbesprechungstermine zur Fragebogen-Studie.⁵³⁸

Bei der Formulierung der einleitenden Frage werden vermeidbare Aktivitäten adressiert (FF1.1). Neben vermeidbaren Aktivitäten wird auch häufig von unnötigen Aktivitäten gesprochen. Hierzu ging aus den Anmerkungen auf den Fragebögen und den im Anschluss an die Studie geführten Einzelgesprächen hervor, dass vermeidbare Aktivitäten als nicht zielführend für die vorliegende, konkrete Konstruktionsaufgabe verstanden werden. Dabei wurde deutlich, dass das Erfahrungswissen einen hohen Stellenwert einnimmt, denn das Wissen darüber, dass die Ausprägung einer Konstruktion für die spezielle Aufgabe unter den gegebenen Randbedingungen nicht oder nicht ausreichend gut zur Erfüllung der geforderten Anforderungen funktioniert hatte, steht für Aktivitäten im Rahmen von Folgeprojekten zur Verfügung. Zur besseren Verdeutlichung dient nachfolgendes Beispiel eines Industrieprojekts zur Entwicklung gebauter Nockenwellen⁵³⁹ für einen 4-Zylinder-Dieselmotor. Die Abbildung 5-6

⁵³⁸ Studiendesign zur Fragebogen-Studie in Kapitel 4.2 S. 135 f.

⁵³⁹ Vgl. Leitbeispiel S.10 f.

zeigt hierzu die Entwicklungsgenerationen ($E_m G_n$) der Nockenwelle im Rahmen des Entwicklungsprojektes im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung.

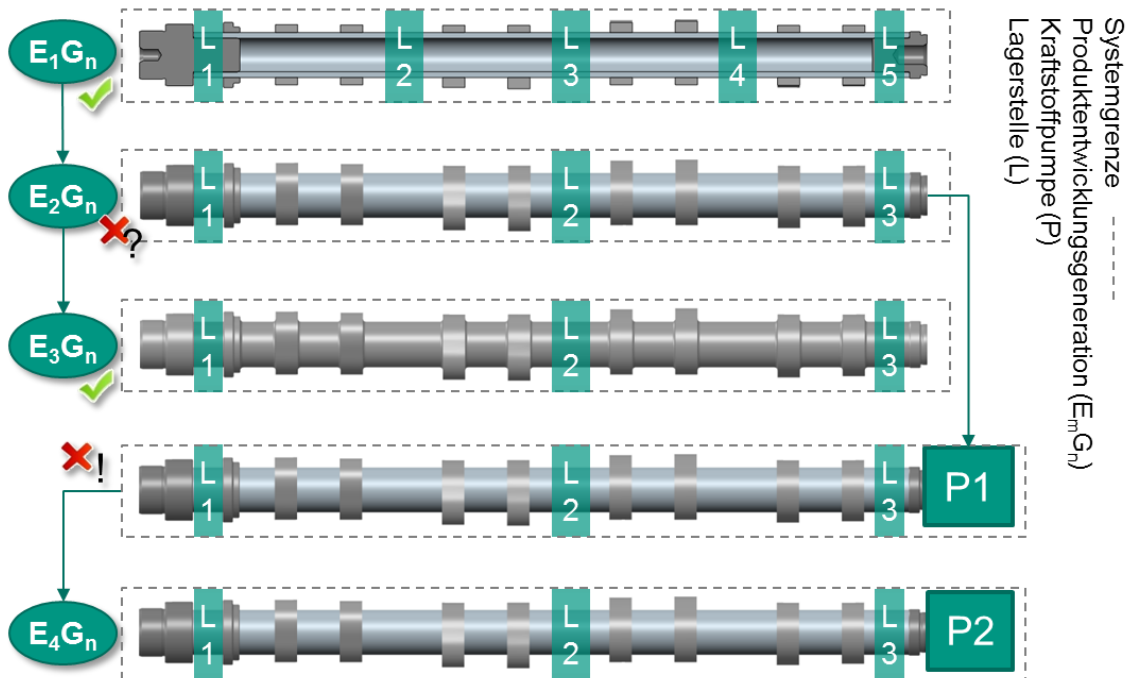


Abbildung 5-6: PGE - Produktgenerationsentwicklung am Beispiel von Produktentwicklungsgenerationen ($E_m G_n$) einer gebauten Nockenwellen für einen 4-Zylinder-Dieselmotor

Mit dem Ziel die Reibleistung zu minimieren wurde, ausgehend von der ersten Nockenwellenentwicklungsgeneration $E_1 G_n$, das Lagerprinzip in Bezug auf die Anzahl der Wirkflächenpaare variiert von ursprünglich fünf auf drei Lagerstellen, was eine korrespondierende Variation der Gestalt des Zylinderkopfes und des Nockenwellenkörpers für die Entwicklungsgeneration $E_2 G_n$ zur Folge hatte. Im Rahmen der Erprobung der $E_2 G_n$ -Nockenwelle im Motorenversuch traten reproduzierbar Schäden an den Nockenwellen auf. Auch nach mehrfachem Abgleich der Versuchsparameter konnte dieser Sachverhalt durch rechnerbasierte Simulation nicht nachgestellt werden, so dass die gebaute Nockenwelle durch eine massive, einteilige Nockenwelle $E_3 G_n$ ersetzt wurde. Durch diese Maßnahme kam es zu keinen weiteren Ausfällen im Rahmen der Erprobung auf dem Prüfstand. Während der Erprobung des Ventiltriebes wurden auch die eingesetzten Nebenaggregate, die von der Nockenwelle angetrieben werden, aus einer vorhergehenden Motorgeneration getestet. Auf Grundlage der Ergebnisse zog der Hersteller in Erwägung, die Kraftstoffpumpe $P1$ zu tauschen. Erst hiernach wurde die Systemgrenze erweitert und die Pumpe mit in die Betrachtungen einbezogen. Die erneute Analyse der Nockenwellenentwicklungsgeneration $E_2 G_n$ förderte zu Tage, dass die Kombination der bislang eingesetzten Pumpe $P1$ mit lediglich drei Lagerstellen durch Drehschwingungsanregung an der bekannten Bruchstelle zum Versagen der Wellen im Motorenversuch führte. Durch den Einsatz

einer anderen Pumpe P2 konnte auf diese Weise die gebaute Nockenwelle E_4G_n mit drei Lagerstellen zur Serienreife gebracht werden.

Das zuvor beschriebene Beispiel soll verdeutlichen, dass die Begriffe „vermeidbar“ und „unnötig“ differenziert betrachtet werden müssen. Die Nockenwellenausfälle hätten im Nachhinein betrachtet möglicherweise, durch die frühzeitige Einbeziehung der Pumpe bei der Analyse des Nockenwellensystems hinsichtlich der Belastbarkeit, vermieden werden können. Da diese Erkenntnis aber für Folgeprojekte zur Verfügung steht, kann hierbei nicht pauschal von einer unnötigen Aktivität gesprochen werden. Unnötig werden derartige Aktivitäten nach Aussagen der Teilnehmer der Fragebogen-Studie erst dann, wenn die gewonnen Erkenntnisse durch unzureichende oder ausbleibende Dokumentation nicht für Folgeprojekte genutzt werden können. Das explizite Wissen darüber, warum eine Konstruktionsaktivität oder eine komplette Variante zunächst Teil des Zielsystems waren und zu einem späteren Zeitpunkt durch eine Konkretisierung des Zielsystems von diesem letztlich ausgeschlossen wurden, ist zum einen entscheidend für die langfristige Sicherung des Firmen-Know-hows und zum anderen unabdingbar im Hinblick auf die effiziente Nutzung vorhandener Konstruktionen für neue Projektanfragen. Die Problemstellung, wie z.B. ein junger Mitarbeiter einer Konstruktionsabteilung für die zu bearbeitende Konstruktionsaufgabe entsprechend passende Referenzprodukte in Form von CAD-Modellen und den dazugehörigen Informationen der Konstruktionshintergründe finden kann, steht hiermit in direkter Verbindung. In diesem Kontext sind nach Aussagen der Umfrageteilnehmer redundante und häufig wiederkehrende Konstruktionsaktivitäten damit begründet, dass es schwierig ist, die in Frage kommenden Lösungen zu identifizieren und diese mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Konstruktionsbeschreibungen auf deren Eignung für die vorliegende Aufgabe fundiert zu bewerten. Daneben sind zudem alle Aktivitäten in der Konzeptentwicklung unnötig, die nicht zielführend für die konkrete Anfrage sind und aus denen keine Erkenntnisse für Folgeprojekte gewonnen werden können, wie z.B. Vor- und Zurückänderungen oder Aktivitäten, die auf Anordnung des Entwicklungsteams gemacht werden müssen, obwohl der Konstrukteur auf Basis seiner Expertise abschätzen kann, dass das Ergebnis aus dieser Konstruktionsaktivität im weiteren Verlauf nicht weiter von Relevanz sein wird.⁵⁴⁰

Auf Basis der Ausführungen des vorigen Abschnitts sind sowohl unnötige als auch vermeidbare Konstruktionsaktivitäten nach Aussage der befragten Konstrukteure Aktivitäten, die für die konkrete Entwicklungsaufgabe nicht zielführend sind. Dabei sind unnötige Aktivitäten grundsätzlich vermeidbar, aber, wie im zuvor beschriebenen In-

⁵⁴⁰ vgl. zusätzlich Anmerkungen und Freitextantworten in Kapitel 11.1.4 im Anhang zu Kapitel 5

dustriebeispiel, sind nicht alle Aktivitäten, die hätten vermieden werden können auch grundsätzlich unnötig. Dieser Zusammenhang veranschaulicht Abbildung 5-7.



Abbildung 5-7: Zusammenhang zwischen vermeidbaren und unnötigen Konstruktionsaktivitäten auf Grundlage der Fragebogen-Studie

Danach stellt die Menge an unnötigen Konstruktionsaktivitäten für die befragten Mitarbeiter eine Teilmenge der vermeidbaren Aktivitäten dar. Der Einfachheit halber wird deshalb im weiteren Verlauf übergeordnet von vermeidbaren Aktivitäten gesprochen.

Im folgenden Fragenblock wurde nach Ursachen von vermeidbaren Aktivitäten und damit zusätzlichen Iterationen während der Festlegung der Konstruktion in der Angebotsphase gefragt (FF1.2).⁵⁴¹ Die Fragen sind in Unterkategorien (1) bis (5) gegliedert. Die folgende Abbildung 5-8 zeigt hierzu zum einen die Antworten aus allen drei Gruppen zu den Ursachen von Zielkonflikten und Unsicherheiten (1), und zum anderen die Ursachen von Zeitdruck (2), und damit die Einschätzung der befragten Mitarbeiter, inwieweit der Faktor Zeit zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten führt.

(1) Auf Grundlage der abgegebenen Antworten führt ein zu früher Konstruktionsbeginn trotz vagem Informationsstand zu Unsicherheiten und Zielkonflikten bei der Festlegung der Konstruktion und kann damit im weiteren Verlauf der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten in Form von zusätzlichen Iterationen führen, weil sich beispielsweise mit zunehmendem Reifegrad des Ziel- und Objektsystems abschätzen lässt, dass die ursprünglich, auf Grundlage unscharfer Informationen gestartete Konstruktion, die geforderten Zielvorgaben nicht erfüllen wird. Als Folge ergibt sich hiernach entweder eine aufwändige Anpassung der bestehenden Modelle (Versionierung), oder es wird eine unabhängige, neue Variante konstruiert.⁵⁴² Der vage Informationsstand hängt direkt mit den vagen Zielvorstellungen des Kunden zusammen was wiederum vage, interne Zielvorstellungen der beteiligten Abteilungen zur Folge hat. Dieser Zusammenhang stellt sich auch im Bewertungsergebnis dar. Daneben werden fachliche Konflikte innerhalb des Projektteams weniger als Ursache für Unsicherheiten und Zielkonflikte gesehen.

⁵⁴¹ vgl. Abbildung 5-2 auf S. 141

⁵⁴² vgl. Abbildung 5-3 auf S. 142

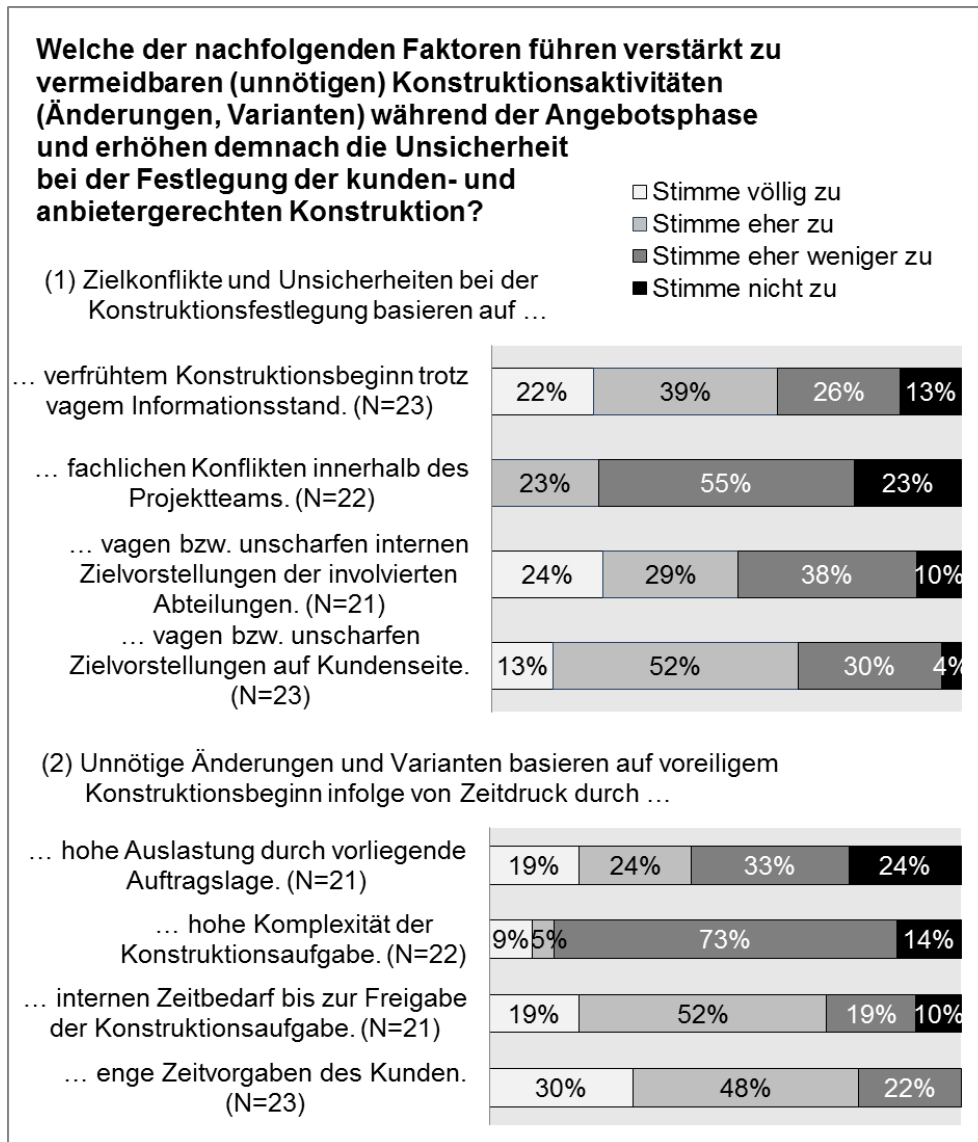


Abbildung 5-8: Zielkonflikte, Unsicherheiten und Zeitdruck als Auslöser vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten

(2) Der Zeitdruck als Ursache für vermeidbare Konstruktionsaktivitäten wird, nach Aussage der Konstruktionsmitarbeiter, in erster Linie durch enge Zeitvorgaben des Kunden beeinflusst. Daneben haben auch der interne Zeitbedarf für die Freigabe der Konstruktionsaufgabe⁵⁴³ sowie die Auslastung der Konstruktionsabteilung einen nennenswerten Einfluss auf den Zeitdruck. Lediglich die Komplexität der Konstruktionsaufgabe hat für den überwiegenden Teil der Befragten einen untergeordneten Einfluss auf die zeitgemäße Bewältigung der Konstruktionsaufgabe.⁵⁴⁴

(3) Das Bewertungsergebnis hinsichtlich des Einflusses des Informationsaustausches auf vermeidbare Konstruktionsaktivitäten ist in Abbildung 5-9 gezeigt.

⁵⁴³ vgl. Abbildung 1-1 auf S. 3

⁵⁴⁴ vgl. Walch & Albers 2014 S. 5



Abbildung 5-9: Informationsaustausch als Auslöser für vermeidbare Konstruktionsaktivitäten

Hierbei wurden kundenseitig unvollständige (ja: 20%; eher ja: 55%) sowie qualitativ ungenügende Kundendaten an erster Stelle genannt (ja: 14%; eher ja: 43%). Bei der dritten Behauptung hinsichtlich der Einflussnahme des Informationsaustausches zum Kunden verteilen sich die Antworten etwa hälftig auf die Ja- und die Nein-Seite. Die Antworten auf die ersten drei Behauptungen sind hierbei in Zusammenhang mit den Bewertungen aus (1) zu sehen, die in Verbindung mit den vagen Zielvorstellungen des Kunden stehen. Aus diesem Grund sind die Verteilungen auf diese Behauptungen ähnlich, d.h., die Anzahl der Bewertungen auf den Ja-Seiten bewegen sich alle im Bereich um 50%. Die Antworten auf die Behauptung, dass der interne Informationsfluss zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten führt, stehen ebenfalls in Verbindung mit den Bewertungsergebnissen hinsichtlich des Zeitbedarfes bis zur internen Freigabe der Konstruktionsaufgabe (2). Dadurch, dass bei verknüpften Fragen sich auch der erwartete Zusammenhang in den Bewertungsergebnissen zeigt, kann davon ausgegangen werden, dass die Teilnehmer die Fragestellungen verstanden haben. Auffällig bei den abgegebenen Stimmen auf die letzte Behauptung ist, dass 42% der Befragten nicht zustimmten, dass eine intransparente Ablage von potentiell

verwendbaren Referenzprodukten das Auftreten vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten begünstigt. Zur detaillierteren Betrachtung sind hierzu die Bewertungen der Teilnehmer nach Produktgruppen aufgeschlüsselt dargestellt.

Die Auflösung der Antworten zur intransparenten Ablage nach Produktgruppen zeigt, dass die 42% der Gesamtauswertung auf die 73% der Produktgruppe 1 zurückzuführen sind, die der Aussage nicht zustimmten. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Produkte, die in den einzelnen Gruppen konstruiert werden, zurückführen. Deutlich wurde, gerade auch im Rahmen von Einzelgesprächen im Nachgang an die Fragebogen-Studie⁵⁴⁵, dass mit zunehmender struktureller Komplexität⁵⁴⁶ der Produkte die Anforderungen an eine entsprechende Ablage und Dokumentation der Konstruktionsabsichten der bestehenden konstruktiven Lösungen steigen. Gerade bei großen Baugruppen mit vielen Unterbaugruppen und Komponenten steigt die Anzahl an Möglichkeiten, diese aus bestehenden Produktlösungen aufzubauen stark an, so dass es folglich schwierig wird, sich für diejenige, abgeleitete Variante zu entscheiden, die sowohl die kunden- als auch die anbieterseitigen Anforderungen und Randbedingungen erfüllt. Dieser Sachverhalt zeigt sich in der produktgruppenaufgelösten Verteilungen der abgegebenen Bewertungen, indem die Kolbenkonstruktoren nur auf der Nein-Seite werten (eher nein; 27%; nein: 73%), die Nockenwellenkonstruktoren der Aussage eher zustimmen (eher ja: 60%; eher nein: 40%) und die Konstrukteure für Zylinderkopfhauben auf der Ja-Seite werten (ja: 67%; eher ja: 33%).

In den beiden abschließenden Unterkategorien zur Identifizierung der Faktoren, die nach Aussage der Umfrageteilnehmer einen Einfluss auf das Auftreten vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten bei der Designfestlegung in der Angebotserstellungsphase haben, wurde einerseits von den Konstrukteuren bewertet, inwieweit die (4) Projektorganisation⁵⁴⁷ zusätzliche Iterationen mit dem entsprechenden Mehraufwand durch Anpassungen, Änderungen und Variantenbildungen begünstigt, und zum anderen, ob der Einsatz der zur Verfügung stehenden (5) Referenzdaten Mehraufwand generieren kann. Bei der Projektorganisation wird an erster Stelle eine globale Ausrichtung als Ursache vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten gesehen.⁵⁴⁸

Aus den Bewertungsergebnissen zu den Ursachen von vermeidbaren Aktivitäten in der Angebotsphase ging hervor, dass insbesondere Änderungsaktivitäten einen bedeutenden Einfluss auf vermeidbare Konstruktionsaktivitäten haben. Aus diesem

⁵⁴⁵ vgl. Durchführung der Fragebogen-Studie im Rahmen der Deskriptiven Studie 1 auf S. 135

⁵⁴⁶ Hiermit ist die Baugruppengröße (ausgehend von Kolbensystemen über Nockenwellensysteme hin zu Zylinderkopfhaubensystemen) hinsichtlich der Anzahl an Unterbaugruppen und Einzelkomponenten gemeint, die ihrerseits viele Konstruktionselemente und Konstruktionsparameter enthalten.

⁵⁴⁷ Abteilungsübergreifende, geschäftsbereichsübergreifende oder global ausgerichtet
Projektorganisation

⁵⁴⁸ Die Verteilungen der Antworten zu (4) und (5) befinden sich im Anhang in Kapitel 11.1.3.

Grund standen hiernach Änderungsarten und korrespondierende Tragweiten im Fokus der Befragung. In diesem Zusammenhang wurde zunächst die Fragestellung adressiert, in welchem Umfang, nach Einschätzung der Konstrukteure, die am Prozess der Angebotserstellung beteiligten Interessensgruppen Änderungsaufträge stellen. Die Ergebnisse in Abbildung 5-10 zeigen, dass nach Aussage der Konstruktionsmitarbeiter sehr viele Iterationen auf Kundenänderungsaufträge zurückzuführen sind (ja: 48%; gelegentlich: 48%).

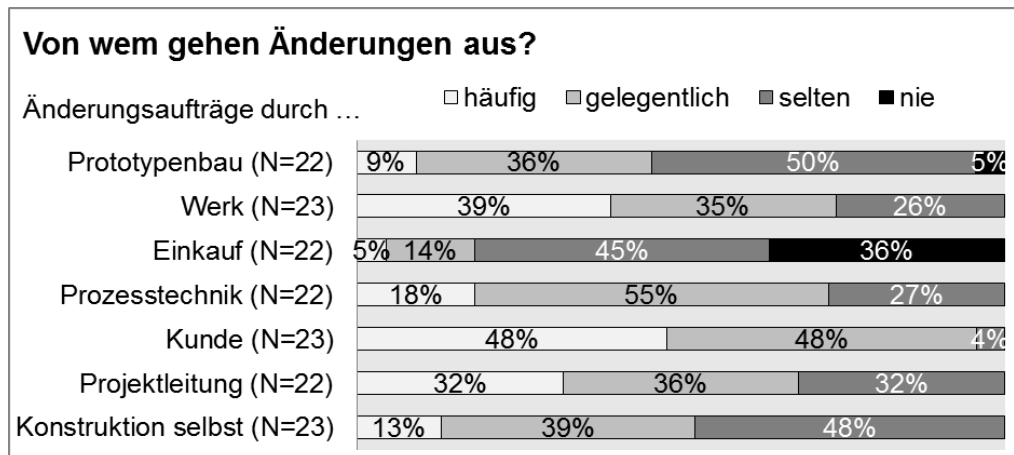


Abbildung 5-10: Auslöser von Änderungsaufträgen während der Festlegung des Designs in der Angebotserstellungsphase

Daneben werden Änderungen durch die interne Projektleitung ausgelöst (häufig: 32%; gelegentlich: 36%). Häufig lassen sich diese Änderungsaufträge auf den Kunden zurückführen, da die Projektleitung mit diesem in direktem Kontakt steht und dessen Änderungsaufträge entsprechend weiterleitet. Der Prototypenbau spielt im Rahmen der Angebotserstellung eine untergeordnete Rolle. Jedoch ist an die Kundenanfrage in den meisten Fällen auch immer ein Termin für die Bereitstellung von ersten Musterteilen geknüpft. Deshalb wird gerade bei aussichtsreichen Anfragen oder solchen, die sich aus derzeitiger Sicht sehr gut als Anschlussprojekte eignen, versucht, bereits die Belange der Musterfertigung mit in die Betrachtungen einzubeziehen, um fundierte Lieferzeiten für das Angebot ermitteln zu können. Mehraufwände können deshalb auch auf Abstimmungsaktivitäten zwischen Konstruktion und dem Prototypenbau zurückgeführt werden (häufig: 9%; gelegentlich: 36%).

Die Einschätzung, inwieweit die Konstruktion selbst Änderungsschleifen generiert, kann teilweise durch Bearbeiterwechsel im Vertretungsfall, Übernahmen von bestehenden CAD-Daten in ein anderes CAD-System oder auch durch verwendete CAD-Startmodelle aus vergleichbaren Vorgängerprojekten erklärt werden. Abhängig von den gegebenen Freiheitsgraden der Konstruktionsaufgabe können auch mehrere Iterationen in Form von Variantenbildung erforderlich werden, um variantenspezifische Bewertungszielgrößen ermitteln zu können, auf Basis derer fundiert entschie-

den werden kann. Der Einkauf ist hingegen aus Sicht der befragten Konstrukteure eher weniger für das Stellen von Änderungsanträgen verantwortlich (häufig: 5%; gelegentlich: 14%), wohlgleich Anfragezeichnungen, die die Einkaufsabteilung für interne und externe Preisanfragen benötigt, auf Grundlage von Praxiserfahrungen vieler befragter Konstrukteure durchaus sehr dynamischen Änderungsprozessen unterliegen. Dies liegt daran, dass die Basis für die Inhalte der Anfragezeichnungen von den Tätigkeiten der Prozesstechnik und den produzierenden Werken abhängt. Die Prozesstechnik beschäftigt sich mit der Planung der Fertigungsprozesse zur wirtschaftlichen Herstellung des Produktes und der dafür erforderlichen Produktionssysteme. Davon direkt betroffen sind die Aktivitäten in den produzierenden Werken, die auf Grundlage der Arbeitsergebnisse der Prozesstechnikabteilung mit den werksintern zur Verfügung stehenden Ressourcen das Produkt im Rahmen einer Serienproduktion herstellen werden. Das Werk kalkuliert dabei in enger Abstimmung mit der Konstruktions- und Prozesstechnikabteilung auf Grundlage der Angebotszeichnungen und den hierfür vom Einkauf angefragten Preisen das Serienprodukt und ist demnach für die Preiskalkulation des Produktes verantwortlich. Häufig werden im Rahmen der Kundenanfrage die Preise des Serienproduktes für verschiedene Stückzahlenszenarien gefordert, diese dann von den Werken über die Projektleitung vom Vertrieb an den Kunden im Rahmen des Angebotes übermittelt werden.⁵⁴⁹ Zwischen der Prozesstechnik, der Konstruktion und den Produktionswerken kommt es deshalb häufig zu Iterationen im Rahmen der Abstimmungsaktivitäten hinsichtlich des Produktes und der erforderlichen Produktionssysteme. Dies zeigt sich in den Bewertungsergebnissen in Abbildung 5-10. Dabei werden nach Einschätzung der Konstrukteure die produzierenden Werke (häufig: 39%; gelegentlich: 35%) häufiger als Auslöser für Änderungsaktivitäten genannt als die Prozesstechnikabteilung (häufig: 18%; gelegentlich: 55%).

Die Prozesstechnik und die Werke stellen bzgl. der Möglichkeit einer methodischen Unterstützung zur Reduktion der Änderungsschleifen zentrale Angriffspunkte dar, da die Konstruktionsaktivitäten, die zur Abstimmung zwischen Produkt und den geplanten bzw. tatsächlich verfügbaren Herstellprozessen in den Werken erforderlich sind, stark änderungsintensive Konstruktionsinhalte umfassen. Als Ursache für die hohe Änderungsintensität werden insbesondere zusätzliche Iterationen im Rahmen der Planung des Produktes und der korrespondierenden Produktionssysteme genannt, die, nach Aussage der befragten Konstrukteure, häufig auf die eingeschränkten Möglichkeiten zurückgeführt werden können, funktionsbestimmende Produkt- und Prozesszielgrößen zu einem frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase bewerten zu kön-

⁵⁴⁹ vgl. Abbildung 1-1 auf S. 3

nen.⁵⁵⁰ Der Hauptkonflikt ist dabei darin zu sehen, dass sich diese relevanten Bewertungsgrößen, wie beispielsweise Herstellkosten und sämtliche an die Bauteilgeometrie gebundenen Produkteigenschaften (z.B. Masse, Steifigkeiten und Trägheiten), nicht auf Subsystemebene, sondern erst auf Gesamtsystemebene ergeben. Die Auswirkungen von Änderungen an Subsystemen, Herstell- und Montageprozessen lassen sich deshalb erst auf Gesamtsystemebene beurteilen.

Daran anknüpfend stellt sich mit Bezug auf die Tragweite von Änderungen die Frage, auf Grundlage welcher Arbeitsergebnisse aus den Konstruktionsabteilungen in Form von Zeichnungen und Modellen Änderungsentscheidungen getätigt werden.⁵⁵¹ Hervorzuheben ist, dass neben Änderungsentscheidungen auf Grundlage von Preisfragezeichnungen, 3D-Entwürfen, verkaufsfertigen Detailzeichnungen, Gesamtsystementwurfszeichnungen oder einer möglichen Gleichteilstrategie, Änderungen häufig auf Grundlage ganzer Zeichnungssätze⁵⁵² getätigt werden, d.h., auf Basis von Entwurfszeichnungssätzen (häufig: 37%; gelegentlich: 42%) sowie ausdetaillierten Zeichnungssätzen (häufig: 23%; gelegentlich: 45%). Anschließend Änderungen am Fertigungskonzept wirken sich auf die gesamte Konstruktion aus und haben demnach eine aufwändige Überarbeitung des kompletten Zeichnungssatzes zur Folge.

Die letzte Frage der Studie adressiert direkt die Einschätzung der Konstruktionsmitarbeiter hinsichtlich des Bedarfes an Unterstützung im Rahmen der Anpassungs- und Variantenkonstruktion in der Angebotsphase (FF1.3). Die Abbildung 5-11 zeigt die Verteilung der abgegebenen Bewertungen aus allen drei Produktgruppen sowie die gruppenspezifischen Bewertungen. Das Gesamtergebnis zeigt, dass sich die Mehrheit eine Unterstützung durch ein Werkzeug vorstellen kann (ja: 40%; eher ja: 30%). Die gruppenspezifische Auflösung der Bewertungen zeigt ferner, dass der Bedarf an Unterstützung, ausgehend von Produktgruppe 1 (ja: 30%; eher ja: 30%), über Gruppe 2 (ja: 50%; eher ja: 17%) nach Gruppe 3 (ja: 50%; eher ja: 50%) zunimmt.

Auf Basis dieses Sachverhalts, der zusätzlich durch Einzelgespräche zwischen Autor und Studienteilnehmern im Nachgang an die Fragebogen-Studie gestützt wird, kann darauf geschlossen werden, dass der Bedarf an Unterstützung mit der Größe der Baugruppe und damit der strukturellen Komplexität des Produktes zunimmt.⁵⁵³

⁵⁵⁰ vgl. zusätzlich Anmerkungen und Freitextantworten in Kapitel 11.1.4 im Anhang zu Kapitel 5

⁵⁵¹ Die Ergebnisse hierzu befinden sich im Anhang in Kapitel 11.1.3.

⁵⁵² Ein Zeichnungssatz besteht aus Roh- und Fertigteilzeichnungen von Komponenten sowie Zeichnungen von Vormontagebaugruppen, Fertigungszwischenständen und dem Gesamtsystem.

⁵⁵³ vgl. Erläuterungen zur Deskriptive Studie 1 (DRM: Descriptive Study I) auf S. 135

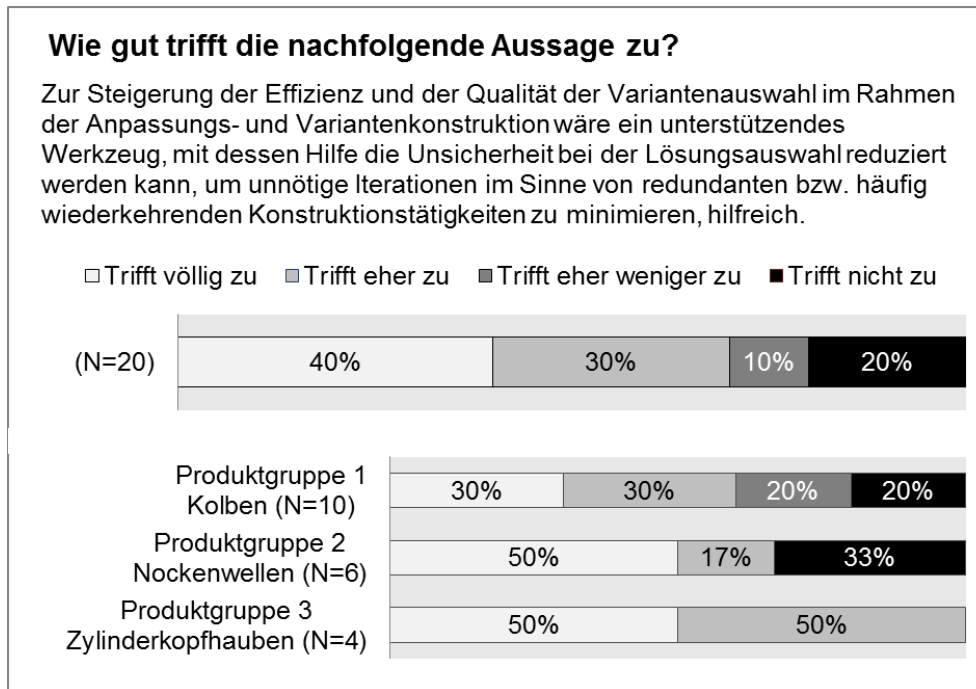


Abbildung 5-11: Einschätzung des Bedarfes an Unterstützung bei der Variantenauswahl in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion zur Steigerung der Effizienz und der Qualität

Zusammenhang zwischen Unterstützungsbedarf, Einschätzung des Auftretens vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten und Berufserfahrung

Anknüpfend an den zuvor beschriebenen Zusammenhang zwischen der Komplexität des Produktes und dem Bedarf an Unterstützung wird abschließend zur Diskussion der Ergebnisse aus der Fragebogen-Studie untersucht, ob es auf Basis der erhobenen Daten weitere Zusammenhänge zwischen dem Bedarf an Unterstützung⁵⁵⁴ und dem Auftreten vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten⁵⁵⁵ mit der Berufserfahrung der Konstrukteure⁵⁵⁶ sowie mit der Verteilung der Konstruktionsaktivitäten auf Konstruktionsarten⁵⁵⁷ und Projekttypen⁵⁵⁸ gibt.⁵⁵⁹

Die folgende Abbildung 5-12 zeigt hierzu die Abhängigkeiten zwischen der Berufserfahrung und der Einschätzung hinsichtlich dem Auftreten an vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten in der Angebotsphase (links) und dem Bedarf an Unterstützung zur Steigerung der Effizienz und der Qualität der Variantenauswahl (rechts). Im linken

⁵⁵⁴ vgl. Abbildung 5-11 auf S. 155

⁵⁵⁵ vgl. Abbildung 5-4 auf S. 144

⁵⁵⁶ Eine Aufschlüsselung nach Berufserfahrung der Mitarbeiter in kleiner und größer gleich zehn Jahre Erfahrung in der Konstruktionspraxis ist in Abbildung 5-1 auf S. 139 aufgeführt.

⁵⁵⁷ Neu- oder Anpassungs- und Variantenkonstruktion im Kontext der Abbildung 5-3 auf S. 142

⁵⁵⁸ Serienprojekte, VoC-Projekte, Werksunterstützungsprojekte oder Vorentwicklungsprojekte

⁵⁵⁹ Die Einschätzungen der Konstrukteure hinsichtlich der Verteilung ihrer Konstruktionsaktivitäten auf Projekttypen und auf Konstruktionsarten sind im Anhang in Kapitel 11.1.3 in Abbildung 11-4 und Abbildung 11-5 gezeigt.

Balkendiagramm ist zu erkennen, dass alle 11 Konstrukteure, die weniger als 10 Jahre Berufserfahrung haben, der Aussage zustimmen, dass es bei der Designfestlegung in der Angebotserstellungsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt. Demgegenüber stehen 33% der Konstrukteure mit einer Berufserfahrung von über 10 Jahren, die dieser Aussage nicht zustimmen. Aus Gesprächen im Nachgang an die Fragebogen-Studie wurde deutlich, dass erfahrene Konstruktionsmitarbeiter durch ihre mehrjährige Konstruktionserfahrung und ihr produktspezifisches Expertenwissen die Anforderungen und Abhängigkeiten eine Konstruktionsaufgabe bereits im Vorfeld besser überblicken und bewerten können. Demgegenüber stehen jungen Konstruktionsmitarbeiter, die die Abhängigkeiten und wechselseitigen Beziehungen der geforderten Konstruktionsaufgabe aufgrund der geringeren Erfahrung noch nicht so gut abschätzen können, weshalb es tendenziell eher zu zusätzlichen Iterationen in Form von Anpassungen und Änderungen an der aktuellen Konstruktion kommt. Daneben gibt es auch über die Jahre entstandene Gewöhnungseffekte an etablierte Konstruktionsabläufe, die von jungen Mitarbeitern mit den in ihrer beruflichen Ausbildung erlernten Konstruktionsmethoden verglichen und hinterfragt werden.

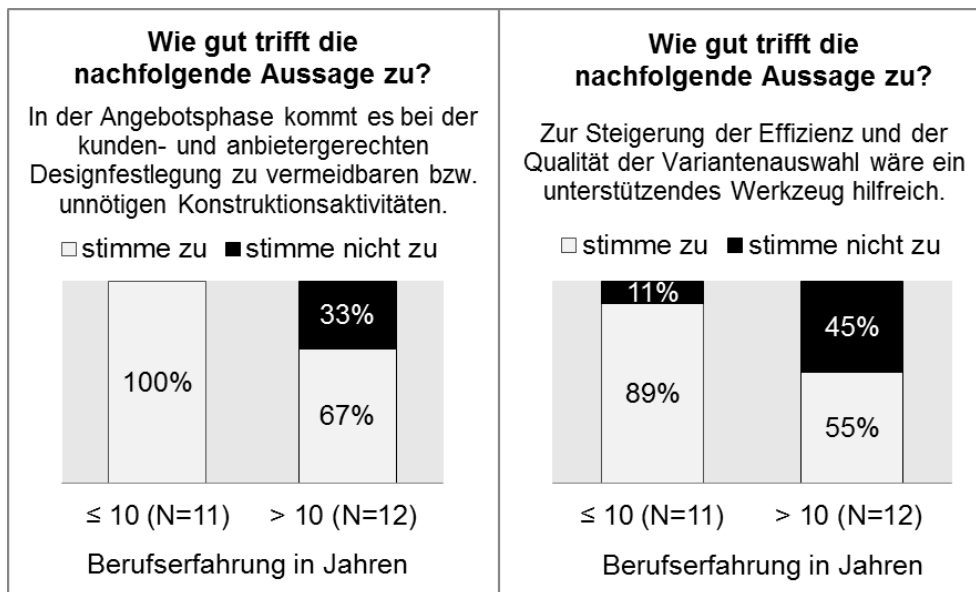


Abbildung 5-12: Bewertungsergebnis in Bezug auf die beiden Aussagen zur Einschätzung des Auftretens von vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten und dem Bedarf an Unterstützung in Abhängigkeit der Berufserfahrung

Das Ergebnis im rechten Diagramm in Abbildung 5-12 zeigt, dass sich 89% der jüngeren Mitarbeiter eine Unterstützung bei der Variantenauswahl durch ein entsprechendes Werkzeug vorstellen können. Daneben stimmen 45% der erfahrenen Konstrukteure der Steigerung der Effizienz und der Qualität der Variantenauswahl durch ein entsprechendes Werkzeug nicht zu. Die Ergebnisse sind im Zusammenhang mit den Ergebnissen des linken Diagramms zu sehen, d.h., jüngere Mitarbeiter stimmen der Aussage zu, dass es zu vermeidbaren Aktivitäten bei der Designfestlegung

kommt und bedürfen deshalb eher Unterstützung. Auf der anderen Seite gibt es erfahrene Mitarbeiter, die die Einschätzung nicht teilen, dass es vermeidbare Konstruktionsaktivitäten in der Angebotserstellungsphase gibt, weshalb auch der Prozentsatz für die Zustimmung für eine Unterstützung der Variantenauswahl geringer ausfällt.⁵⁶⁰

Im nächsten Schritt wurde detaillierter betrachtet, ob es einen Zusammenhang zwischen der Einschätzung zum Auftreten vermeidbarer Aktivitäten und der Konstruktionsart sowie dem Projekttyp gibt. Auf die Fragestellung, wie viele von denjenigen Mitarbeiter, die sich mit mehr als 50% in ihrer täglichen Arbeit mit Varianten- und Anpassungskonstruktion oder mit Konstruktionen für Serienprojekte auseinandersetzen, auch mehr Unterstützung fordern, kann auf Grundlage der Auswertung der Häufigkeiten kein Zusammenhang erkannt werden. Dies trifft gleichermaßen auf den Zusammenhang zwischen dem Bedarf an Unterstützung und der Konstruktionsart sowie dem Projekttyp zu. Auch hier kann auf Basis der Auswertung der Häufigkeiten auf keine signifikanten Zusammenhänge geschlossen werden.⁵⁶¹

Zur detaillierteren Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Berufserfahrung, Konstruktionsart und Projekttyp mit der Einschätzung zu vermeidbaren Aktivitäten und dem Bedarf an Unterstützung, wurden die erhobenen, ordinal⁵⁶² skalierten Daten auf Korrelationen untersucht. Zur statistischen Datenanalyse wurde hierfür SPSS⁵⁶³ eingesetzt. Zur Messung des Zusammenhangs zwischen ordinal skalierten Variablen eignet sich die Ermittlung des Rangkorrelationskoeffizienten Rho nach Spearman⁵⁶⁴. Hierbei werden zunächst die Variablenwerte in Rangwerte umgerechnet. Im Anschluss daran werden die Korrelationskoeffizienten nicht für die ursprünglichen Variablenwerte, sondern auf Basis der ermittelten Rangwerte berechnet. Spearmans Rho wird, wie der Korrelationskoeffizient nach Pearson, für nominalskalierte Variablen⁵⁶⁵ berechnet mit dem einzigen Unterschied, dass nicht Variablenwerte sondern Rangwerte zugrunde gelegt werden.

Die Analyse der Daten mittels SPSS ergab, dass der Bedarf an Unterstützung sowohl von der Konstruktionsart als auch vom Projekttyp unabhängig ist, da die ermittelten Korrelationskoeffizienten nach Spearman keinen signifikanten Zusammenhang zeigen. Das gleiche Ergebnis ergab auch die Analyse der Einschätzung des Auftre-

⁵⁶⁰ Gründe hierfür können sein, dass sich (1) Entwickler auf ihre langjährige Erfahrung berufen und deshalb einer methodischen Unterstützung skeptisch gegenüber stehen, oder (2) nicht gewillt sind, langjährig aufgebaute Gewohnheiten zu ändern und an eine neue Methode anzupassen.

⁵⁶¹ Die Auswertungen sind im Anhang in Kapitel 11.1.3 in Vier- bzw. Achtfelder-matrizen dargestellt.

⁵⁶² Ordinal skalierte Variablen lassen sich eindeutig in einer Rangfolge anordnen, wobei die Distanzen zwischen den Kategorien (z.B. (1) ja, (2) eher ja, (3) eher nein, (4) nein) nicht quantifizierbar sind.

⁵⁶³ IBM SPSS Statistics (Version 21) ist ein umfangreiches Programm zur statistischen Datenanalyse

⁵⁶⁴ vgl. Brosius 2013 S. 525 ff.

⁵⁶⁵ vgl. Brosius 2013 S. 432 ff.

tens an vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten, die ebenfalls unabhängig von Projekttyp und Konstruktionsart ist. Ein Zusammenhang besteht aber zwischen der Berufserfahrung und dem Bedarf an Unterstützung sowie der Berufserfahrung und der Einschätzung hinsichtlich des Auftretens vermeidbarer Aktivitäten im Rahmen der Designfestlegung in der Angebotserstellungsphase. Jedoch gibt es keinen nennenswerten, direkten Zusammenhang zwischen dem Bedarf an Unterstützung und der Einschätzung hinsichtlich vermeidbarer Aktivitäten. Dieser Zusammenhang besteht nur indirekt über die Berufserfahrung. Dieser Sachverhalt und die dazu gehörenden Ergebnisse der Datenanalyse nach Spearman sind in der folgenden Abbildung 5-13 dargestellt. Neben dem Korrelationskoeffizienten (Rho) ist auch die Signifikanz (Sig.) der Stichprobe (N) angegeben.⁵⁶⁶

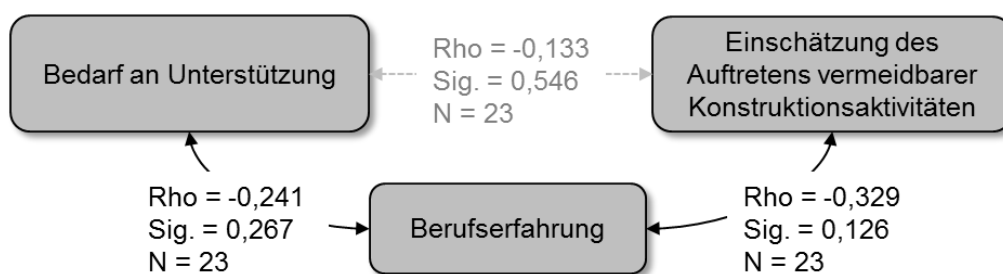


Abbildung 5-13: Zusammenhang zwischen dem Unterstützungsbedarf, der Einschätzung hinsichtlich des Auftretens vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten und der Berufserfahrung

Gemäß der Analyseergebnisse aus Abbildung 5-13 besteht zwischen der Berufserfahrung und der Einschätzung hinsichtlich des Auftretens an vermeidbaren Aktivitäten ein negativer Zusammenhang nach Spearmans Rho von -0,329 bei einer Stichprobengröße von 23 und einer Signifikanz von 12,6%. Dies bedeutet, dass Konstrukteure mit geringer Berufserfahrung das Auftreten von vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten eher höher einschätzen. Zwischen der Berufserfahrung und dem Bedarf an Unterstützung besteht bei einer Stichprobengröße von 23 und einer Signifikanz von 26,7% ebenfalls ein negativer Zusammenhang nach Spearmans Rho von -0,241. Dies ist derart zu interpretieren, dass Konstrukteure mit geringer Berufserfahrung bei der Designfestlegung in der Angebotserstellungsphase eher mehr Unterstützung haben möchten als erfahrene Konstruktionsmitarbeiter. Die Ergebnisse bestätigen demzufolge die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Interpretationen auf Grundlage von Abbildung 5-12. Zwischen dem Unterstützungsbedarf und der Einschätzung hinsichtlich vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten besteht bei einer Stichprobengröße

⁵⁶⁶ vgl. Brosius 2013 S. 523 f.: Die Signifikanz ist die Wahrscheinlichkeit, mit der sich in einer Stichprobe des vorliegenden Umfangs auch dann ein Korrelationskoeffizient der beobachteten Größenordnung ergeben kann, wenn in der Grundgesamtheit tatsächlich überhaupt kein (linearer) Zusammenhang zwischen den Variablen vorliegt.

von 23 und eine Signifikanz von 54,6% ein lediglich schwacher, negativer Zusammenhang nach Spearmans Roh von -0,133.

Im nächsten Kapitel wird die produktgruppenabhängige Eignung der Methode näher untersucht.⁵⁶⁷ Auf Basis der Ergebnisse im Hinblick auf die Einschätzung des Auftretens an vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten⁵⁶⁸, der Bewertungen zur transparenten Ablage existierender Vorarbeiten⁵⁶⁹ sowie der abschließenden Frage zum Bedarf an Unterstützung⁵⁷⁰ konnte belegt werden, dass mit steigender Komplexität des Produktes in Bezug auf die Anzahl an kombinierbaren Einzelkomponenten, Konstruktionselementen und Unterbaugruppen, der Bedarf an Unterstützung steigt. Demnach ist der Bedarf der Konstrukteure aus den Produktgruppen der Nockenwellensysteme (2) und der Zylinderkopfhaubensysteme (3) höher, als der der Kolbenkonstrukteure (1). Zur Untersuchung der produktgruppenspezifischen Methodeneignung wurde ein Fragenkatalog ausgearbeitet, der im folgenden Unterkapitel vorgestellt wird.

5.1.2 Bewertung der produktspezifischen Methodeneignung

Bei der Bewertung der produktspezifischen Methodeneignung⁵⁷¹ steht das Ziel im Vordergrund, vor der detaillierten Ausarbeitung der Methode und darauf aufbauend der Operationalisierung der Methode im Rahmen eines anwendbaren Softwareprototyps, zunächst Zielgruppenkonstrukteure zu identifizieren, die in der Anwendung einer Methode zur Unterstützung der Designfestlegung in der Angebotsphase einen Mehrwert und damit einen Nutzen sehen für ihre tägliche Arbeit.

Auf Basis der Konzeptentwicklung aus Sicht des fallgebenden Zulieferunternehmens⁵⁷², der Methodenbeschreibung⁵⁷³ sowie den Ergebnissen aus der Fragebogenstudie und den persönlichen Erfahrungsberichten von Experten aus allen drei Konstruktionsabteilungen wurden zehn Zielkriterien definiert, die sowohl das Produkt als auch die korrespondierenden Kundenanfragen charakterisieren, für die eine methodische Unterstützung auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse nutzenstiftend ist. Die zehn Zielkriterien K1 bis K10 sind nachfolgend aufgeführt. Mit Hilfe einer Paarvergleichsmatrix wurden die Kriterien gewichtet, wobei die in Klammer angegebene Reihenfolge der Zielkriterien resultierte.

⁵⁶⁷ Die Grundlage für die Untersuchung zur produktspezifischen Methodeneignung bildet die in der Deskriptiven Studie 1 (vgl. Abbildung 4-2 auf S. 134) bereits vorhandene Methodenskizze entsprechend Abbildung 5-15 auf S. 162.

⁵⁶⁸ vgl. Abbildung 5-5 auf S. 145

⁵⁶⁹ vgl. Abbildung 5-9 auf S. 150

⁵⁷⁰ vgl. Abbildung 5-11 auf S. 155

⁵⁷¹ siehe Fußnote 567

⁵⁷² vgl. Konzeptentwicklung im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens auf S. 53 ff.

⁵⁷³ vgl. Walch & Albers 2014

Produkt und korrespondierende Anfragen charakterisieren sich durch ...

- K1 ... häufig wiederkehrende, auftragsbezogene Produkthanforderungen. (9)
- K2 ... hoher Anteil an Anfragen auf Basis von Kundenzeichnungen. (9)
- K3 ... hoher Anteil an Anpassungs- und Variantenkonstruktion auf Basis bestehender Produkte. (6)
- K4 ... Varianten lassen sich gut auf Basis eines Baukastens ableiten. (7)
- K5 ... gute Standardisierbarkeit der bestehenden Konstruktionen. (8)
- K6 ... hohe Anzahl an kombinierbaren Einzelteilen. (2)
- K7 ... hohe Anzahl an funktionsrelevanten Produkteigenschaften. (4)
- K8 ... gute Parametrisierbarkeit zur Ermittlung geometriegebundener Produktanforderungen. (3)
- K9 ... Teile und Produkteigenschaften überwiegend nicht unabhängig voneinander kombinierbar. (5)
- K10 ... relevante Bewertungszielgrößen lassen sich erst auf Basis der fertigen Konstruktion ermitteln. (1)

Die definierten und gewichteten Zielkriterien können produktabhängig unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Aus diesem Grund wurden für alle zehn Zielkriterien Ausprägungen⁵⁷⁴ definiert. An die Auswahl der zutreffenden Ausprägungen ist eine Punktzahl geknüpft. Dabei ergibt sich die Bewertung eines Zielkriteriums indem beispielsweise bei drei möglichen Ausprägungen eines Kriteriums die Positionszahl der gewählten Ausprägung auf die Anzahl der Gesamtauswahlmöglichkeiten normiert und mit der Gewichtung des Zielkriteriums multipliziert wird.⁵⁷⁵ Die Abbildung 5-14 zeigt hierzu einen Auszug aus dem Tabellenblatt zur Bewertung der Methodeneignung.⁵⁷⁶ Als Mindestanforderungen für die produktspezifische Methodeneignung wurden die in Abbildung 5-14 ausgewählten Ausprägungen für die zehn Kriterien aufgestellt, die auf Grundlage der Aussagen der Nockenwellenkonstrukteure im Rahmen der Fragebogen-Studie abgeleitet wurden. Diese Auswahl ergibt eine Mindestbewertung von 80%. Insbesondere auf Basis der Diskussionen mit einzelnen Teilnehmern sowie der mehrjährigen Beobachtung des Autors als Konstrukteur für Nockenwellensysteme, kann eine Eignung der Methode zur Unterstützung der Variantenkonstruktion in der Angebotsphase für den Bereich der Nockenwellenkonstruktion empfohlen werden.

⁵⁷⁴ vgl. Anhang Kapitel 11.1.5

⁵⁷⁵ vgl. Zangemeister 1976

⁵⁷⁶ vgl. Anhang Kapitel 11.1.6

80%	Bitte zutreffende Ausprägung auswählen	
K1	Bauteilanforderungen sind meist eine Untermenge eines gleichbleibenden Anforderungskatalogs.	▼
K2	Kundenseitige Konzeptskizzen mit entsprechenden Randbedingungen.	▼
K3	25 - 50%	▼
K4	Es ist denkbar, einen produktspezifischen Baukasten zu definieren.	▼
K5	Es können Kompatibilitätsregeln für Bauteile und Produkteigenschaften festgelegt werden.	▼
K6	3 - 10	▼
K7	Anzahl führt dazu, dass die Beziehungen und Abhängigkeiten schwierig zu überblicken sind.	▼
K8	Relevante Geometriefeatures sind gut parametrisierbar.	▼
K9	Ja, da Teile und Eigenschaften durch vernetzte Beziehungen nur bedingt modular austauschbar sind.	▼
K10	Bewertungszielgrößen ergeben sich erst nach Anpassung der Einzelteile auf Baugruppenebene.	▼

Abbildung 5-14: Auszug aus dem Tabellenblatt zur Bewertung der Methodeneignung

Dabei gibt es drei kritische Kriterien K4, K5 und K6, die mit mindestens den gezeigten Ausprägungen entsprechend Abbildung 5-14 bewertet werden müssen. Bei einer Unterschreitung dieser Werte kann die Methode nicht für das vorliegende Produkt empfohlen werden. Als Anhaltwerte werden, ausgehend von der 80%-Bewertung, die in Tabelle 5-1 aufgeführten Wertebereichen vorgeschlagen.

Anwendbarkeit	sehr gut	gut	prinzipiell ja	weniger	nicht
Wertebereich	> 90%	90% - 80%	79% - 60%	59% - 45%	<45%
Methodeneinsatz	empfohlen		diskutabel	nicht empfohlen	

Tabelle 5-1: Wertebereiche für die Bewertung des produktspezifischen Methodeneinsatzes

Aus der Bewertung der Methodeneignung durch Vertreter der Konstruktionsgruppen 1 (Kolben) und 2 (Nockenwellen) gingen die Nockenwellenkonstrukteure als die Zielgruppenkonstrukteure hervor.⁵⁷⁷ Zu den Zielgruppenkonstrukteuren werden auch die Mitarbeiter der Zylinderkopfhaubenkonstruktion (Gruppe 3) gezählt, da hier die strukturelle Komplexität nochmal höher ist als bei Nockenwellensystemen.

Zur besseren Ausrichtung der Methode an den Zielgruppenkonstrukteuren dienen die Ergebnisse zu einem weiteren Fragebogenblock, der, auf Basis einer ersten Methodenskizze, die Einschätzung des generellen Methodenpotentials adressiert. Diese Ergebnisse werden im folgenden Unterkapitel diskutiert.

⁵⁷⁷ vgl. Bewertungsergebnis zur Methodeneignung im Anhang in Kapitel 11.1.7: Die Bewertung für den Nockenwellenbereich ergab ein Ergebnis von 94,6% und liegt dabei entsprechend im empfohlenen Bereich. Die Bewertung durch drei Vertreter aus der Produktgruppe 1 (Kolben) resultierte in einer durchschnittlichen Bewertung von 71,9% und liegt dabei im diskutablen Bereich. Das Bewertungsergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Fragebogen-Studie, dass der Bedarf an Unterstützung mit der Größe der Baugruppe und damit mit der strukturellen Komplexität des Produktes entsprechend Abbildung 5-11 auf S. 155 zunimmt.

5.1.3 Akzeptanz und Potential der Methode

Vor der konkreten Erarbeitung der Methode wurden den Zielgruppenkonstrukteuren⁵⁷⁸ im Rahmen der Fragebogen-Studie zusätzlich Fragen zur Methodenakzeptanz und zum Methodenpotential gestellt. Hiermit wurde das Ziel verfolgt zu prüfen, ob die Methode nach Einschätzung der befragten Experten das Potential hat, den ange-dachten Mehrwert aus Sicht des fallgebenden Zulieferunternehmens hinsichtlich einer Effizienzsteigerung der Anpassungs- und Variantenkonstruktion in der Angebotsphase zu erfüllen. Hierzu wurde die nachfolgende Methodenskizze verwendet.⁵⁷⁹

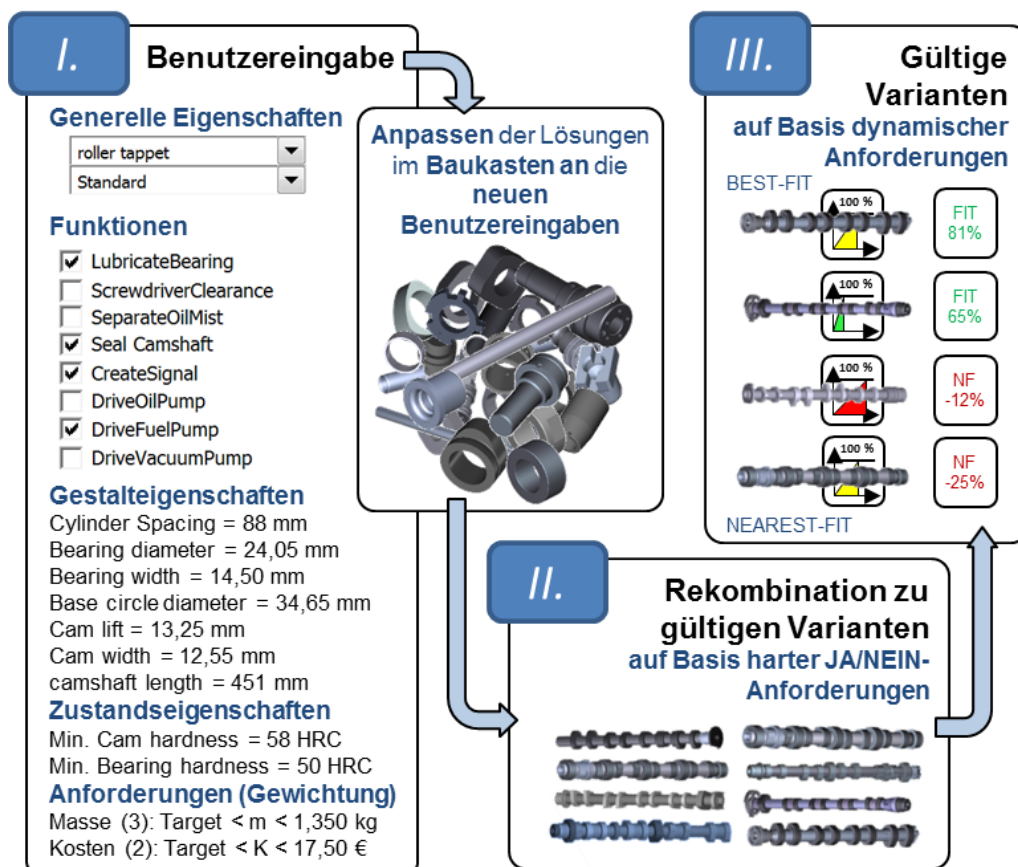


Abbildung 5-15: Methodenskizze aus dem Basisfragebogen der Fragebogen-Studie⁵⁸⁰

Entsprechend der in Abbildung 5-15 gezeigten Methodenskizze werden auf Basis der Benutzereingaben (I) und der im Baukasten zur Verfügung stehenden Lösungen zunächst gültige Varianten generiert, die die Anforderungen ohne Toleranzbereich (z.B. hinsichtlich geforderter Funktion) erfüllen (II). Die verbleibenden Varianten werden dann auf diejenigen reduziert, die den emergenten Anforderungen (z.B. die Masse),

⁵⁷⁸ Entsprechend Kapitel 5.1.2 sind das Nockenwellen- und Zylinderkopphaubenkonstrukteure.

⁵⁷⁹ Im Rahmen der Deskriptiven Studie 1 war die Methode mit dem in der Methodenskizze beschriebenen Reifegrad bereits vorhanden.

⁵⁸⁰ vgl. BLOCK 4 des Basisfragenbogens in Kapitel 11.1.2.

die sich erst durch die Anpassung der bestehenden Lösungen an die aktuellen Benutzereingaben ergebenden, erfüllen (III).

Die Entscheidungsunterstützung basiert dabei auf der Ermittlung der nachfolgenden Kennwerte auf Systemebene der gültigen Bauteilkombinationen (Varianten):

FIT: Welche auf Basis existierender Lösungen abgeleiteten Varianten passen?

BEST-FIT: Wie gut erfüllen die in Frage kommenden Varianten die Anforderungen?

NEAREST-FIT: Wie weit liegen diejenigen Varianten, die die FIT-Bedingung auf Basis der weichen Anforderungen nicht mehr erfüllen, daneben?

100%-Bedingung: Wie hoch ist der Aufwand, die 100% zu erreichen?

Die zum Zeitpunkt der Fragebogen-Studie vorgeschlagenen Kennwerte zur Entscheidungsunterstützung wurden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens konkretisiert und deren Ermittlung im wissenschaftlichen Erklärungsmodell zur Methode beschrieben.⁵⁸¹ Erweitert wurde die Entscheidungsunterstützung durch die Einbindung variantenspezifischer Gestalt- und Übernahmevarianteanteile auf Grundlage der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS.⁵⁸²

Im Rahmen der erweiterten Fragebogen-Studie wurden die Konstrukteure gefragt, ob sie sich vorstellen können, ein auf der Methodenskizze in Abbildung 5-15 basierendes Entwicklungswerkzeug zur Unterstützung bei der Anpassungs- und Variantenkonstruktion in der Angebotsphase einzusetzen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 5-16.

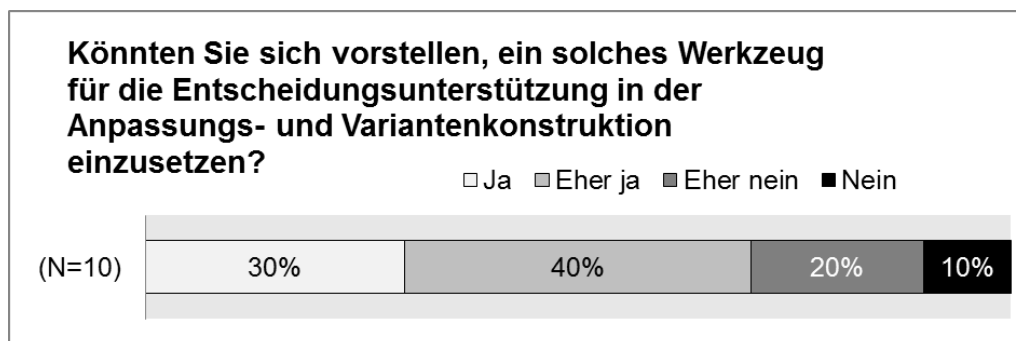


Abbildung 5-16: Einschätzung hinsichtlich des Praxiseinsatzes der in Block 4 des Basisfragebogens skizzierten Methode durch ein entsprechendes Werkzeug

Demnach sind sieben von zehn Konstrukteure (ja: 30%; eher ja 40%) der Meinung, dass ein derartiges Werkzeug ihre täglichen Konstruktionsaktivitäten im Rahmen der Anpassungs- und Variantenkonstruktion unterstützen kann.

⁵⁸¹ vgl. Walch & Albers 2014

⁵⁸² vgl. Kapitel 6

Des Weiteren sind neun der Befragten der Auffassung, dass die Anwendung des Werkzeuges die Entscheidung unterstützen kann, jedoch die finale Entscheidung für das konkrete Design durch den Konstrukteur getroffen wird. Danach wird implizit seitens der befragten Konstrukteure eine menschenzentrierte Methode⁵⁸³ bevorzugt, bei der der entwickelnde Konstrukteur auf Basis seiner Expertise methodenunterstützt in Zusammenarbeit mit dem Entwicklungsteam die zielführenden Konstruktionsentscheidungen fällt. Dies äußert sich auch darin, dass für ein zukünftiges Entwicklungswerkzeug auch eine teilautomatisierte Anwendung (eher ja: 80%; eher nein: 20%) akzeptiert werden würde, und dass die überwiegende Mehrzahl ein nachvollziehbares Bewertungsergebnis haben möchten (ja: 78%, eher ja: 22%).⁵⁸⁴

Mit Bezug auf das Potential eines zukünftigen Werkzeuges auf Grundlage der vorhergehenden Methodenskizze⁵⁸⁵ stimmten neun von elf Konstrukteuren der Aussage zu (ja: 36%; eher ja: 45%), dass der Einsatz eines derartigen Werkzeuges die Entscheidungsqualität erhöhen kann, da auf das in Konstruktionen aus abgeschlossenen Entwicklungsprojekten gespeicherte Wissen für neue Kundenanfragen zurückgegriffen werden kann. Hervorzuheben ist noch, dass durch den Einsatz eines derartigen Entwicklungswerkzeuges durchaus Wettbewerbsvorteile gesehen werden, indem Kunden auf deren Anfragen eine zeitnahe Rückmeldung gegeben (ja: 27%, eher ja: 36%) und demnach der Auswahlprozess in der Angebotsphase beschleunigt werden kann (ja: 18%, eher ja: 55%).⁵⁸⁶

Die Ergebnisse aus der erweiterten Fragebogen-Studie zeigen, dass nach Meinung der Mehrheit der befragten Nockenwellen- und Zylinderkopfhaubenkonstrukteure die Anforderungen an ein Werkzeug zur Effizienzsteigerung der Anpassungs- und Variantenkonstruktion in der Angebotsphase durch ein anwendbares Entwicklungswerkzeug auf Grundlage der Methodenskizze erreicht werden können.

Bevor das Schlussfazit zur Fragebogen-Studie in Kapitel 5.3 gezogen wird, dienen die Erläuterungen im nächsten Unterkapitel dazu, die Einschätzungen der befragten Konstrukteure, hinsichtlich der Frage, inwieweit es im Rahmen der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt, mit den dokumentierten Konstruktionsumfängen im Datenablage-system des fallgebenden Zulieferunternehmens am Beispiel von Entwicklungsprojekten aus dem Ventiltrieb-bereich abzugleichen.

⁵⁸³ vgl. Lohmeyer 2013

⁵⁸⁴ vollständige Ergebnisdarstellung siehe Kapitel 11.1.8 im Anhang zu Kapitel 5

⁵⁸⁵ vgl. Abbildung 5-15 auf S. 162

⁵⁸⁶ vollständige Ergebnisdarstellung in Abbildung 11-13 im Anhang zu Kapitel 5

5.2 Ermittlung von Konstruktionsaufwänden in der Angebotsphase

In diesem Kapitel werden die Rechercheergebnisse zu projektspezifischen Konstruktionsumfängen zunächst anhand von sieben Serienentwicklungsprojekten von gebauten Nockenwellen⁵⁸⁷ gezeigt. Hierzu wurden projektspezifische Konstruktionsaktivitäten in Form von neu erstellten Modellen und Zeichnungen sowie Modell- und Zeichnungsänderungen auf Basis der Datenablage im Datenmanagementsystem ermittelt und den vier Entwicklungsphasen im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens zugeordnet.⁵⁸⁸ Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung 5-17 aufgeführt. Dabei dienen die im Mittel auf die Angebotsphase entfallenden Konstruktionsaktivitäten (Serienmittelwert-Konstruktionsaktivitäten: SMW-KA in Abbildung 5-17) nachfolgend als Referenzwert zur Einordnung der anhand reiner Anfrageprojekte⁵⁸⁹ ermittelten Konstruktionsumfänge.

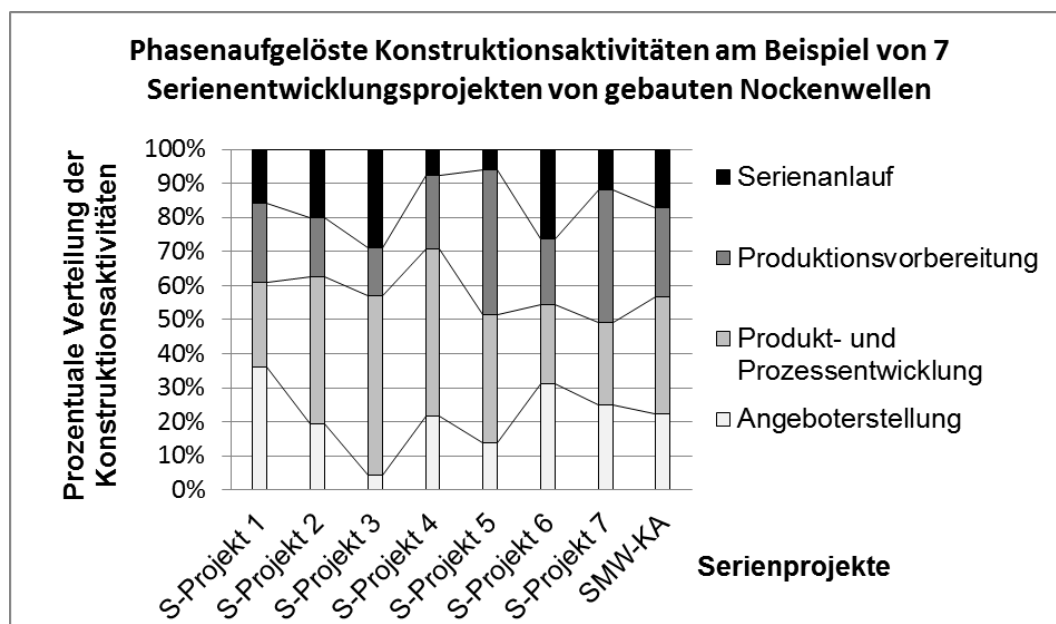


Abbildung 5-17: Prozentuale Verteilung der Konstruktionsaufwände auf die Projektphasen am Beispiel von 7 Serienprojekten von gebauten Nockenwellen

Auf Grundlage der sieben Serienentwicklungsprojekte entfallen im Mittel 22,4% der Konstruktionsaktivitäten des Gesamtprojektes auf die Angebotsphase, 34,4% auf die Produktionsvorbereitungsphase, 26,2% auf die Produkt- und Prozessentwicklungsphase und 17,0% auf die Serienanlaufphase. Die Verteilungen der Konstruktionsaktivitäten auf die einzelnen Projektphasen bei den untersuchten Projekten sind durch-

⁵⁸⁷ vgl. Leitbeispiel in Abbildung 1-5 auf S. 10

⁵⁸⁸ vgl. Konzeptentwicklung im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens auf S. 53 ff.

⁵⁸⁹ Anfrageprojekte sind Projekte, die nur innerhalb der Angebotserstellungsphase bearbeitet wurden und keine Freigabe für Aktivitäten im Rahmen der Folgephasen erhalten haben.

aus unterschiedlich, was zum einen daran liegt, dass grundsätzlich jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell ist.⁵⁹⁰ Bei klassischen Nachfolgeprojekten, z.B. durch den Aufbau einer neuen Motorengeneration, kann häufig auf Vorarbeiten aus Referenzprodukten zurückgegriffen werden, so dass die Konstruktionsaufgaben geringere Neuentwicklungsanteile und gesteigerte Anteile an Übernahmevariationen beinhalten.⁵⁹¹ Dabei spielt aber auch die Projektart eine wesentliche Rolle. Bei VoC-Projekten⁵⁹², bei denen der Kunde einen Lieferanten sucht, der sein ausdetailliertes Produkt herstellen kann, sind die Konstruktionsleistungen in der Angebotsphase erfahrungsgemäß geringer als bei Anfragen, über die der Kunde einen Entwicklungspartner für sein Produkt sucht. Hierzu werden seitens des Kunden vielfach mehrere Angebotsschleifen durchgeführt, die auf der Seite des Zulieferunternehmens einen entsprechenden Mehraufwand generieren.

Aufgrund geringer Zeiträume für die Ausarbeitung einer kunden- und anbietergerechten, konstruktiven Lösung für die konkrete Kundenanfrage, muss zur fristgerechten Fertigstellung der Konstruktionsaufgabe auf die wesentlichen Arbeitsinhalte fokussiert werden. Dabei treten die Anforderungen des Musterbaus an die spätere, konstruktive Umsetzung der Angebotsvarianten in den Hintergrund, wohlgleich diese bereits in der Angebotsphase zu berücksichtigen sind, da die an die Kundenanfrage geknüpften Bereitstellungstermine für die Lieferung von Musterteile auf deren Einhaltung geprüft werden müssen. Dies kann zur Folge haben, dass zur Darstellung der geforderten Merkmale und Produkteigenschaften im Rahmen der Musterfertigung zusätzliche Iterationen durch die Erstellung weiterer Varianten mit dem daraus resultierenden konstruktiven Mehraufwand erforderlich werden. Auch bei der Realisierung der im Angebot zugesicherten Merkmale und Eigenschaften auf seriennahen Werkzeugen und den finalen Serienwerkzeugen, kann im Rahmen der Produkt- und Prozessentwicklungsphase Mehraufwand generiert werden, wenn zum Zeitpunkt der Angebotserstellung das Zielsystem auf Grundlage der Kunden- und Anbieteranforderungen nicht ausreichend unter Berücksichtigung der für die Serie zur Verfügung stehenden Produktionssysteme geschärft wurde. Die verwendeten Musterzeichnungsstände werden dann beim Übergang in die Serie überarbeitet, um die in der Musterphase gemachten Erfahrungen auf die Serienzeichnungsstände zu übertragen. Der Prozess zur Generierung eines Serienzeichnungssatzes, der zudem die Belange der Serienfertigung vollständig abbildet, läuft ebenfalls häufig iterativ ab.

Zusätzlich können auch in späteren Phasen Konstruktionsleistungen gefordert werden, wenn im Rahmen eines Projektes entschieden wird, aus unterschiedlichen Pro-

⁵⁹⁰ vgl. Albers 2010 S. 346 (Hypothese 1)

⁵⁹¹ vgl. Albers, Bursac & Wintergerst 2015b

⁵⁹² Die Stimme des Kunden, engl. Voice of Customer (VoC)

duktionsstandorten Teile an den Kunden zu liefern. In diesem Fall müssen die Fertigungslinien des hinzugekommenen Fertigungsstandortes zur Herstellung des auf den Serienzeichnungsständen beschriebenen Produktes angepasst werden. Dieser Prozess kann mitunter auch zu Zeichnungsanpassungen führen.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen die Konstruktionsaktivitäten, die in der Angebotsphase geleistet werden, um die Kundenanfragen zielführend bearbeiten zu können. Aus diesem Grund wurden im nächsten Schritt die Konstruktionsumfänge von reinen Anfrageprojekten untersucht, um diese mit den Werten der Serienprojekte zu vergleichen. Zur Realisierung der Vergleichbarkeit werden nicht die absoluten Umfänge an Konstruktionsaktivitäten herangezogen, da sich die Zeitspannen der Angebotsphasen, beispielsweise durch mehrere kundenindizierte Anfrageschleifen, projektspezifisch deutlich unterscheiden können. Deshalb werden die Konstruktionsaktivitäten auf die Zeiträume der Angebotsphasen normiert und auf diese Weise die Konstruktionsleistungen in Konstruktionsaktivitäten pro Arbeitswoche für Vergleichszwecke mit den Serienentwicklungsprojekten berechnet. Die Abbildung 5-18 zeigt hierzu die Konstruktionsleistungen von 15 Anfrageprojekten im Vergleich mit der auf Grundlage der sieben Serienprojekten ermittelten Referenzkonstruktionsleistung (Serienmittelwert-Konstruktionsleistung: SMW-KL in Abbildung 5-18).

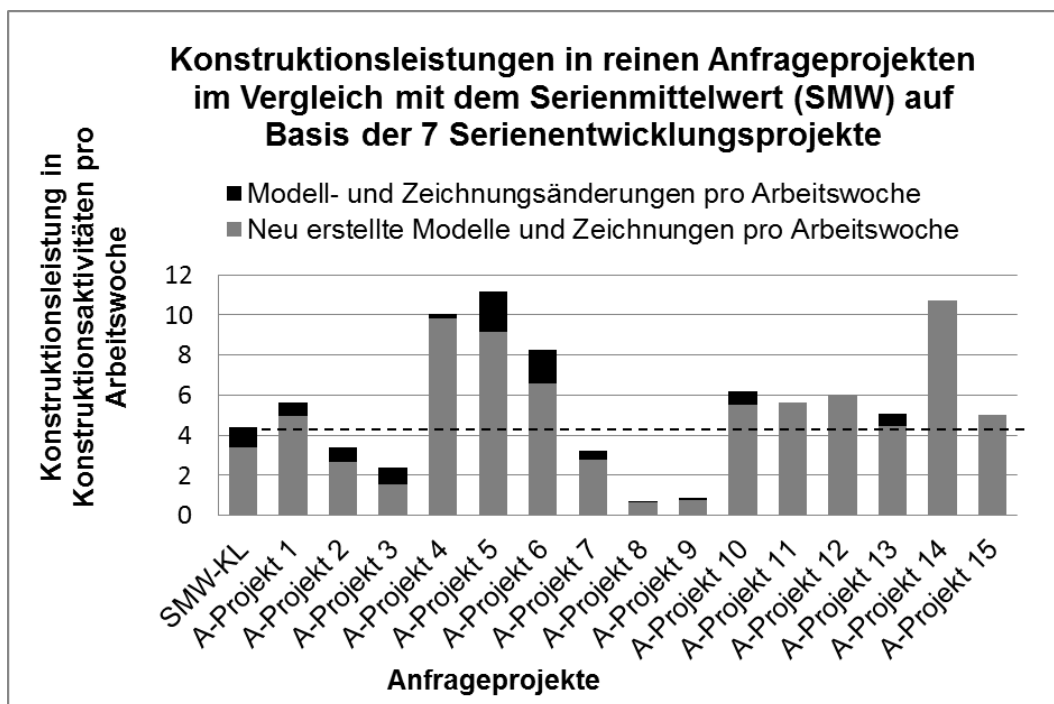


Abbildung 5-18: Vergleich der Konstruktionsleistungen reiner Anfrageprojekte mit der mittleren Konstruktionsleistung (SMW-KL) basierend auf 7 Serienentwicklungsprojekten

In der Balkendarstellung in Abbildung 5-18 sind die projektspezifisch ermittelten Konstruktionsleistungen unterteilt in neu erstellte Modelle und Zeichnungen sowie in Modell- und Zeichnungsänderungen. Das Analyseergebnis zeigt, dass fünf der unter-

suchten Anfrageprojekte den Referenzwert aus den Serienentwicklungsprojekten unterschreiten. Die restlichen zehn Projekte zeigen dabei zum Teil deutlich höhere Konstruktionsleistungen auf. Hierbei ist anzumerken, dass bei der Berechnung der Konstruktionsleistungen der Gesamtzeitraum der Angebotserstellungsphase von der Kundenanfrage über die Vertriebsabteilung bis zur Abgabe des Angebots verwendet wurde und damit die benötigten Zeiträume für organisatorische und prozessbedingte Abläufe bis zur Freigabe der Konstruktionsaufgabe sowie die Bearbeitungszeit für die Kalkulation der Angebotspreise inbegriffen sind. Während des Projektfreigabeprozesses und der Produktkalkulation finden vielfach noch keine Konstruktionsaktivitäten statt. Dies hat zur Folge, dass die tatsächlichen Konstruktionsleistungen in einigen Projekten teilweise höher sein können, als sie in Abbildung 5-18 dargestellt sind. Da dies nicht generell für die untersuchten Projekte zutrifft, wurde zur Sicherstellung, dass alle Konstruktionsaktivitäten der Angebotsphase erfasst werden, die Konstruktionsleistungen über die Gesamtdauer der Angebotsphase ermittelt.

Auf Grundlage der Datenanalyse im Datenmanagementsystem des fallgebenden Unternehmens können die Aussagen aus der Fragebogen-Studie, dass es in der Angebotserstellungsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten und damit zusätzlichen Iterationen kommt, nachvollzogen werden. Die Konstruktionsleistungen von 10 der 15 untersuchten Anfrageprojekte lagen dabei über dem Serienreferenzwert. Der Sachverhalt, dass für die Anfrageprojekte keine Serienaufträge erteilt wurden, die aufgewendeten Konstruktionsleistungen teilweise jedoch deutlich über dem Referenzwert aus den Serienprojekten liegen, stützt den im Rahmen der Fragebogen-Studie ermittelten Bedarf, die Wirtschaftlichkeit der Angebotserstellungsphase zu steigern, indem durch eine geeignete, methodische Entscheidungsunterstützung die Konstruktionsumfänge auf das erforderliche Maß reduziert werden können.

5.3 Fazit zur Konzeptentwicklung in der Praxis

Die Fragebogen-Studie in den drei Konstruktionsabteilungen ergab, dass es nach Einschätzung der 23 befragten Konstruktionsmitarbeiter in der Angebotsphase im Rahmen der Konzeptentwicklung zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt (FF1.1). Durch eine Datenanalyse von abgeschlossenen Anfrage- und Serienprojekten konnten die Aussagen aus der Studie bestätigt werden. Dabei ergab die Datenanalyse der sieben Referenzserienprojekte, dass im Mittel über ein Fünftel des Konstruktionsumfanges im Gesamtprojekt bereits in der Angebotsphase aufgewendet wird. Beim Vergleich der Konstruktionsleistungen der Serienprojekte mit den 15 untersuchten Anfrageprojekten zeigte sich ferner, dass die Konstruktionsleistungen für die reinen Anfrageprojekte zum Teil sehr hoch sind. Da aus diesen Anfrageprojekten keine Serienbeauftragungen resultierten, die geleistete Konstruktionsaufwände aber

Kapazitäten gebunden und Entwicklungskosten verursacht haben, kommt der Wirtschaftlichkeit dieser Phase eine große Bedeutung zu. Die Effizienz lässt sich durch die frühzeitige Fokussierung auf die zielführenden Konstruktionsinhalte steigern, indem der Anteil an vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten verringert wird. Hierzu konnte auf Grundlage der Fragebogen-Studie geklärt werden, was aus Sicht der Konstrukteure vermeidbare Konstruktionsaktivitäten charakterisiert und welche Faktoren zusätzliche Iteration und damit vermeidbare Konstruktionsaktivitäten verursachen (FF1.2). Nach Aussage der Konstrukteure werden vermeidbare Konstruktionsaktivitäten, wie redundante und häufig wiederkehrende Aktivitäten, dadurch begünstigt, dass die in Frage kommenden Lösungen schwierig identifiziert und auf deren Eignung für die vorliegende Aufgabe fundiert bewertet werden können. Daneben werden Erkenntnisse, die im Rahmen der Bearbeitung einer konkreten Aufgabe zwar final nicht zielführend waren, jedoch für Folgeprojekte nutzenstiftend eingesetzt werden können, erst durch ausbleibende oder ungenügende Dokumentation zu unnötigen Konstruktionsaktivitäten. Selbst die Erkenntnis darüber, dass die durchgeführten Aktivitäten für keine Folgeprojekte relevant sein werden, kann durch ausbleibende oder unzureichende, explizite Dokumentation wiederkehrend unnötige Aufwände generieren.

Hinsichtlich der Projektsituation lässt sich zusammenfassend festhalten, dass beim Einfluss der Projektorganisation⁵⁹³ die global ausgerichteten Projekte zusätzliche Iterationen bedingen können, um Zeichnungsstände konform zu den globalen Unternehmensstandards zu erstellen. Daneben zeigte die Projektsituation mit Bezug auf die eingesetzten Konstruktionsarten⁵⁹⁴ und Projekttypen⁵⁹⁵ keinen Zusammenhang mit dem Auftreten vermeidbarer Aktivitäten und dem Bedarf an Unterstützung. Es ergab sich jedoch ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten an Iterationen und dem Bedarf an Unterstützung mit der Berufserfahrung der Konstrukteure.

Ferner wurden mit der Fragebogen-Studie Arten und Tragweiten von Änderungen aus Sicht der Konstrukteure untersucht. Hierzu ergab sich zum einen, dass viele Änderungsentscheidungen in der Angebotserstellungsphase erst auf Basis von ganzen Zeichnungssätzen und damit erst zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt in der Angebotserstellungsphase gefällt werden. Dies liegt daran, dass zur Abbildung der Herstellprozesse, die gerade für die preisliche Bewertung der Produkte erforderlich sind, mehrere Modelle und Zeichnungen nötig werden. Aufgrund der Zeitproblematik in der Angebotsphase müssen Änderungen an herstellprozessrelevanten Parametern so-

⁵⁹³ Abteilungsübergreifende, geschäftsbereichsübergreifende oder global ausgerichtet Projektorganisation

⁵⁹⁴ Neukonstruktion oder Anpassungs- und Variantenkonstruktion

⁵⁹⁵ Serienprojekte, VoC-Projekte, Werksunterstützungsprojekte oder Vorentwicklungsprojekte

wie den eingesetzten Produktionssystemen nach Möglichkeit vermieden werden, da die Tragweite dieser Änderungen hoch ist und häufig die aufwendige Überarbeitung oder gar Neuerstellung ganzer Zeichnungssätze zur Folge haben kann. Dennoch lassen sich viele Komponenten- und Baugruppenänderungen auf Modifikationen des Herstellverfahrens zurückführen. Dies deckt sich auch mit dem Ergebnis aus der Fragebogen-Studie, dass sehr viele der Änderungsaufträge neben dem Kunden durch die produzierenden Werke und die Prozesstechnik beauftragt werden.

Die produktgruppenaufgelöste Auswertung ergab, dass die Einschätzung hinsichtlich dem Auftreten vermeidbarer Konstruktionsaktivitäten, die Anforderungen an die Dokumentation der vorhandenen Datenstände sowie der resultierende Bedarf an Unterstützung bei der Variantenkonstruktion in der Angebotsphase von der strukturellen Komplexität des Produktes abhängt (FF1.3). Die Ergebnisse aus der Bewertung der produktgruppenspezifischen Methodeneignung stützen diese Aussage, so dass Konstrukteure, die sich mit größeren Baugruppen beschäftigen, als die Zielgruppe für die Methode identifiziert werden konnte. Nach Aussage der befragten Konstrukteure ist es auf Basis der zur Verfügung stehenden Dokumentation der existierenden Produktlösungen schwierig für eine neue Konstruktionsaufgabe geeignete Referenzprodukte zu identifizieren und zu einer gültigen Variante neu zu kombinieren. Hinzu kommt, dass es zudem schwierig ist innerhalb der kurzen Zeitspanne für die Bearbeitung der Konstruktionsaufgabe alle erforderlichen Experten zur Planung von Produkt- und Produktionssystem einzubeziehen. Trotz oder gerade wegen der eingeschränkten, internen Beurteilung der späteren Varianten, müssen hohe Konstruktionsleistungen gefordert werden, um häufig auf Basis kompletter Zeichnungssätze die sich auf Gesamtsystemebene ergebenden Bewertungszielgrößen mit hinreichender Genauigkeit beurteilen zu können. Diese emergente Betrachtung ist ohne methodische Unterstützung im Vorfeld nicht möglich.

Durch die Fragebogen-Studie in drei Konstruktionsabteilungen des fallgebenden Unternehmens wurde gezeigt, dass es in der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt, und dass der Bedarf an Unterstützung bei der Variantenauswahl während der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase besteht. In diesem Kontext kann die Gültigkeit der Hypothese 1 bestätigt werden. Abschließend kann festgehalten werden, dass der primäre Bedarf auf Basis der Ergebnisse aus der Fragebogen-Studie darin besteht, zu einem frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase bestehende Lösungen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten bezüglich deren Eignung für neue Kundenanfragen hin bewerten zu können und zwar noch bevor mit der eigentlichen Konstruktionstätigkeit begonnen werden muss. Die Unterstützung der vorgeschlagenen Methode in dieser Arbeit besteht deshalb darin, Konstrukteure beim Ableiten und Bewerten gültiger Varianten auf Basis von Lösungen eines bestehenden Baukastens und der anschließenden Variantenauswahl zu unterstützen.

6 Methode zur Entscheidungsunterstützung

In diesem Kapitel wird die Methode zur Entscheidungsunterstützung beschrieben (Ziel 2). Die Methodenbeschreibung wird im Kontext des Forschungsvorgehens im ersten Teil der Präskriptiven Studie erarbeitet und bildet, in Verbindung mit den hierzu erarbeiteten Grundlagen, den Ausgangspunkt für die Realisierung eines prototypischen Entwicklungswerkzeuges im zweiten Teils der Präskriptiven Studie.⁵⁹⁶

Für die Entwicklung der Methode auf Basis des erweiterten ZHO-Modells und unter Einbeziehung der Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung für die Entscheidungsunterstützung (Ziel 2) werden zunächst die entsprechenden Grundlagen erarbeitet. Hierzu wird zum einen die Variantenentwicklung⁵⁹⁷ im erweiterten ZHO-Modell⁵⁹⁸ beschrieben. Das iterative Prozessmodell mit dem grundlegenden Verständnis der bidirektionalen Abhängigkeiten von Zielen und Objekten wird in diesem Zusammenhang dazu genutzt, um das Ableiten von Varianten und die Variantenauswahl wissenschaftlich zu erklären. Zum anderen wird zur Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Lösungen aus einer Menge an abgeleiteten Varianten eine Entscheidungsunterstützung durch die Ermittlung (1) emergenter Bewertungszielgrößen und (2) der variantenspezifischen Variationsanteile auf Grundlage der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS vorgeschlagen. Hierzu werden die Berechnung und Bedeutung der Variationsarten für die Entscheidungsunterstützung im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens beschrieben. Im Anschluss werden mittels einer detaillierten Produktanalyse⁵⁹⁹ die erforderlichen unternehmens- und produktspezifischen Grundlagen untersucht, um die wissenschaftliche Methodenbeschreibung praxisorientiert weiterzuentwickeln. In diesem Zusammenhang wird das Ziel verfolgt, die wissenschaftliche Sicht und die Sicht aus der Praxis am Beispiel eines konkreten Produktes in der Beschreibung eines Entscheidungsunterstützungssystems zusammenzuführen. Hierzu wird die zentrale Forschungshypothese 2 auf deren Gültigkeit im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens untersucht. Hiernach ist es durch die Beschreibung der Baukastenelemente als korrespondierende Paare aus Ziel- und Objektsystem möglich, für neue Produkthanfragen geeignete Elementkombinationen zu finden. Zur Überprüfung dieser Hypothese werden die folgenden Forschungsfragen verwendet. Dabei wird die zentrale Forschungsfrage 2.2

⁵⁹⁶ vgl. Forschungsdesign in Abbildung 4-2 auf S. 134

⁵⁹⁷ vgl. Kapitel 2.1.1 und Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE auf S. 64 f.

⁵⁹⁸ vgl. Erweitertes ZHO-Modell auf S. 27 f.

⁵⁹⁹ vgl. Leitbeispiel auf S.10 f.

im Kapitel 6.3 anhand einer Produktanalyse untersucht, die zusätzlich in Arbeitspakete untergliedert wird.⁶⁰⁰

Forschungsfragen zur Präskriptiven Studie Teil 1 – Methodenbeschreibung

FF2.1 Wie kann die Variantenentwicklung im Kontext des erweiterten ZHO-Modells beschrieben werden und wie können für die Variantenauswahl die Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung für die Entscheidungsunterstützung genutzt werden?

FF2.2 Wie sind die Elemente des Baukastens als korrespondierende Paare aus Objekt (Teilsystem) und Objektbeschreibung (Teilzielsystem) zu beschreiben, um sie auf neue Kundenzielsysteme anpassen zu können?

Diese beiden Forschungsfragen beziehen sich auf den ersten Teil der Präskriptiven Studie zur Erarbeitung der wissenschaftlichen Methode gemäß Ziel 2. Die Abbildung 6-1 ordnet die Forschungsfragen in den Gesamtkontext des Forschungsvorgehens ein, die in den Folgekapiteln zur Überprüfung der Hypothese 2 beantwortet werden.

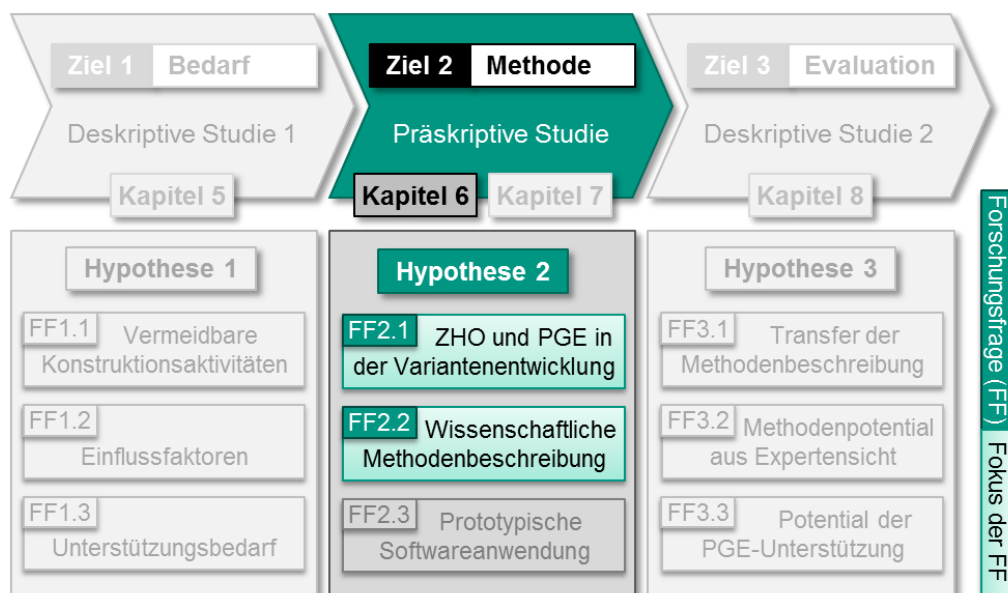


Abbildung 6-1: Einordnung der Forschungsfragen zum ersten Teil der Präskriptiven Studie (Methodenbeschreibung) in den Gesamtkontext des Forschungsvorhabens

6.1 Variantenentwicklung im erweiterten ZHO-Modell

Das Ableiten von Varianten auf Basis eines bestehenden Baukastens erfordert eine Beschreibung der Elemente⁶⁰¹, um diese für die konkrete Kundenanfrage auswählen,

⁶⁰⁰ vgl. Abbildung 6-1 auf S. 172 und Abbildung 6-9 auf S. 187

variieren und neu kombinieren zu können. Hierfür ist insbesondere dann ein rein sequentielles Modell hinreichend, wenn sich durch den Inhalt des Baukastens der Lösungsraum bei jeder Abfrage auf genau eine Möglichkeit beschränken lässt. Dies ist aber bei komplexen Systemen und einem dynamischen Markt selten der Fall. Jüngere Studien von ALBERS und BURSAC zeigen, dass daher die Entwicklung von Baukästen und anderen Standardisierungsmethoden als eine begleitende Aktivität im Sinne des iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell⁶⁰² verstanden werden muss.⁶⁰³ Können auf Grundlage der zur Verfügung stehenden, kombinierbaren Elemente mehrere gültige Varianten für die konkrete Anfrage abgeleitet werden, muss zusätzlich eine variantenspezifische Bewertung abgebildet werden. Hierzu werden Kennwerte erforderlich, die den Grad der Eignung der in Frage kommenden Varianten durch Vergleich mit den Zielvorgaben ausdrücken. Die Zielvorgaben wirken sich dabei durch die Variation und Neukombination auf die Objekte aus, d.h., die Objekte orientieren sich am Zielsystem.⁶⁰⁴ Dies hat zur Folge, dass sich Bewertungszielgrößen objektspezifisch ergeben und sich dadurch wiederum auf die Ziele auswirken. Demzufolge erfordert die Beschreibung des Variantenauswahlprozesses⁶⁰⁵, der sich aus den Teilprozessen Variantenableitung und Variantenbewertung zusammensetzt, eine iterative Prozessbeschreibung, um die Rückkopplung von Zielen auf Objekte abbilden zu können. Auf Grundlage des erweiterten ZHO-Modells⁶⁰⁶ lassen sich beide Teilprozesse in einem wissenschaftlichen Prozessmodell abbilden (FF2.1).⁶⁰⁷

Die Abbildung 6-2 gibt hierzu einen ersten Überblick darüber, wie die Variantenauswahl am Beispiel gebauter Nockenwellen im erweiterten ZHO-Modell dargestellt werden kann. Hiermit wird das grundlegende Verständnis des Variantenauswahlprozesses im Kontext des erweiterten ZHO-Modells geschaffen, das für die detaillierte Beschreibung des Entscheidungsunterstützungssystems in Kapitel 6.4 erforderlich ist. Das erweiterte ZHO-Modell basiert auf dem Systemtripel aus Handlungssystem, Ziel- und Objektsystem. Dabei wird der Entwickler oder auch ein gesamtes Entwicklungsteam inklusive dem Kunden durch das Handlungssystem mit den beiden Subsystemen Wissensbasis und Lösungsraum im Zentrum des Modells modelliert.⁶⁰⁸ Die Wissensbasis beinhaltet produkt- und fallspezifisches Wissen, das sich aus dem im Datenmanagementsystem dokumentierten Firmen-Knowhow, dem individuellen Wissen

⁶⁰¹ vgl. Albers & Braun 2011a S. 17: Elemente sind Teilergebnisse und diese wiederum Objekte im Objektsystem

⁶⁰² vgl. iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE auf S. 33 ff.

⁶⁰³ vgl. Bursac 2016 S. 64

⁶⁰⁴ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

⁶⁰⁵ vgl. Definition 6-1: Variantenauswahlprozess im erweiterten ZHO-Modell (S. 229)

⁶⁰⁶ vgl. Systemmodelle der Produktentstehung auf S. 24 ff.

⁶⁰⁷ vgl. Abbildung 6-1 auf S. 172

⁶⁰⁸ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012 und Erweitertes ZHO-Modell in Kapitel 2.1.2 auf S. 27 f.

der beteiligten Entwickler sowie deren Fähigkeiten zusammensetzt, das vorhandene Wissen effizient für neue Projekte einzusetzen. Dies hat zur Folge, dass die Wissensbasis ständig um fallspezifisches Wissen aus neuen Projekten erweitert wird.

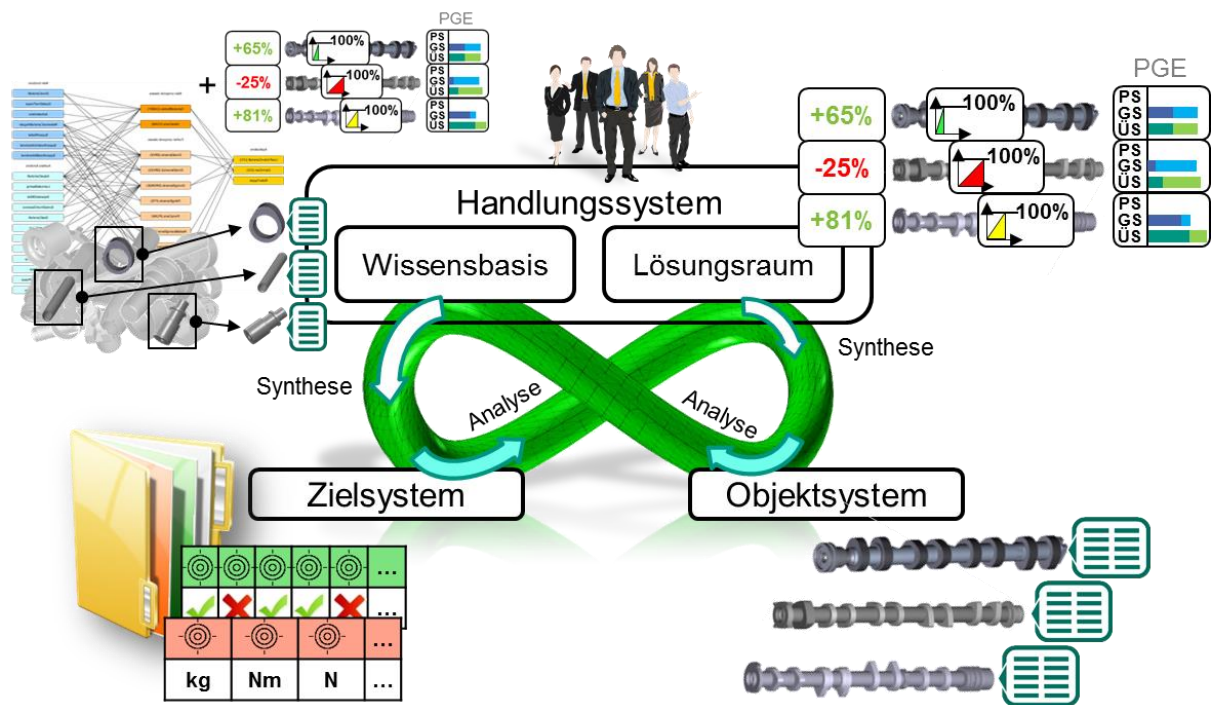


Abbildung 6-2: Variantenauswahlprozess am Beispiel gebauter Nockenwellen auf Grundlage des erweiterten ZHO-Modells (Liegende Acht)⁶⁰⁹

Ausgehend von der aktuellen Wissensbasis aus ehemaligen Produktgenerationen wird ein erstes Zielsystem für die konkreten Nockenwellenanfrage synthetisiert, das explizit die kunden- und anbieterseitigen Ziele und Randbedingungen sowie deren Wechselwirkungen beschreibt und damit festlegt, was das Produkt aus aktueller Sicht können soll. Neben der Aufnahme neuer Ziele und Randbedingungen in das Zielsystem, können diese infolge von Verifikationen durch Analyse des Objektsystems verfeinert und damit konkretisiert werden. Falsifikationen infolge der Analyse des Objektsystems können dabei erforderliche Änderungen an bereits definierten Zielen und Randbedingungen zur Folge haben.⁶¹⁰ Im Falle der Variantenentwicklung wird durch die Verwendung von Elementen eines bestehenden Baukastens auf fallspezifisches Wissen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten zurückgegriffen. Die Elemente sind dabei korrespondierende Paare bestehend aus Objekten in Form von auskonstruierter Komponenten und den diese Konstruktionen begründenden Objektbeschreibungen. Durch den Konflikt, dass sich grundlegende Bewertungszielgrößen nicht auf Komponentenebene sondern erst auf Gesamtsystemebene der Nockenwellen-

⁶⁰⁹ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012 und Lohmeyer 2013 S. 122

⁶¹⁰ vgl. Lohmeyer 2013 S. 117: Synthese des Zielsystems im erweiterten ZHO-Modell

le ergeben, und die Elemente zum Zeitpunkt der Synthese des Zielsystems zunächst noch die ursprüngliche Konstruktionsabsicht darstellen, ist die Entscheidung, welche Elemente für die konkrete, neue Anfrage in Betracht zu ziehen sind, zum Projektstart sehr unsicherheitsbehaftet.

In der Analyse des Zielsystems werden die geforderten Zielgrößen auf der Zielsystemseite mit den Objektbeschreibungen der Elemente abgeglichen. In der ersten Zielsystemanalyse können zunächst nur Festforderungen ohne Toleranzbereich für die Einschränkung des Lösungsraumes herangezogen werden, die zudem unabhängig von erforderlichen, geometrischen Anpassungen an den bestehenden Konstruktionsmodellen sind. Auf Grundlage der Elemente im Zielsystem werden gültige Elementkombinationen für die konkrete Anfrage durch eine erste FIT-Bedingung ermittelt, die Festforderungen nach geforderten Funktionen, Anwendungsbereichen (PKW, NFZ, Standardnockenwelle, reibleistungsreduzierte Nockenwelle, etc.) und konkreten Bauteilen durch einen Abgleich zwischen Zielsystem und den Objektbeschreibungen überprüft. Diese Elementkombinationen basieren auf produktspezifischen Konstruktions- und Kompatibilitätsregeln und stellen noch keine Nockenwellen dar, sondern beinhalten diejenigen Komponenten, aus denen auf Grundlage weiterer Zusammenbauregeln Nockenwellenvarianten erstellt werden können.

Zu diesem Zeitpunkt können auf Grundlage der durch die erste FIT-Bedingung ermittelten, gültigen Elementkombinationen noch keine Aussagen über geometriegebundene Zielgrößen gemacht werden. Für die Erweiterung der FIT-Bedingung müssen deshalb im nächsten Schritt die Objekte der Elemente, d.h., die CAD-Modelle, auf Grundlage der geometrischen Gegebenheiten angepasst werden. Im Rahmen der Synthese des Objektsystems werden hierzu zum einen die Modelle (Objekte) der Elementkombinationen synthetisiert. Des Weiteren werden aus den Elementkombinationen entsprechende Varianten abgeleitet. Alle Nockenwellenvarianten erfüllen dabei mindestens die geforderten Festforderungen, die in den variantenspezifischen Beschreibungen explizit dokumentiert sind.

Die Analyse des Inhaltes des derzeitigen Objektsystems zeigt, dass sich die Wellen bislang explizit nur durch die Anzahl der Bauteile, durch zusätzliche Funktionen oder mehrere Einsatzmöglichkeiten unterscheiden. Die Variantenmodelle der Nockenwellen beinhalten jedoch bereits implizite Bewertungszielgrößen. Das implizite, fallspezifische Wissen erweitert die Wissensbasis und wird beim Eintreten in die nächste Iteration im Rahmen der Synthese des Zielsystems explizit mit den Objektbeschreibungen der Komponenten und der Varianten verknüpft. Die Konkretisierung des Zielsystems durch die Orientierung am Objektsystem ermöglicht die Analyse mit der erweiterten FIT-Bedingung hinsichtlich der Erfüllungsgrade der emergenter Bewertungszielgrößen (Masse, Massenträgheit, Steifigkeit, Kostenfaktor, etc.). Für diese Inter-

vallforderungen werden Mindest- und Maximalforderungen definiert, um für Vergleichszwecke zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl entsprechende Kennwerte zu berechnen. Aus der Anwendung der erweiterte FIT-Bedingung resultiert eine weiteren Einschränkung des Lösungsraumes, d.h., dass Varianten, die bislang auf Grundlage der Festforderungen noch Teil des Zielsystems waren, auf Basis des konkretisierten Zielsystems durch die erweiterte FIT-Bedingung ausgeschlossen werden können. Dabei ist zum Aufbau von weiterem fallspezifischem Wissen für Folgeprojekte von großem Interesse, weshalb zuvor gültige Varianten vom Zielsystem ausgeschlossen werden und welche variantenspezifischen Potentiale sich durch Verfeinern oder Ändern von Zielen⁶¹¹ für Folgeprojekte ergeben können. Durch BEST-FIT-Kennwerte wird zunächst quantifiziert, wie hoch die Erfüllungsgrade der verbleibenden, gültigen Varianten im Vergleich mit den kunden- und anbieterbasierten Anforderungen sind. Daneben wird für diejenigen Varianten, die die erweiterte FIT-Bedingung nicht erfüllt haben, ein NEAREST-FIT-Kennwert ermittelt, der die Abweichungen der betreffenden Varianten von den Zielvorgaben anzeigt. Zur Unterstützung der Vergleichbarkeit wird zusätzlich ein Kennwert definiert, der den Konstruktionsaufwand beschreibt, die geforderten Zielvorgaben zu 100% zu erreichen.

Die kennwertbasierte Entscheidungsunterstützung wird erweitert durch die Ermittlung der Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung. Dies ermöglicht durch die Verhältnisse von Gestaltvariations- zu Übernahmevariationsanteilen⁶¹² Rückschlüsse auf das variantenspezifische Risiko, den Aufwand und das Potential im Falle der Entscheidung für die Umsetzung der konkreten Variante.

Die generierten, variantenspezifischen Bewertungen erweitern wiederum die Wissensbasis. Nach der Synthese des Zielsystems liegen auch diese Informationen explizit an die Objektbeschreibungen geknüpft vor. Es sind damit mindestens zwei Iterationen nötig, bis das Zielsystem für die konkrete Anfrage die variantenspezifischen Beschreibungen mit Bewertungskennwerten für die Objekte im Objektsystem enthält.

Wenn keine weiteren Iterationen erforderlich sind enthält das Zielsystem die Begründungen für die konkreten Ausprägungen der konstruierten Nockenwellenvarianten und deren fallspezifischen Eignungsgrade. Die Objektbeschreibungen inklusive der fallspezifischen Informationen zur Eignung der konkreten Ausführung werden zusammen mit der Konstruktivvariante als korrespondierendes Paar in der Wissensbasis gespeichert. Die Abbildung 6-3 soll hierzu verdeutlichen, dass dieser Sachverhalt nicht nur auf die Systemebene der abgeleiteten Nockenwellenvarianten zutrifft, sondern insbesondere auf die Elementebenen der kombinierbaren Bauteile. Die Elemen-

⁶¹¹ vgl. Lohmeyer 2013 S. 117

⁶¹² vgl. Ziele und Anforderungen auf S. 85 ff. in Kapitel 2.3.1

te können erst in Verbindung mit dem Wissen über deren ursprüngliche Konstruktionsabsichten auf deren Eignung für neue Projekte hin geprüft, angepasst und mit anderen Komponenten neu kombiniert werden.



Abbildung 6-3: Korrespondierende Paare aus Objekt und Objektbeschreibung im Kontext des erweiterten ZHO-Modells

Zur effizienten Verwendung bestehender Lösungen für neue Kundenzielsysteme stellt sich die zentrale Frage, wie hierzu die korrespondierenden Paare zu beschreiben sind (FF2.2), und zwar auf der Seite der Modelle (Objekte) und den diese Modelle begründenden Beschreibungen.⁶¹³ Hierzu werden zunächst diejenigen Objekte festgelegt, die zum Ableiten der geforderten Produktausprägungen für die konkrete Abfrage aus dem Baukasten erforderlich sind. Für die vorhandenen CAD-Modelle wird eine Parametrisierung erarbeitet, um die Rückkopplung von aktiven auf passive Parameter zu realisieren. Hierzu wird unter anderem untersucht, auf welcher Grundlage festzulegen ist, welche prozess- und funktionsbestimmenden Parameter aktiv und welche passiv sein sollen. Zur Darstellung der Variantenbewertung werden zum einen Bewertungszielgrößen und Eingangsinformationen definiert sowie deren Zusammenhänge geklärt. Hierbei ist für die Variantenauswahl von entscheidender Bedeutung, wie die Anforderungen mit den Eigenschaften und Merkmalen der Baukastenelemente in Beziehung stehen, um emergente Bewertungszielgrößen auf Gesamtsystemebene ermitteln zu können. Die geeigneten Kennwerte zur Entscheidungsunterstützung basieren hierbei, wie bereits in den Erläuterungen zur Abbildung 6-2 beschrieben, auf der Ermittlung der variantenspezifischen Zielwerterfüllung durch die FIT-Bedingungen und der Bestimmung der variantenspezifischen Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung⁶¹⁴ (FF2.1). Die erarbeiteten Grundlagen werden hiernach in einem Gesamtsystembild, dem Entscheidungsunterstützungssystem VDSS (engl. Variant Decision Support System), zusammengeführt,

⁶¹³ vgl. Abbildung 6-1 auf S. 172: Die zentrale Forschungsfrage 2.3 wird in 7 Teilfragen untergliedert, die im Rahmen der Produktanalyse in Kap. 6.3 am konkreten Praxisbeispiel beantwortet werden.

⁶¹⁴ vgl. Albers, Walch & Bursac 2016

das die Basis für die methodische Unterstützung bei der Variantenauswahl bildet. Die Übersetzung dieses Gesamtsystembilds in eine prototypische Softwareanwendung wird im zweiten Teil der Präskriptiven Studie in Kapitel 7 beschrieben.

Nach der Beschreibung der Variantenentwicklung im Kontext des erweiterten ZHO-Modells, wird im Kapitel 6.2 auf die Variantenentwicklung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung eingegangen, die einen weiteren, essentiellen Baustein für die Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl darstellt (FF2.1).

6.2 Variantenentwicklung in der PGE

In diesem Kapitel wird anhand des Leitbeispiels⁶¹⁵ die Herleitung der Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung beschrieben und die unterschiedliche Bedeutung der Prinzip-, Gestalt- und Übernahmevariationsanteile aus Sicht der industriellen Praxis erläutert (FF2.1). Die Variationsanteile werden als variantenspezifische Kennwerte zur Unterstützung der Variantenauswahl eingesetzt, da sich aus den Verhältnissen der Variationsanteile für die konkrete Nockenwellenausführung Rückschlüsse auf das Risiko, den konstruktiven Aufwand und das Potential ableiten lassen, die bei der virtuellen Detaillierung und der physischen Umsetzung der betreffenden Variante⁶¹⁶ zu berücksichtigen sind. Für die Beurteilung, welche Parameter und Teilsysteme im Falle einer Variation gegenüber der Vorgängergeneration welche Variationsart verursachen, werden entsprechende Einteilungskriterien aus Sicht der industriellen Praxis definiert. Diese werden am Beispiel des in der Abbildung 6-4 gezeigten Ventilnockens einer gebauten Nockenwelle hergeleitet.⁶¹⁷

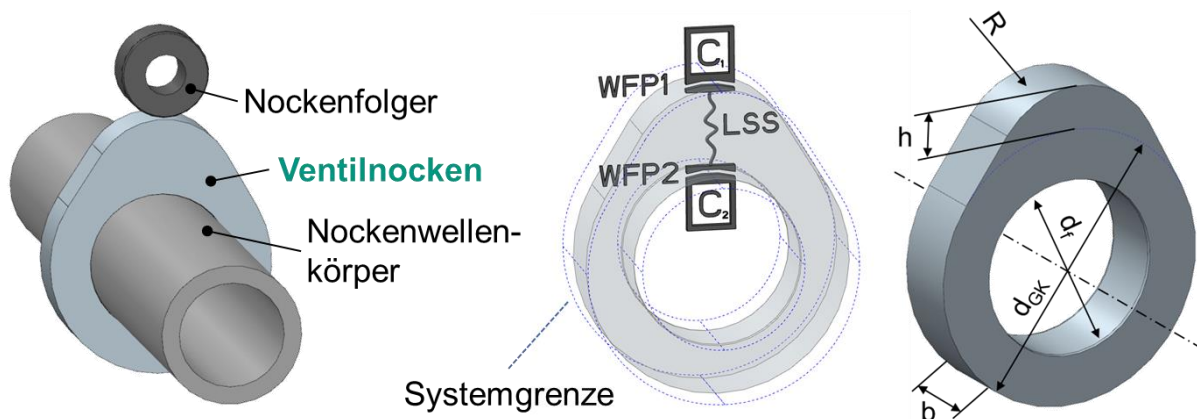


Abbildung 6-4: C&C²-A-Modell (Mitte) und Geometrieparameter eines Ventilnockens (rechts)

⁶¹⁵ vgl. Leitbeispiel S.10 f.

⁶¹⁶ vgl. Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE (S. 64 f.)

⁶¹⁷ vgl. Albers, Walch & Bursac 2016

Die Funktion des Ventalnockens ist es, den Nockenfolger, und damit die Ventile, zu betätigen. Das hierfür erforderliche Drehmoment wird über den Nockenwellenkörper an den Ventalnocken geleitet. Damit der Ventalnocken seine Funktion erfüllen kann, müssen deshalb der Nockenwellenkörper und der Nockenfolger (rechts in Abbildung 6-4) mit in die Betrachtung einbezogen werden. Bei der Beschreibung des Ventalnockens auf Basis des C&C²-Ansatzes⁶¹⁸ werden die Bauteile, die außerhalb der betrachteten Systemgrenze liegen durch Konnektoren modelliert (Mitte in Abbildung 6-4). Der Konnektor C1, der den Nockenfolger beschreibt, kann z.B. unterschiedliche Rollenmodelle beinhalten, und der Konnektor C2 zur Modellierung des Nockenwellenkörpers könnte abweichend anstatt eines Rohres auch eine massive Stange beschreiben. Hiermit können unterschiedliche Konstellationen hinsichtlich übertragbarem Verdrehmoment und Rollenpressungen zur Erreichung geforderter Lastkollektive beschrieben und modelltechnisch analysieren werden. Betrachtet werden in diesem Kontext die Konnektoren, Wirkflächenpaare und Tragstrukturen, die bei der Übertragung des Kraftflusses beteiligt sind. Dabei sei erwähnt, dass grundsätzlich an jeder Fläche Konnektoren zur Übertragung von Kraft, Information und Stoff angebracht werden können. Da jedoch die Nockenseitenflächen nicht unmittelbar an der Kraftübertragung zur Funktionserfüllung des Ventalnockens beteiligt sind, werden an diesen keine Konnektoren angebracht. Ein hier angebrachter Konnektor könnte z.B. den Wärmeübergang vom Nocken auf den umgebenden Ölnebel oder auf den Ölstrahl einer Anspritzkühlung modellieren. Für die Geometriebeschreibung des Nockens (rechts in Abbildung 6-4) werden fünf Parameter verwendet. Für diese Parameter wird nachfolgend untersucht, welche Variationsart eine Änderung dieser Parameter gegenüber dem Original (Vorgängergeneration) zur Folge hat.

Übernahmevariation (ÜS) am Beispiel des Ventalnockens

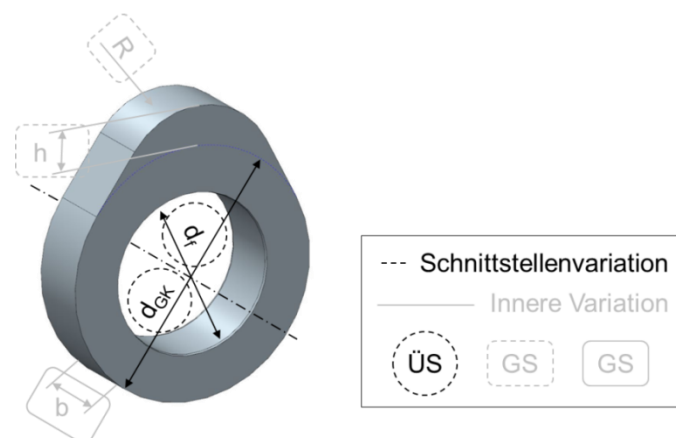


Abbildung 6-5: Übernahmevariationsparameter am Beispiel des Ventalnockens durch Variation an den Schnittstellen (Parameter d_f und d_{GK})

⁶¹⁸ vgl. Contact and Channel-Ansatz (C&C²-A) in Kapitel 2.1.1 auf S. 19 f.

Übernahmevariationen ÜS (vgl. Parameter d_f und d_{GK} in Abbildung 6-5) beziehen sich auf Variationen an den Konnektoren (Komponentenschnittstellen), und ferner auf Parameter und Teilsysteme, deren Variation

- (1) keine umfängliche Neuvalidierung erfordern, da in bestehenden Unternehmensstandards eine Übertragbarkeit auf die aktuelle Situation⁶¹⁹ beschrieben ist und
- (2) durch die firmeninterne Expertise die Tragweite dieser Variationen bekannt ist.

Bei dem Leitbeispiel in dieser Arbeit basieren die Bauteilverbindungen der gebauten Nockenwellen auf einem thermischen Schrumpfsitzverfahren. Dieses Fügeverfahren wird vom fallgebenden Zulieferunternehmen bereits mehrere Jahrzehnte erfolgreich eingesetzt. Die konkrete Ausführung des **Fügedurchmessers (d_f)** zur Darstellung der geforderten, übertragbaren Momente zwischen Nocken und Nockenwellenkörper basiert demnach auf der Expertise des Unternehmens und kann auf die konkrete Kundenforderung angepasst werden. Die Auslegungsparameter selbst sind hierbei nicht von direktem Kundeninteresse, denn den Kunden interessiert primär das darstellbare, übertragbare Moment, um den sicheren Betrieb der Nockenwellen im Motor zu gewährleisten. Die an die Fügesitzauslegung gekoppelten Wechselwirkungen mit anderen auslegungsrelevanten Größen sind dabei bekannt. Selbiges trifft auch auf den **Grundkreisdurchmesser (d_{GK})** zu. Liegen hierbei die Kundenanforderungen innerhalb der firmeninternen Standards, oder lassen sich gegebenenfalls für Abweichungen vom Standard Maßnahmen definieren, so kann bei einer erforderlichen Anpassung beim Übergang auf die neue Generation von einer Übernahmevariation gesprochen werden. Liegen diese aber außerhalb der Standardwerte, so werden gegebenenfalls neue Herstellverfahren, Maschinen, Prozesse oder Vorrichtungen erforderlich. Wenn dabei keine Expertise für die erforderlichen Technologien vorliegt, muss aus Unternehmenssicht eine Variation des Prinzips vorgenommen werden. Hierbei müssen aufwändige Testprozeduren durchgeführt werden, um beispielsweise ein auf einem neuen Prinzip basierendes Fertigungsverfahren hinsichtlich der prozesssicheren Darstellung der geforderten Zielwerte in mehreren Schritten zu validieren. Liegen jedoch Erfahrungswerte aus vorangegangenen Produktgenerationen im Unternehmen vor, so kann möglicherweise von einer Prinzipvariation abgesehen werden und durch eine Variation der Gestalt die Kundenforderung bedient werden.

⁶¹⁹ Die Übertragbarkeit auf die aktuelle Situation umfasst in diesem Zusammenhang unter anderem die Realisierbarkeit der geforderten Geometrie insbesondere der geforderten Toleranzen und des geforderten Lastkollektivs sowie die Verfügbarkeit der erforderlichen Herstelltechnologien.

Gestaltvariation (GS) am Beispiel des Ventilkockens

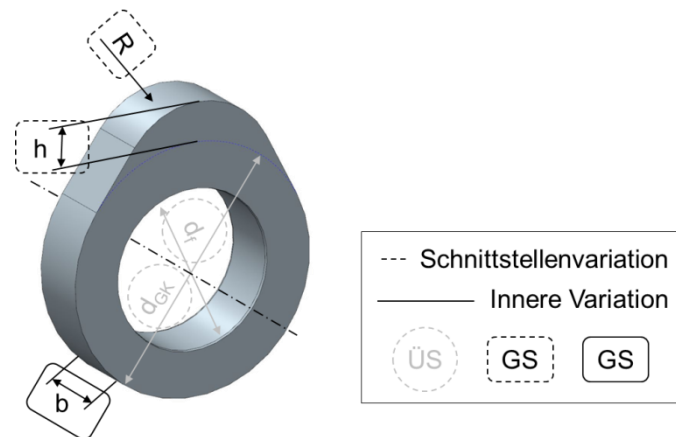


Abbildung 6-6: Gestaltungsparameter am Beispiel des Ventilkockens durch innere Variation (Parameter b) und durch Variation an den Schnittstellen (Parameter R und h)

Gestaltvariationen GS (vgl. Parameter R , h und b in Abbildung 6-6) können sich abweichend von den Übernahmevariationen sowohl auf Variationen an den Konnektoren $GS(\text{Con})$ ⁶²⁰ als auch auf Variationen an den Wirkflächenpaaren und Tragstrukturen im Inneren $GS(\text{Int})$ ⁶²¹ beziehen und ferner auf Parameter oder Teilsysteme deren Variation

- (1) eine Neuvalidierung erforderlich machen, da sie in vernetzten und wechselseitigen Abhängigkeiten mit weiteren, auslegungsrelevanten Parametern und Teilsystemen stehen und
- (2) für die sich deshalb vielfach keine generalisierbaren Handlungsempfehlungen im Rahmen eines Firmenstandards formulieren lassen.

Eine Variation der **Breite (b)** zur Realisierung des erforderlichen Momentes wirkt sich beispielsweise auf die Bauteilmasse und das Kollisionsrisiko aus, wobei letzteres hinreichende Informationen hinsichtlich der relevanten Systemumgebung erfordert. Die Breite ist in diesem Kontext eine Gestaltvariation im Inneren $GS(\text{Int})$, da an den Seitenflächen keine direkt am Kraftfluss beteiligten Konnektoren modelliert werden. Solche Parameter wirken sich bei einer Änderung immer auf andere Parameter und Teilsysteme aus. Eine Unterschreitung der gängigen Nockenbreiten kann beispielsweise reibleistungssteigernde Maßnahmen in der Bohrung zur Folge haben, um die geforderte Momente übertragen zu können. Diese müssen für den konkreten Fall neu bewertet werden. Der **Nockenhubbereich**, der der Einfachheit wegen in diesem Beispiel mit den Parametern R und h beschrieben ist, muss aus herstelltechnischer Sicht vielfach aus Gründen der Wirtschaftlichkeit im Kontext des Gesamtherstellpro-

⁶²⁰ Abkürzung (Con) von engl. Connector = Konnektor

⁶²¹ Abkürzung (Int) von engl. Internal = innen, innenliegend

zesses bewertet werden, um Taktzeiten zu optimieren und Werkzeugkosten zu sparen. Deshalb ist auch für die Darstellung des Konturverlaufes nur eine fallspezifische Beurteilung möglich, die im Rahmen von Validierungsaktivitäten ermittelt werden muss. Demzufolge resultiert aus einer Variation des Nockenhubverlaufs eine Gestaltvariation am Konnektor GS(Con), d.h., an der Schnittstelle zum Nockenfolger.

Prinzipvariation (PS) in der Variantenentwicklung

Prinzipvariationen entstehen meist durch Hinzufügen oder Entfernen von Wirkflächenpaaren und Tragstrukturen. Beim Ableiten von Varianten auf Grundlage der bestehenden Lösungsprinzipien der vorhandenen Bauteile werden auf Komponenten- und Gesamtsystemebene der Nockenwellenvarianten keine Prinzipvariationsanteile generiert. Soll das Lagerprinzip der Nockenwelle beispielsweise auf gehärteten Lagerringen beruhen, werden nur solche Lagerringe aus dem Baukasten eingesetzt, die das Lagerprinzip und die Härteanforderungen mindestens erfüllen können. Da durch das Ableiten stets neue Bauteilkombinationen generiert werden gibt es in diesem Sinne auf Gesamtsystemebene keine Referenzprodukte, auf die hinsichtlich der Beurteilung von Prinzipvariationsanteilen referenziert werden kann. Vielmehr wird durch die Variantenableitung immer eine neue Generation 1 erzeugt, die sich aus Übernahme- und Gestaltvariationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung zusammensetzt. Erst wenn unabhängig voneinander zwei Nockenwellen auf Basis unterschiedlicher Anforderungen bezüglich des Lagerprinzips abgeleitet werden, können Prinzipvariationsanteile beim Übergang von der ersten Variante (Generation 1) auf die zweite Variante (Generation 2) beschrieben werden.

Schlussfolgerungen und Erweiterung des mathematischen Basismodells zur PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS

Entsprechend den vorhergehenden Ausführungen können sich sowohl Gestalt- als auch Übernahmevariationsanteile auf Variationen an den Schnittstellen und damit auf Variationen an den Konnektoren beziehen. Dabei können Gestaltvariationsanteile darüber hinaus durch Variationen von Tragstrukturen und Wirkflächenpaare im Inneren der Konstruktion verursacht werden. D.h., eine Übernahmevariation ($V \neq 0$) gibt es nur am Konnektor, jedoch sind nicht alle Variationen am Konnektor Übernahmevariationen. Des Weiteren treten Übernahme- und Gestaltvariationsanteile nur dann auf, wenn die betreffenden Parameter und Teilsysteme gegenüber denen der Referenzprodukte variiert werden. Demzufolge werden bei unveränderter Übernahme (Variation $V=0$) der Parameter oder Teilsystem in die neue Generation sowohl Übernahme- als auch Gestaltvariationsanteile zu Übernahmeanteilen (Gleichanteilen) $\text{ÜS}(V=0)$. Die Zusammenhänge zwischen der Variationsart (Übernahme- oder Gestaltvariati-

on), dem Variationstyp (im Inneren der Konstruktion oder am Konnektor) und den konkreten Parametern des Ventalnockens sind in Abbildung 6-7 gezeigt.⁶²²

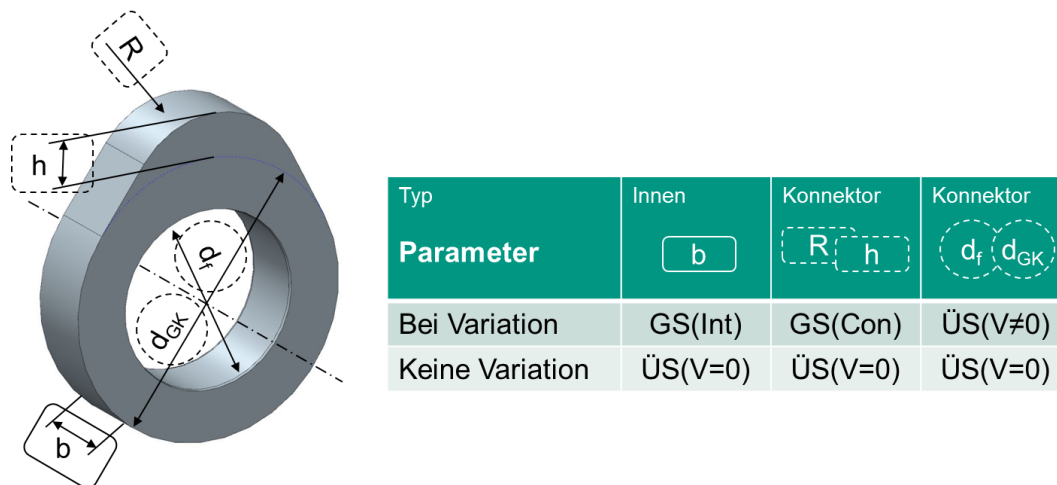


Abbildung 6-7: Zusammenhänge zwischen Ventalnockenparametern, Variationsart und -typ

Entsprechend der Abbildung 6-7 wird der Parameter b bei dessen Variation (V≠0) gegenüber dem Referenzprodukt zu einer Gestaltvariation im Inneren der Konstruktion GS(Int) und die Parameter R und h der Ventalnockenerhebung zu Gestaltvariationen an den Konnektoren GS(Con). Die Variation (V≠0) des Grundkreisdurchmessers (d_{GK}) sowie die des Fügedurchmessers (d_f) resultieren in Übernahmevariationen ÜS(V≠0). Dabei werden alle drei Variationsarten GS(Int), GS(Con) und ÜS(V≠0) bei unveränderter Übernahme der referenzierten Parameter oder Teilsysteme in die neue Generation zu Übernahmeanteilen, d.h., zu Gleichanteilen ÜS(V=0).

Erweiterung des mathematischen Modells der PGE

Zur Berechnung der zuvor beschriebenen Variationsanteile wird die erforderliche Unterteilung der Gestalt- und Übernahmevariation in die Grundgleichungen des mathematischen Basismodells aufgenommen.⁶²³

Die gemäß dem Basismodell in die in der Entwicklung befindlichen Produktgeneration (G_n) übernommene Menge an Teilsysteme⁶²⁴ (ÜS_n) wird unterteilt in eine Menge an Teilsystemen, die in variiert Form übernommen werden (ÜS(V≠0)_n) und eine Menge an Teilsystemen, die unverändert übernommen werden (ÜS(V=0)_n).

$$\text{ÜS}(V \neq 0)_n \{TS_{(\ddot{U}V)} | \ddot{U}V(V \neq 0)_{(TS)}\}; \text{ÜS}(V = 0)_n \{TS_{(\ddot{U}V)} | \ddot{U}V(V = 0)_{(TS)}\} \quad \text{Gl. 6-1}$$

⁶²² Die Details zur Abbildung 6-7 befinden sich im Anhang in Kapitel 11.2.1

⁶²³ vgl. PGE - Produktgenerationsentwicklung in Kapitel 2.1.1 auf S. 16 ff.

⁶²⁴ Die gezeigten mathematischen Zusammenhänge beziehen sich auf Mengen von Teilsystemen (TS) und beschreiben damit die Sicht aus Gesamtsystemebene. Bei der Beschreibung der Zusammenhänge aus Sicht der Komponenten werden Parameter anstelle der Teilsysteme betrachtet.

Die Menge an übernommenen Teilsystemen ($\ddot{U}S_n$) ergibt sich damit wie folgt:

$$\ddot{U}S_n = \ddot{U}S(V \neq 0)_n \cup \ddot{U}S(V = 0)_n \quad \text{Gl. 6-2}$$

Die Basisbeschreibung für die neue Produktgeneration (G_n) wird durch die Unterteilung der Übernahmevariation ($\ddot{U}S(V \neq 0)_n$ und $\ddot{U}S(V=0)_n$) erweitert:

$$G_n = \underbrace{PS_n \cup GS_n}_{\text{Neuentwicklungsanteile}} \cup \underbrace{\ddot{U}S(V \neq 0)_n \cup \ddot{U}S(V = 0)_n}_{\substack{\text{Anpassungsanteil} \\ \text{Übernahmeanteil} \\ \text{Übernahmevariation}}} \quad \text{Gl. 6-3}$$

Die Übernahmevarianteanteile ($\delta_{\ddot{U}V(V \neq 0),n}$ und $\delta_{\ddot{U}V(V=0),n}$) werden wie folgt ermittelt:

$$\delta_{\ddot{U}V(V \neq 0)_n} = \frac{|\ddot{U}S(V \neq 0)_n|}{|G_n|} [\%] \quad \text{Gl. 6-4}$$

$$\delta_{\ddot{U}V(V=0)_n} = \frac{|\ddot{U}S(V=0)_n|}{|G_n|} [\%] \quad \text{Gl. 6-5}$$

Bei der Menge der durch Variation der Gestalt neu entwickelten Teilsysteme (GS_n) wird in eine Menge an Teilsystemen, die im Inneren der Konstruktion variiert werden ($GS(Int)_n$), und in eine Menge an Teilsystemen, die an den Konnektoren variiert werden ($GS(Con)_n$), unterschieden.

$$GS(Int)_n \{TS_{(GV)} | GV(Int)_{(TS)}\}; GS(Con)_n \{TS_{(GV)} | GV(Con)_{(TS)}\} \quad \text{Gl. 6-6}$$

Die gesamte Gestaltvariation (GS_n) der neuen Generation setzt sich aus der Vereinigung der variierten Teilsysteme im Inneren und an den Konnektoren zusammen:

$$GS_n = GS(Int)_n \cup GS(Con)_n \quad \text{Gl. 6-7}$$

Für die neuen Generation (G_n) ergibt sich, durch Vereinigung der Mengen der neu entwickelten Teilsysteme durch Prinzip- und Gestaltvariation und der Teilsysteme, die durch Übernahmevariation in die neue Generation aufgenommen werden, nachfolgende Gleichung:

$$G_n = \underbrace{PS_n \cup GS(Int)_n \cup GS(Con)_n}_{\substack{\text{Gestaltvarianteanteile} \\ \text{Neuentwicklung}}} \cup \underbrace{\ddot{U}S(V \neq 0)_n \cup \ddot{U}S(V = 0)_n}_{\substack{\text{Anpassungsanteil} \\ \text{Übernahmeanteil} \\ \text{Übernahmevariation}}} \quad \text{Gl. 6-8}$$

Analog ergeben sich die Übernahmevarianteanteile ($\delta_{GV(Int),n}$ und $\delta_{GV(Con),n}$) zu:

$$\delta_{GV(Int)_n} = \frac{|GS(Int)_n|}{|G_n|} [\%] \quad \text{Gl. 6-9}$$

$$\delta_{GV(Con)_n} = \frac{|GS(Con)_n|}{|G_n|} [\%]$$

Gl. 6-10

Berechnung der Variationsanteile am Beispiel einer gebauten Nockenwelle

Die Variationsanteile auf Gesamtsystemebene setzen sich aus den Variationsanteilen der Komponenten zusammen. Am Beispiel des Variationsszenarios für einen Ventilschlepparm in Abbildung 6-8 ergibt sich bei einer unveränderten Übernahme des Konturradius (R) und des Fügedurchmessers (d_f) in die neue Generation ein Übernahmeanteil (vgl. Gl. 6-8 und Gl. 6-5) δ_{ÜV(V=0),n} von 40%. Die Variation des Grundkreisdurchmessers (d_{GK}) resultiert dabei innerhalb des Übernahmeanteils δ_{ÜV,n} von 60% in einem Anpassungsanteil (vgl. Gl. 6-8) δ_{ÜV(V≠0),n} von 20%. Die Gestaltvariation am Nocken δ_{GV,n} von 40% teilt sich durch die Variation der Breite (b) in 20% Gestaltvariation im Inneren der Konstruktion δ_{GV(Int),n} und durch die Variation des Nockenhubes (h) in 20% Gestaltvariation am Konnektor δ_{GV(Con),n} auf.

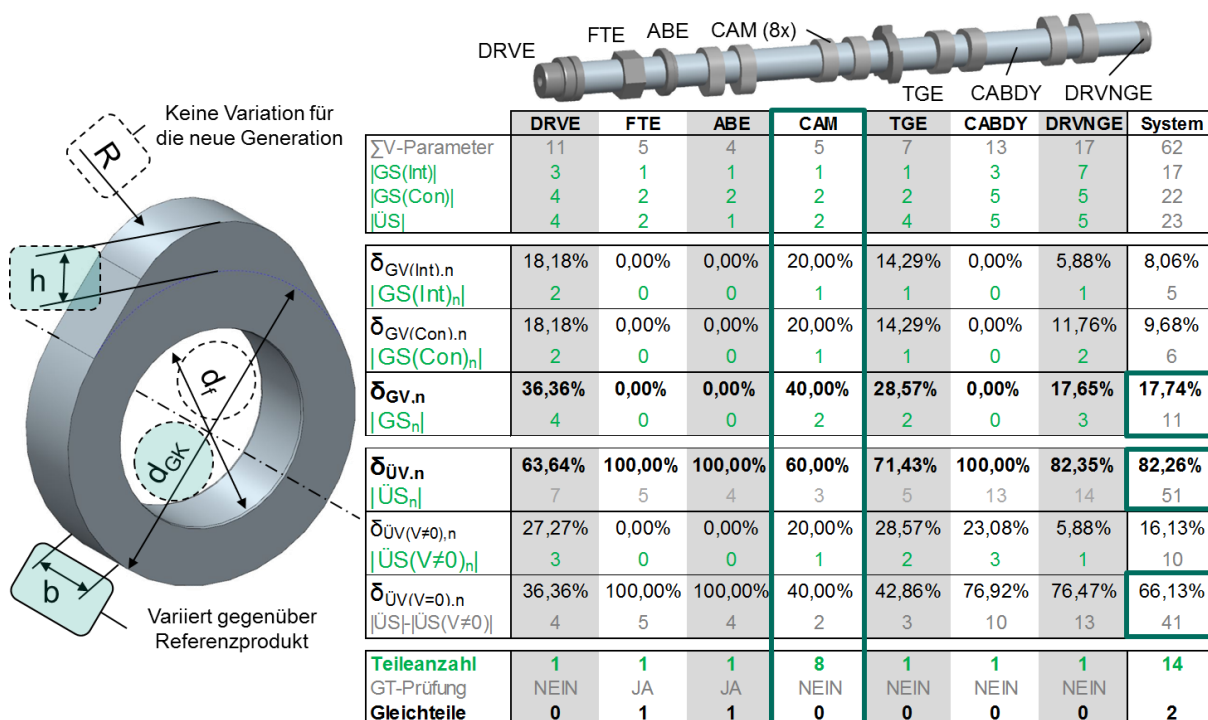


Abbildung 6-8: Berechnung der Variationsanteile einer gebauten Nockenwelle⁶²⁵

Für das in Abbildung 6-8 gezeigte Nockenwellenbeispiel ergibt sich auf Gesamtsystemebene ein Gestaltvariationsanteil δ_{GV,n} von 17,74% und ein Übernahmevariationsanteil δ_{ÜV,n} von 82,26%. Der Gestaltvariationsanteil teilt sich in 8,06% innere Gestaltvariation δ_{GV(Int),n} und 9,68% Gestaltvariation an den Konnektoren δ_{GV(Con),n} auf,

⁶²⁵ nach Albers, Walch & Bursac 2016

und der Übernahmevariationsanteil in 16,13% Anpassungsanteil und 66,13% Übernahmeanteil. Zusätzlich kann in diesem Beispiel auf zwei Gleichteile zurückgegriffen werden, die unverändert auf die Welle gefügt werden können. Das ist zum einen der Sechskant in der Funktion eines Ausricht- und Montageelementes (FTE für engl. Fitting Element) sowie der Axiallagerring (ABE für engl. Axial Bearing Element).

Das Verhältnis von Übernahme- zu Gestaltvariationsanteilen gibt Aufschluss darüber, welcher Anpassungsaufwand mit der Umsetzung der betreffenden Variante in Verbindung steht. Dabei ist die Festlegung, ob die Variation eines Teilsystems oder Parameters eine Gestalt- oder Übernahmevariation zur Folge hat, produkt- und unternehmensspezifisch zu bewerten. Eine Variation, die aus Sicht des anbietenden Zulieferunternehmens eine Gestalt- oder Übernahmevariation darstellt, kann aus Sicht des Kunden eine Variation des Prinzips bedeuten. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Kunde bislang für seine Motoren ausschließlich gegossene Nockenwellen eingesetzt hat und für seine neue Motorengeneration auf gebaute Nockenwellensysteme wechseln möchte. Damit stellen die gebaute Nockenwelle sowie viele damit in Verbindung stehenden Herstell- und Montageprozesse neue Lösungsprinzipien für den Kunden dar. D.h., der Kunde muss sich auf die Expertise des Zulieferunternehmens verlassen können, für seinen konkreten Anwendungsfall funktionsfähige Produkte herstellen zu können. Wenn hingegen aus Kunden- und Anbietersicht ein neues Lösungsprinzips entwickelt werden soll, ist das mit der Prinzipvariation verbundene Entwicklungsrisiko meist erheblich höher, als wenn die Variation für einen der Partner eine Gestalt- oder sogar Übernahmevariation bedeutet. Um das Risiko noch weiter zu reduzieren bietet es sich ferner an, Basisanforderungen nach Möglichkeit mit geringen Gestaltvariationsanteilen zu erfüllen und einen hohen Anteil an Übernahmevariation zu realisieren.⁶²⁶

Im nächsten Schritt werden die Voruntersuchungen zur prozessualen Beschreibung der Variantenauswahl und die zur Unterstützung der Variantenauswahl durch die Ermittlung von Erfüllungskennwerten (FIT, BEST-FIT, NEAREST-FIT) und den Variationsanteilen im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS mit Hilfe einer detaillierten Produktanalyse auf „echte“ Nockenwellen übertragen.

⁶²⁶ vgl. hierzu Einteilungskriterien für Übernahme- und Gestaltvariation in diesem Kapitel auf S. 179 ff.

6.3 Produktanalyse zu gebauten Nockenwellen

Die Ergebnisse aus der Produktanalyse sind erforderlich, um die Variantenauswahl, die sich aus der Variantenableitung und der Variantenbewertung zusammensetzt, detailliert am Beispiel der gebauten Nockenwelle beschreiben zu können. Darauf aufbauend wird die Methode entwickelt und in einen anwendbaren Softwareprototyp überführt (Ziel 2). Dabei steht im Rahmen der Produktanalyse die Klärung der zentralen Forschungsfrage FF2.2 im Mittelpunkt der Untersuchungen.⁶²⁷

Forschungsfrage 2.2

FF2.2 Wie sind die Elemente des Baukastens als korrespondierende Paare aus Objekt (Teilsystem) und Objektbeschreibung (Teilzielsystem) zu beschreiben, um sie auf neue Kundenzielsysteme anpassen zu können?

Die Produktanalyse wird entsprechend Abbildung 6-9 in sechs Teilbereiche strukturiert. Diese Bereiche umfassen korrespondierende Arbeitspakete, die zur Klärung relevanter Teilaspekte bearbeitet werden. Die Bearbeitung der Arbeitspakete basiert hierbei auf Grundlage eigener Konstruktionsexpertise des Autors und der Unterstützung weiterer Experten aus dem Entwicklungsbereich. Bei der Anwendung der Methode auf ein anderes Produkt sind die in den Folgekapiteln aufgeführten Arbeitspakete analog durchzuführen, um das relevante, produktspezifische Wissen für die Übertragung der Methodenbeschreibung zu erarbeiten.⁶²⁸

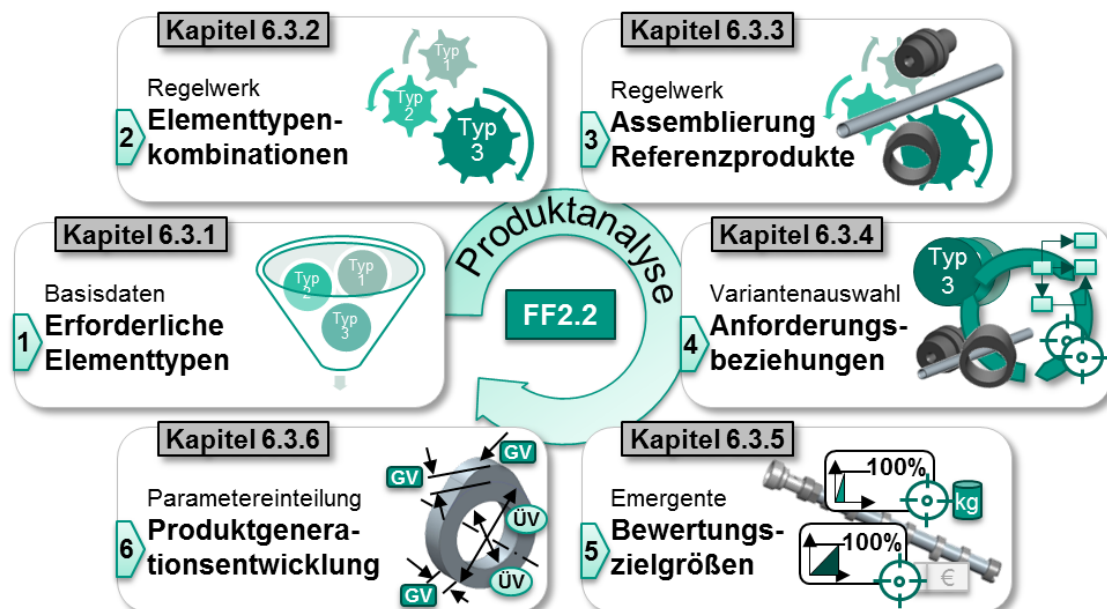


Abbildung 6-9: Struktur der Produktanalyse mit Kapitelzuordnung

⁶²⁷ vgl. Abbildung 6-1 auf S. 172

⁶²⁸ vgl. Kapitel 5.1.2 – Bewertung der produktspezifischen Methodeignung

6.3.1 Definition der relevanten, zu kombinierenden Elementtypen

In diesem Kapitel werden entsprechend Abbildung 6-10 die Arbeitspakete des ersten Teilbereichs der Produktanalyse beschrieben.

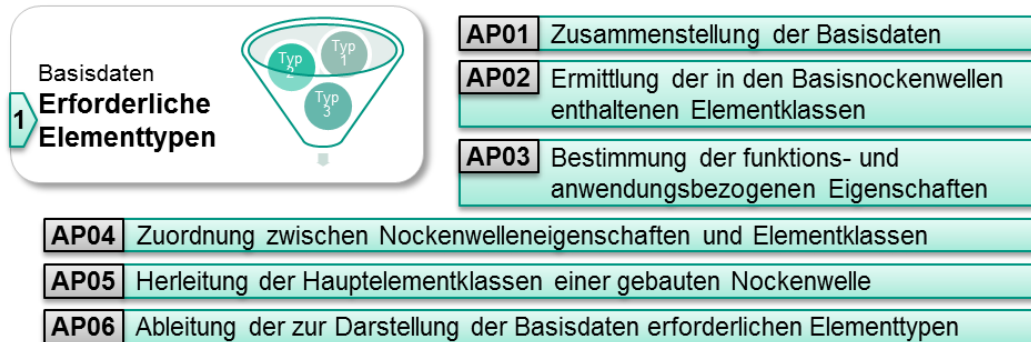


Abbildung 6-10: Arbeitspakete zum ersten Teilbereich der Produktanalyse⁶²⁹

Zusammenstellung der Basisdaten (AP01)

Die Datenbasis beinhaltet die gängigen Nockenwellentypen. Die einleitende Recherche ergab 42 gebaute Nockenwellen, die mit den relevanten Informationen für die weiterführenden Untersuchungen verknüpft waren und deshalb als Datenbasis festgelegt werden konnten. Die Basisnockenwellen lassen sich gemäß Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 fünf gängigen Typen zuordnen. In der Typenspalte ist zusätzlich die Häufigkeit des jeweiligen Typs innerhalb der 42 Basisnockenwellen vermerkt.

Typ	Beschreibung (Abkürzung)	Darstellung
1 7/42	Nockenwellen mit Schrauberfreigängen ⁶³⁰ für die Montage des Zylinderkopfes auf den Motorblock (ScrewDriver)	Schrauberfreigänge (4x)
2 7/42	Nockenwellen mit integrierter Blow-By-Abscheidung ⁶³¹ (OilMist ⁶³²)	Austritt gereinigtes Blow-By-Gas Einlass Blow-By-Gas Drallerzeuger

Tabelle 6-1: Typeneinteilung der 42 Basisnockenwellen (Teil 1/2)

⁶²⁹ vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

⁶³⁰ Geprägte oder auch bearbeitete Schrauberfreigänge (engl. Screw Driver Clearance) ermöglichen bei der Zylinderkopfmontage auf den Motor die Zugänglichkeit der Zylinderkopfschrauben mit einem Schrauberwerkzeug, und das bei bereits montierten Nockenwellen im Zylinderkopf.

⁶³¹ vgl. MAHLE 2013 S. 108 f.

⁶³² Ölnebelabscheidung engl. Oil Mist Separation (OilMist)

Typ	Beschreibung (Abkürzung)	Darstellung
3 5/42	MAHLE-CamInCam® - Gebaute Nockenwelle mit beweglichen Nockenpaaren zur baurneutralen Darstellung der Variabilität im Ventiltrieb ⁶³³ (CIC)	<p>Variable Nocken (4x) verstoffet auf Innenwelle Innenwelle Festnocken (4x) auf Außenwelle</p>
4 14/42	Wälzgelagerte Nockenwellen (Low Friction Camshaft, LFC) zur Reibleistungsreduzierung ⁶³⁴ (LFC)	<p>Nadellager (5x)</p>
5 9/42	Standardnockenwelle aus Stahlrohr, Antriebselement mit gefügten Nocken und weiteren Komponenten ⁶³⁵ (Standard)	

Tabelle 6-2: Typeneinteilung der 42 Basisnockenwellen (Teil 2/2)

Ermittlung der Elementklassen der Basisnockenwellen (AP02)

Im nächsten Schritt wurde untersucht, in welche Elementklassen sich die Komponenten der 42 Basisnockenwellen einteilen lassen. Die Analyse ergab, dass sich alle Bauteile zehn Elementklassen gemäß Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 zuordnen lassen.

Elementklasse	Abkürzung	Beispielelemente
Antriebselemente	DRVE engl. Drive Element	Antriebsstopfen, Flansche
Antriebselemente 2	DRVE2 engl. Drive Element 2	Kettenräder, Zahnriemenräder, Zahnräder
Abtriebselemente	DRVNGE engl. Driving Element	Abtriebsstopfen, Vakuumpumpenstopfen
Nockenwellenkörper	CABDY engl. Camshaft Body	Rohre, Vollwellen

Tabelle 6-3: Elementklassen der Basisdaten (Teil 1/2)

⁶³³ vgl. MAHLE 2013 S. 107 f.

⁶³⁴ vgl. MAHLE 2013 S. 105 f.

⁶³⁵ vgl. MAHLE 2013 S. 103 ff.

Elementklasse	Abkürzung	Beispielelemente
Ventilnocken	VCAM engl. Valve Cam	Ventilnocken, verstiftete Ventilnocken (CIC), Nocken mit Axiallagerbund und/ oder Sechskant 
Pumpennocken	PCAM engl. Pump Cam	Dreifach-, Vierfachpumpennocken 
Axiallagerelemente	ABE engl. Axial Bearing Element	Axiallagerringe, Kugellager 
Radiallagerelemente	RBE engl. Radial Bearing Element	Radiallagerringe, Nadellager 
Ausricht- und Montageelemente	FTE engl. Fitting Element	Sechskantringe, Zweiflächringe 
Signalgeberelemente	TGE engl. Trigger Element	Geberräder 

Tabelle 6-4: Elementklassen der Basisdaten (Teil 2/2)

Bestimmung der funktions- und anwendungsbezogenen Eigenschaften (AP03)

Nach der Ermittlung der Elementklassen wurde im nächsten Schritt untersucht, worin sich die in Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 gezeigten Beispielelemente innerhalb der betreffenden Elementklasse hinsichtlich der Produkteigenschaften grundsätzlich unterscheiden. In der Klasse der Ventilnocken gibt es beispielsweise Standardventilnocken (vgl. Tabelle 6-4, Elementklasse Ventilnocken, erster Nocken von links) und Ventilnocken mit Zusatzfunktionen für entsprechende Nockenwellenanwendungen (CIC, Rollen- oder Gleitabgriff). Ein Ventilnocken mit Axiallagerbund (vgl. Tabelle 6-4, Elementklasse Ventilnocken, dritter Nocken von links) kann beispielsweise die Funktion der axialen Lagerung mit übernehmen und für eine CIC-Anwendung müssen entsprechende Nocken für die Verstiftung mit der Innenwelle gewählt werden (vgl. Tabelle 6-4, Elementklasse Ventilnocken, zweiter Nocken von links). Für die verschiedenen Nockenausprägungen lassen sich demnach unterschiedliche Typen definieren, die durch Funktionen und Anwendungsbereich beschrieben werden können. Die Analyse der 42 Nockenwellen des Basisdatensatzes ergab hierzu 21 relevante Produkteigenschaften, die sich in Haupt- und Nebenfunktionen sowie Nockenwellenanwendungen unterteilen lassen. Die Tabelle 6-5 zeigt zunächst die identifizierten Hauptfunktionen der Produktklasse Nockenwelle. Diese Funktionen müssen, unabhängig davon, ob eine gebaute Nockenwelle oder eine einteilige Nockenwelle in Form einer Guss- oder Schmiedewelle vorliegt, erfüllt werden.

Hauptfunktion	Variablenbenennung ⁶³⁶	Beschreibung
Nockenwelle antreiben	DriveCamshaft	Das Antriebsmoment wird über Antriebselemente oder direkt am Nockenwellenkörper in die Nockenwelle eingeleitet.
Antriebsmoment leiten	GuideDriveTorque	Das Antriebsmoment wird vom Antrieb über den Wellenkörper an die Komponenten übertragen.
Ventil betätigen	ActivateValve	Die Nockenwelle aktiviert über die Ventilnocken die Nockenfolger und dieser die Ventile.
Nockenwelle in der Winkellage referenzieren	ReferenceCamshaftAngular	Zur Definition der Winkellage zwischen Kurbelwelle, Nockenwelle und den Nockenwellenkomponenten wird eine eindeutige Bauteilreferenz benötigt.
Nockenwelle bidirektional axial lagern	SupportAxialBidirectional	Die Axiallagerung im Zylinderkopf kann ein Bauteil übernehmen, das axial in beide Richtungen positionieren kann.
Nockenwelle unidirektional axial lagern	SupportAxialUnidirectional	Die Axiallagerung kann von zwei Bauteil übernommen, wobei jedes Bauteil für sich eine Richtung übernimmt.
Nockenwelle radial lagern	SupportRadial	Die radiale Lagerung kann durch Radiallagerelemente, An- und Abtriebselemente, den Nockenwellenkörper selbst oder Kombinationen dieser Elemente übernommen werden.

Tabelle 6-5: Hauptfunktionen einer Nockenwelle

Die Hauptfunktionen in Tabelle 6-5 sind immer im Rahmen des geforderten Funktionsumfangs enthalten, da sie Grundvoraussetzungen für die Produktklasse Nockenwelle sind und demzufolge innerhalb einer abgeleiteten Variante des Baukastens dargestellt werden müssen. Dazu sein nochmals erwähnt, dass die Bauteile ihre Funktionen nur in Wechselwirkung mit der Bauteilumgebung erfüllen können.⁶³⁷ Der Nocken kann die Ventile nur in Wechselwirkung mit dem Nockenfolger aktivieren. Diese grundlegende Hauptfunktion einer Nockenwelle, Ventile zu betätigen, wie auch alle anderen Hauptfunktionen der Produktklasse Nockenwelle, werden deshalb vom Kunden auch nicht explizit gefordert. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass gefordert wird, bestimmte Hauptfunktionen mit konkreten Komponenten zu realisieren, d.h., die Axiallagerung soll beispielsweise explizit vom Antriebselement übernommen werden und nicht durch Axiallagerelemente auf der Nockenwelle. Für die Auswahl

⁶³⁶ Eingesetzte Variablenbenennung im Rahmen des Softwareprototyps

⁶³⁷ vgl. Contact and Channel-Ansatz (C&C²-A) auf S. 19 f.

sind deshalb weniger die Hauptfunktionen als vielmehr die Nebenfunktionen von entscheidender Relevanz, die in Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7 aufgeführt sind.

Nebenfunktion	Variablenbenennung	Beschreibung
Nockenwelle ausrichten	AdjustCamshaft	Zum Ausrichten und Fixieren der Nockenwelle während der Montage können entsprechende Elemente auf der Nockenwelle eingesetzt werden.
Lagerung mit Schmieröl versorgen	LubricateBearing	Für die Ölversorgung der Nockenwellenlager kann der mit Bohrungen versehene Nockenwellenkörper als Ölgalerie verwendet werden.
Freigänge für Schrauber bereitstellen	ScrewdriverClearance	Bei geringen Nockenwellenachsabständen können für die Zugänglichkeit der Zylinderkopfschrauben mit dem Montageschrauber Freigänge erforderlich werden.
Ölnebel abscheiden	SeparateOilMist	Das Blow-By-Gas wird durch Einlassöffnungen in das Innere des Nockenwellenkörpers gesaugt, wobei die Rotation der Welle dazu führt, dass der im Gas enthaltene Ölnebel durch die Fliehkräfte an der Innenwandung als Film niederschlägt. Zur Verstärkung dieses Effekts werden spezielle Drallerzeuger verwendet.
Nockenwelle verschließen	SealCamshaft	Der Nockenwellenkörper wird bei dieser Anforderung gegen die Umgebung durch entsprechende Elemente verschlossen.
Zentralverschraubung bereitstellen	CentralScrew	Antriebselemente wie Zahnräder oder Riemenräder werden häufig stirnseitig verschraubt und erfordern hierzu entsprechende Gewinde.
Signal erzeugen	CreateSignal	Insbesondere Nockenwellen mit einer Verstellereinheit verfügen über Signalgeberelemente mit entsprechenden Sensoren, um die Winkelposition der Welle relativ zur Kurbelwelle zu detektieren und im Steuergerät zu verarbeiten.
Ölumpfe antreiben	DriveOilPump	Abtriebselemente werden häufig dazu verwendet, Ölpumpen anzutreiben.
Kraftstoffpumpe antreiben	DriveFuelPump	Kraftstoffpumpen können über Abtriebselemente oder Pumpennocken angetrieben werden.
Unterdruckpumpe antreiben	DriveVacuumPump	Zum Antrieb von Vakuumpumpen werden spezielle Abtriebselemente eingesetzt, wobei die Anbindung häufig über gehärtete, stirnseitige Nuten im Abtriebselement zur Aufnahme der pumpenseitigen Feder realisiert wird.

Tabelle 6-6: Nebenfunktionen einer Nockenwelle (Teil 1/2)

Nebenfunktion	Variablenbenennung	Beschreibung
Antriebselement aufnehmen	SupportGear	Antriebselemente 2 wie Kettenräder, Zahn- oder Riemenräder können auf dem Wellenkörper direkt oder auf anderen Antriebselementen, vorwiegend Antriebsstopfen, montiert werden. ⁶³⁸
Nockenwellen-versteller aufnehmen	SupportCamshaftPhaser	Für hydraulische Nockenwellenversteller werden Antriebselemente erforderlich, die Steuerölbohrungen zur Darstellung der Regelkreise enthalten.

Tabelle 6-7: Nebenfunktionen einer Nockenwelle (Teil 2/2)

Einsprechend der Darstellbarkeit von geforderten Nebenfunktionen im Rahmen einer abgeleiteten Nockenwellenvariante stellen auch Anforderungen bezüglich der Nockenwellenanwendung Auswahlkriterien dar. In einem ersten Ansatz stand eine naheliegende Überlegung zur Diskussion, die anwendungsbezogenen Produkteigenschaften an den Nockenwellentypen⁶³⁹ zu orientieren. Die Standardnockenwellen (Typ 5) sowie die Nockenwellen mit Schrauberfreigängen (Typ 1) und integrierter Nockenwellenölnebelabscheidung (Typ 2) lassen sich mit den definierten Haupt- und Nebenfunktionen hinsichtlich ihrem Funktionsumfang hinreichend detailliert beschreiben. Für CIC-Anwendungen sind bislang keine Funktionseigenschaften definiert, die die betreffenden Elemente (An- und Abtriebselemente, Nockenwellenkörper und Ventilschalen) hinsichtlich ihrer Eignung für eine CIC-Nockenwelle (Typ 3) kennzeichnen. Selbiges trifft auch auf die Kennzeichnung von LFC-Elementen (An- und Abtriebselemente, Nockenwellenkörper sowie Axial- und Radiallager-elemente) für LFC-Nockenwellen (Typ 4) zu. Zusätzlich wird unterschieden, ob die Nockenwellen für einen Rollenabgriff oder einen Gleitabgriff eingesetzt werden können. Die Eigenschaft zur Anwendungsmöglichkeit hinsichtlich der geforderten Art der Nockenfolgerbetätigung ist hierzu dem Ventilschalen zugeordnet. Hierfür werden entsprechend Tabelle 6-8 nachfolgende anwendungsbezogene Produkteigenschaften definiert.

⁶³⁸ Der Antrieb der Nockenwelle ist aus Sicht des Zulieferunternehmens abhängig vom angefragten Lieferumfang. Montiert der Kunde selbst ein Antriebselement 2 (z.B. ein Riemenrad), so verläuft die Systemgrenze beispielsweise zwischen dem Antriebsstopfen und dem Konnektor, der das Kundenriemenrad modelliert. Verschiebt sich die Systemgrenze zwischen Riemenrad und Riemen, der jetzt aus sich des Zulieferers der antreibende Konnektor ist, dann wandert auch die Funktion „Nockenwelle antreiben“ auf das Antriebselement 2, d.h., vom Antriebsstopfen auf das Riemenrad.

⁶³⁹ vgl. Tabelle 6-1 auf S. 188

Verwendung	Variablenbenennung	Beschreibung
MAHLE-CamInCam®	CIC	Gebaute Nockenwelle mit beweglichen Nockenpaaren zur bauraumneutralen Darstellung der Variabilität im Ventiltrieb.
Wälzgelagerte Nockenwellen	LFC	Reibleistungsreduzierung durch den Einsatz von Wälzlagern.
Nockenwellen für Rollen- oder Gleitabgriff	RollerTappet	Die Nockenwellen sind entsprechend der Art der Nockenfolgerbetätigung für einen Rollen- (Rollensößel, Rollenschlepphebel) oder einen Gleitabgriff (Flachstößel) konzipiert. Läuft auf der Nockenkontur eine Rolle, so muss die Eigenschaft „RollerTappet“ aktiviert sein. Falls ein Flächstößel eingesetzt wird kommen hingegen nur Nocken in Frage, bei denen „RollerTappet“ deaktiviert ist.

Tabelle 6-8: Anwendungsbezogene Produkteigenschaften einer Nockenwelle

Zuordnung zwischen Nockenwelleneigenschaften und Elementklassen (AP04) und Herleitung der Hauptelementklassen einer gebauten Nockenwelle (AP05)

Aufbauend auf den bisherigen Untersuchungen wurden als nächstes die Beziehungen zwischen den Elementklassen und den funktions- und anwendungsbezogenen Nockenwelleneigenschaften untersucht (AP04). Das Untersuchungsergebnis hierzu zeigt Tabelle 6-9. Dabei sind bestehende Beziehungen mit einer „1“ gekennzeichnet.

Elementklassen ▶ Produkteigenschaften ▼		Nockenwellenkörper (CABDY) MUSS Ventilnocken (VCAM) Antriebsselemente (DRVE) Abtriebsselemente 2 (DRVE2) Ausrichtelemente (DRVNGE) Pumpennocken (FTE) Radiallagerelemente (PCAM) Axiallagerelemente (RBE) Signalgeberelemente (TGE)									
Hauptfunktionen	Nockenwelle antreiben	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	Antriebsmoment leiten	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ventile betätigen	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Nockenwelle in der Winkellage referenzieren	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1
	Nockenwelle bidirektional axial lagern	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
	Nockenwelle unidirektional axial lagern	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
	Nockenwelle radial lagern	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0

Tabelle 6-9: Beziehungen zwischen Hauptfunktionen und Elementklassen

Analog zu Tabelle 6-9 wurden die Beziehungen zwischen den Elementklassen und den Nebenfunktionen sowie den anwendungsbezogenen Produkteigenschaften ermittelt⁶⁴⁰ und die Gesamtbeziehungsstruktur gemäß Abbildung 6-11 aufgestellt.

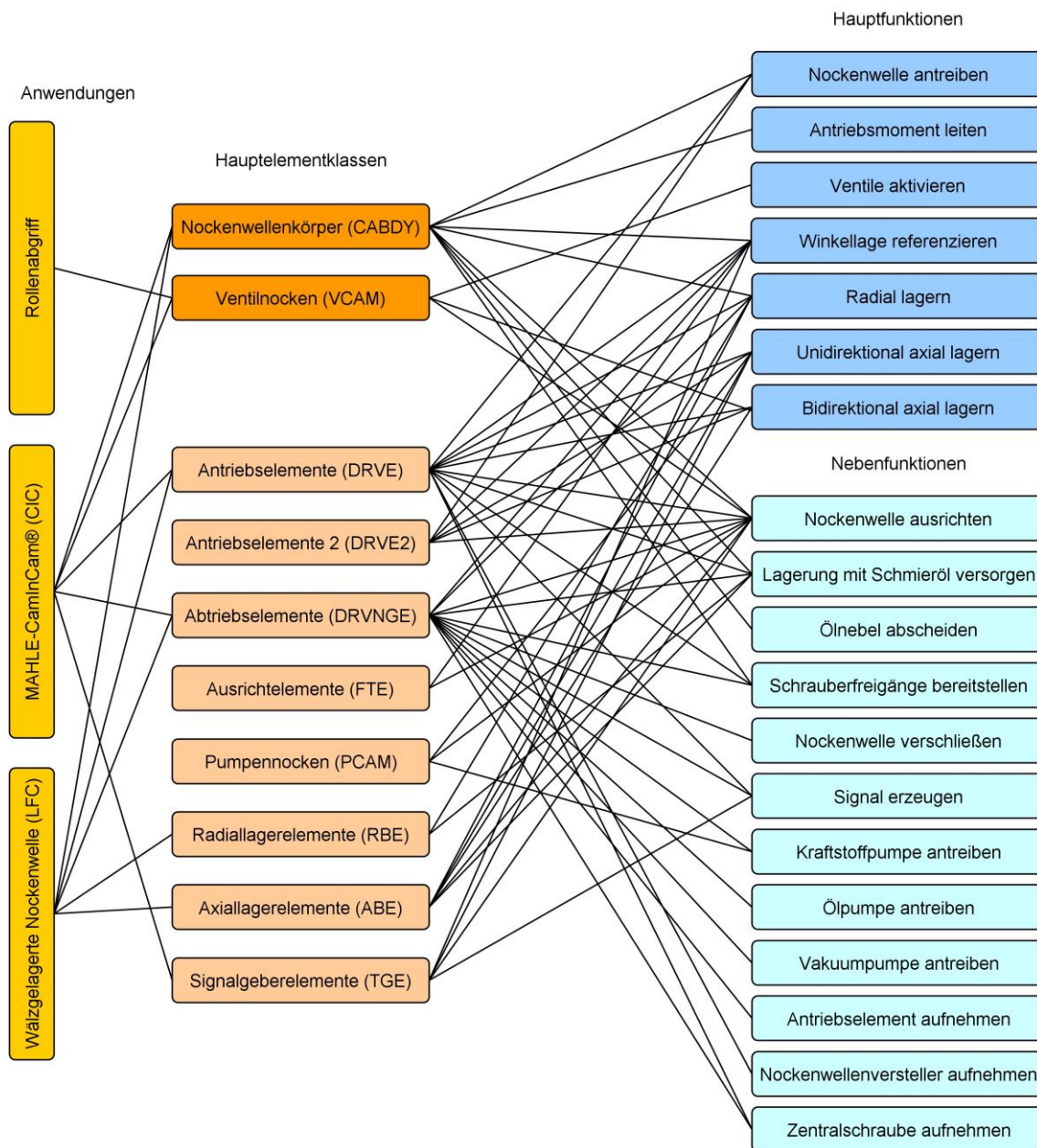


Abbildung 6-11: Beziehungen zwischen Anwendungen, Elementklassen und Funktionen

Die tabellarische Visualisierung der Beziehungen zwischen Hauptfunktionen und Elementklassen gemäß Tabelle 6-9 zeigt, dass die sechs Hauptfunktionen einer Nockenwelle durch die beiden Elementklassen „Nockenwellenkörper“ und „Ventilnocken“ abgedeckt werden können. Dadurch, dass das Antriebsmoment nur durch den

⁶⁴⁰ Tabellenbasierte Darstellung der Beziehungen zwischen Elementklassen, Nebenfunktionen und anwendungsbezogenen Produkteigenschaften im Anhang in Kapitel 11.2.2

Nockenwellenkörper an die Elemente der Nockenwelle geleitet werden kann, und die Betätigung des Nockenfolgers und damit die Ventilbetätigung ausschließlich durch entsprechende Ventalnocken realisiert werden kann, sind diese beiden Elementklassen die Hauptelementklassen einer gebauten Nockenwelle, die immer im Rahmen einer abgeleiteten Nockenwellenvariante enthalten sein müssen (AP05). Dabei kann auf Grundlage dieser Betrachtungen eine Nockenwelle, bezogen auf die Darstellung der Hauptfunktionen, theoretisch aus einem Nockenwellenkörper und der entsprechenden Anzahl an Ventalnocken aufgebaut werden. Werden zusätzliche Nebenfunktionen gefordert müssen in der Regel weitere Elemente aus anderen Elementklassen integriert werden. Der Bedarf an Nockenwellenelementen zusätzlich zu den Hauptelementen basiert zudem auf den wechselseitigen Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen Elementen, Funktionen und Anwendungen, wodurch diese nur bedingt miteinander kompatibel sind. Die Herleitung des Regelwerks zur Beschreibung der bedingten Kompatibilitäten wird im nachfolgenden Unterkapitel thematisiert.

Ableitung der erforderlichen Elementtypen (AP06)

Abschließend wird die Bestimmung der relevanten, zu kombinierenden Elementtypen erläutert. Diese Elementtypen beschreiben die Ausprägungen der zehn Elementklassen, die zur Darstellung der 42 Basisnockenwellen erforderlich sind. Die Elementtypen unterscheiden sich gemäß den vorhergehenden Ausführungen auf übergeordneter Ebene ausschließlich durch funktions- und anforderungsbezogene Produkteigenschaften. Die Elementtypenbeschreibungen sind selbst Objekte und werden, wie in den folgenden Kapiteln noch detaillierter beschrieben, mit den entsprechenden CAD-Modellen des Baukastens und deren Dateninformationssätzen verknüpft. Die Abbildung 6-12 zeigt am Beispiel eines Antriebselementes hierzu den Aufbau eines Baukastenelements, das ein korrespondierendes Paar aus einem Objekt in Form eines CAD-Modelles und der Objektbeschreibung darstellt. Die Elementtypenbeschreibung und der Dateninformationssatz bilden zusammen mit dem Modellparametersatz, den Bewertungszielgrößen und den Variationsanteilen im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung die Objekte der Objektbeschreibung.

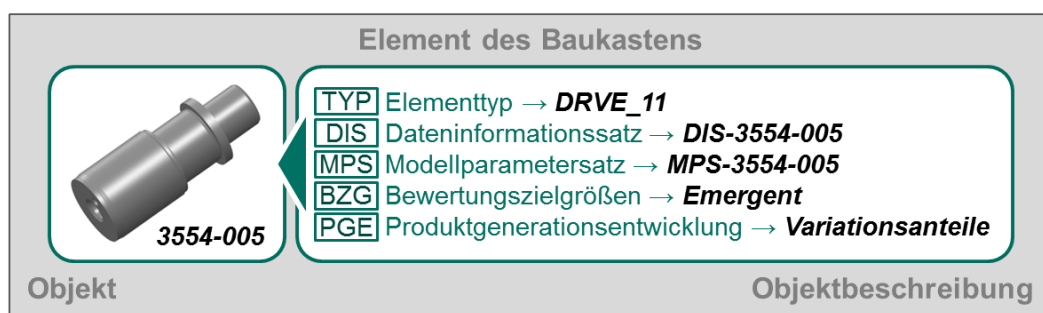


Abbildung 6-12: Aufbau der Baukastenelemente aus Objekt und Objektbeschreibung

Die Dateninformationssätze enthalten neben Bauteilinformationen (Material, Oberflächenbeschaffenheit, Härtezustand, Herstellverfahren, etc.) auch Informationen zum Entwicklungsprojekt (Dokumentnummern, Kundeninformationen, Motorverwendung, Motorentyp, etc.), im Rahmen dessen das Bauteil in der vorliegenden Form entstanden ist. Den DIS-Daten gemein ist dabei, dass diese Produkteigenschaften durch die Verwendung der betreffenden Bauteile für ein neues Kundenprojekt nicht vom Konstrukteur für die Variantenauswahl angepasst werden. Wird ein anderer Härtezustand benötigt, dann wird ein passendes Bauteil im Baukasten gesucht, das diese Bedingungen erfüllt. Anders sieht es mit dem Modellparametersatz aus. Mit diesem wird das vorliegende CAD-Modell an die neuen, geometrischen Gegebenheiten angepasst, um die geometriegebundenen Bewertungszielgrößen der Elemente des Baukastens unter den neuen Randbedingungen zu ermitteln. Die Bewertungszielgrößen der Baukastenelemente emergieren im Rahmen einer gültigen Elementkombination auf Gesamtsystemebene und werden zur Ermittlung der FIT-Bedingungen durch Abgleich mit den Kundenanforderungen herangezogen, um geeignete Varianten auf Basis des aktuellen Baukasteninhaltes zu finden. Zusätzlich werden die Parameter des Modellparametersatzes entsprechend der Ausführungen in Kapitel 6.2 durch die PGE - Produktgenerationsentwicklung gemäß den Variationsarten charakterisiert.

Die Elementtypen bilden dabei die Beschreibung auf einer übergeordneten Meta-Ebene⁶⁴¹ und haben deshalb im Allgemeinen auch mehrere Entsprechungen im aktuellen Baukasten. Die Analyse der Basisdaten ergab 87 Elementtypen, die zur funktions- und anwendungsbezogenen Beschreibung der 42 Basisnockenwellen benötigt werden. Hierzu wurden die anwendungs- und funktionsbezogenen Produkteigenschaften den Komponenten der Basisnockenwellen zugeordnet. Innerhalb der Elementklassen ergaben sich dabei unterschiedliche Eigenschaftskombinationen die in Summe in 87 Elementtypen resultierten, die sich gemäß Tabelle 6-10 auf die zehn Elementklassen wie folgt aufteilen.

	Antriebsselemente	Antriebsselemente 2	Abtriebsselemente	Nockenwellenkörper	Ventilnocken	Pumpennocken	Axiallagerselemente	Radiallagerselemente	Ausrichtelemente	Signalgeberelemente
Anzahl der Elementtypen	28	5	9	18	12	1	6	3	3	2

Tabelle 6-10: Erforderliche Elementtypen je Klasse zur Abbildung der Basisnockenwellen

⁶⁴¹ vgl. iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE auf S. 33 ff.

Die Abbildung 6-13 stellt die Elementtypen und die funktions- und anwendungsbezogenen Nockenwelleneigenschaften aus Tabelle 6-10 graphisch dar.

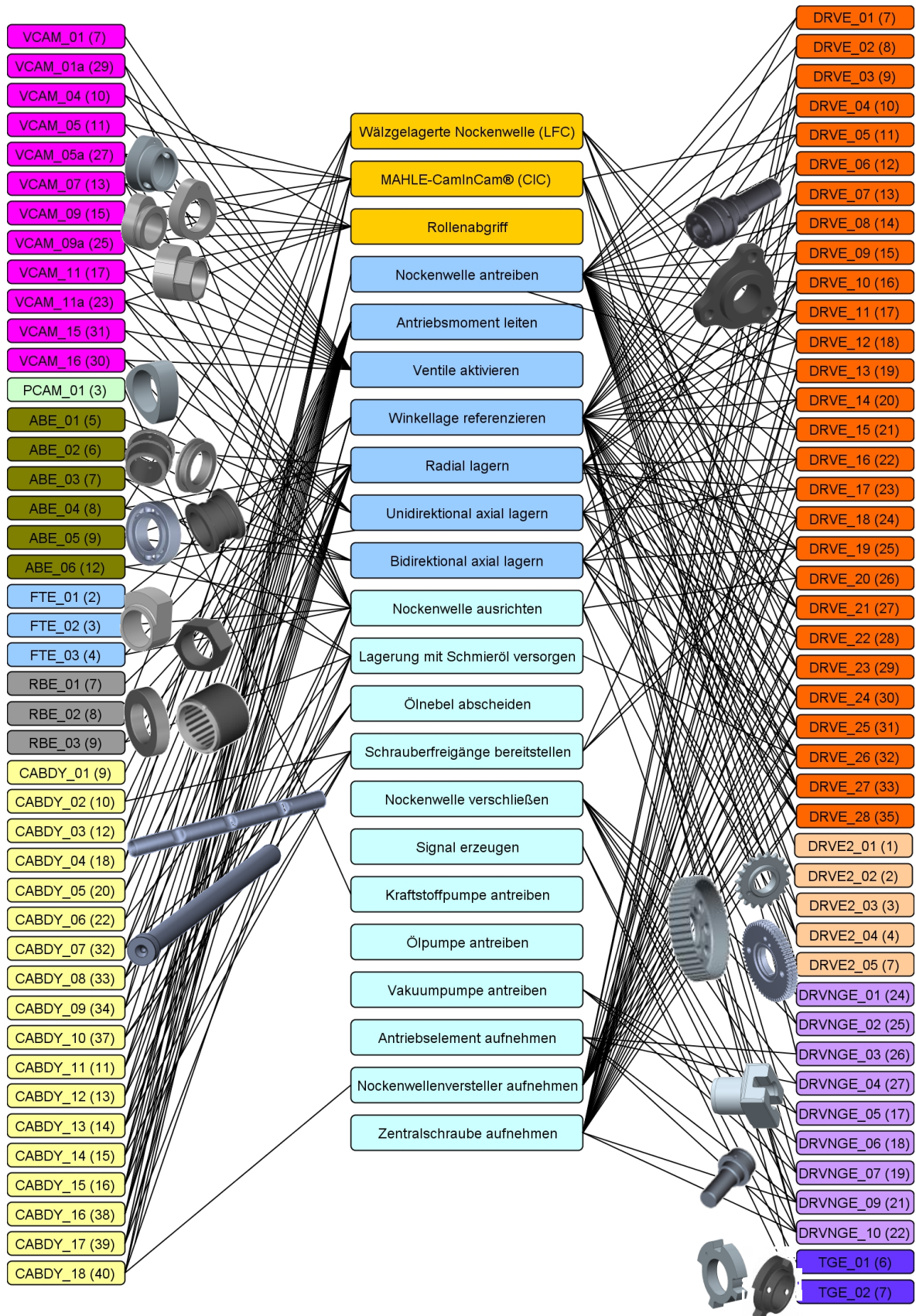


Abbildung 6-13: Beziehungen zwischen funktions- und anwendungsbezogenen Nockenwelleneigenschaften der 87 Elementtypen zur Beschreibung der 42 Basisnockenwelleneigenschaften

Das Beziehungsdiagramm in Abbildung 6-13 besteht aus 109 Knoten (Elementtypen und Eigenschaften) und 264 Kanten (Beziehungen zwischen Elementtypen und Eigenschaften). Da zu diesem Zeitpunkt der Untersuchungen noch keine produktspezifischen Kombinationsregeln vorlagen, hätten sich durch Kombination der 87 Elementtypen 29.393.280 Kombinationsmöglichkeiten ergeben. Da die Elementtypen jeder gültigen Kombination im Anschluss durch Teilenummern entsprechender CAD-Modelle aus dem Baukasten ersetzt werden, und zudem die Elementtypen im Allgemeinen mehrere Entsprechungen haben, würde die derzeitige Datenmenge und damit die Komplexität derart zunehmen, dass keine effiziente Auswahl möglich wäre.

Durch die Anwendung produktspezifischer Kombinationsregeln sowie der Kunden- und Anbieteranforderungen reduziert sich zwar die Anzahl an gültigen Elementtypenkombinationen. Jedoch konnte auf Grundlage des derzeitigen Wissensstandes noch keine Aussage darüber gemacht werden, wie viele verbleibende Kombinationen für den weiteren Auswahlprozess in Betracht gezogen werden müssen. Deshalb macht es Sinn zu einem frühen Zeitpunkt im Auswahlprozess auf übergeordneter Ebene durch den Einsatz grundlegender Auswahlkriterien gemäß der Elementtypenbeschreibungen eine Vorauswahl treffen zu können. Hierfür spricht auch, dass zu Beginn des Auswahlprozesses noch keine Aussagen hinsichtlich der geometriegebundenen Bewertungszielgrößen getroffen werden können, da diese erst nach Anpassung der Elemente an die geometrischen Randbedingungen beim Eintreten in die zweite Iteration ins Zielsystem aufgenommen werden und damit explizit für die Auswahl herangezogen werden können.⁶⁴² Hingegen kann aber bereits zu Beginn des Variantenauswahlprozesses eine Vorauswahl auf Basis von funktions- und anforderungsbezogenen Festforderungen durchgeführt werden, um den Lösungsraum zu einem frühen Zeitpunkt auf die grundsätzlich in Frage kommenden Elementtypenkombinationen zu reduzieren. Die Herleitung der hierzu erforderlichen produktspezifischen Regeln ist Thema des nachfolgenden Kapitels.

6.3.2 Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen

Zur Darstellung eines effizienten Auswahlprozesses müssen die im vorhergehenden Kapitel ermittelten Beziehungen zwischen den Elementtypen in produktspezifische Regeln übersetzt werden, um die Anzahl der Elementkombinationen auf die produktspezifisch zulässigen Kombinationen zu reduzieren.⁶⁴³ Zur Herleitung und Verifikation des Regelwerkes werden im zweiten Teilbereich der Produktanalyse die in Abbildung 6-13 aufgeführten Arbeitspakete bearbeitet.

⁶⁴² vgl. Kapitel 6.1 – Variantenentwicklung im erweiterten ZHO-Modell

⁶⁴³ vgl. Abbildung 6-13 auf S. 198



Abbildung 6-14: Arbeitspakete zum zweiten Teilbereich der Produktanalyse⁶⁴⁴

Herleitung produktspezifischer Regeln (AP07)

Um alle funktions- und anwendungsbezogenen Produkteigenschaften sowie alle Elementklassen miteinander auf etwaige Inkompatibilitäten zu untersuchen wurde eine Matrixdarstellung gewählt, die im Rahmen von Expertenworkshops bearbeitet wurde. Für die hierbei identifizierten Inkompatibilitäten wurden anschließend Regeln formuliert, um die ungültigen Elementkombinationen aus der Menge an gültigen Kombinationen regelbasiert auszuschließen. Beispielsweise muss die Kombination einer wälzgelagerte Nockenwelle⁶⁴⁵ mit der Funktion „Lagerung mit Schmieröl versorgen“ ausgeschlossen werden, da die für Gleitlager eingesetzte Versorgung der Lager mit Drucköl über den Nockenwellenkörper den korrekten Betrieb der Nadellager⁶⁴⁶ behindern und damit im schlimmsten Fall zu Bauteilversagen führen würde. Ebenso darf innerhalb einer Elementkombination nur einmal die Funktion „Nockenwelle axial lagern“ inbegriffen sein, wobei sich diese wiederum auf zwei Elemente aufteilen kann, d.h., eine Axiallagerschulter kann beispielsweise durch das Antriebselement und die andere durch einen Axiallagerring bereitgestellt werden. Als abschließendes Beispiel dient an dieser Stelle eine Nockenwelle mit integrierter Ölnebelabscheidung, die mit der Funktion „Nockenwelle verschließen“ und in diesem Fall auch mit allen Typen der Elementklasse „Abtriebselemente“ inkompatibel ist, da die Funktion „Nockenwelle verschließen“ allen Elementtypen der Klasse „Abtriebselemente“ zugeordnet ist. Dies muss jedoch nicht immer der Fall sein, weshalb die Regeln nicht auf die Elementklassen sondern direkt auf die Elementtypen anzuwenden sind. Am Ende konnten 30 nockenwellenspezifische Grundregeln aufgestellt werden, die auf die Gesamtheit der Kombinationsmöglichkeiten der Elementtypen anzuwenden sind. Dieser speziell für gebaute Nockenwellen aufgestellte Regelsatz umfasst die grundlegenden Ausschlussregeln, die nur Elementtypenkombinationen zulassen, aus denen in den weiteren Aktivitäten gebaute Nockenwellen abgeleitet werden kön-

⁶⁴⁴ vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

⁶⁴⁵ vgl. LFC-Anwendung gemäß Tabelle 6-1 auf S. 188

⁶⁴⁶ Für LFC-Nockenwellen werden typischerweise Nadellager ohne Innenringe eingesetzt, bei denen der umgebende Ölnebel für deren Schmierung ausreichend ist.

nen. Diese Regeln sind demzufolge immer gültig und können deshalb nicht für den Auswahlprozess ein- oder ausgeschlossen werden.

Berechnung der produktspezifischen Elementtypenkombinationen (AP08)

Zur Berechnung wurde eine relationale Datenbank aufgebaut, in der zunächst die Tabellen der zehn Elementklassen mit den entsprechenden Feldern für deren funktions- und anforderungsbezogenen Produkteigenschaften aufgebaut wurden. Die Tabelle 6-11 zeigt am Beispiel der Elementklasse „Nockenwellenkörper“ die Beschreibung der elementtypenspezifischen Produkteigenschaften als Teilmenge des Gesamtumfangs der Produkteigenschaften der Elementklasse durch booleschen Variablenwerte (● ja; ○ nein).

Elementtyp	Produkteigenschaften									
	Anwendungen		Hauptfunktionen				Nebenfunktionen			
	Wälzgelagerte Nockenwelle	MAHLE-CamInCam®	Antriebsmoment leiten	Nockenwelle antreiben	Winkellage referenzieren	Nockenwelle radial lagern	Lagerung mit Schmieröl versorgen	Schrauberfreigänge bereitstellen	Ölnebel abscheiden	
CABDY_01	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
CABDY_02	○	○	●	○	○	○	○	○	●	○
CABDY_03	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○
.
.
CABDY_16	○	●	●	○	●	●	○	○	○	○
CABDY_17	○	●	●	○	●	●	○	●	○	○
CABDY_18	○	●	●	○	○	○	●	○	○	○

Tabelle 6-11: Auszug aus der Elementklasse „Nockenwellenkörper“

Für die restlichen neun Elementklassen wurden die Elementtypen analog der Tabelle 6-11 erstellt.⁶⁴⁷ Im Anschluss daran wurden die 30 nockenwellenspezifischen Regeln in logische Ausdrücke übersetzt und auf die Gesamtheit der aus den 87 Elementtypen resultierenden 29.393.280 Kombinationsmöglichkeiten angewendet. Hierdurch ergaben sich 74.196 gültige Elementtypenkombinationen, die nur noch rund 2,5% der Ausgangsmenge darstellen. Die verbleibenden Elementtypenkombinationen bilden hiernach die nockenwellenspezifischen Basiskombinationen⁶⁴⁸, die für die fall-spezifische Variantenauswahl zur Verfügung stehen. Hiervon ausgehend werden weitere Regelsätze erforderlich, um die Anzahl der produktspezifischen Basiskombinationen auf die anfragespezifischen Kombinationen zu reduzieren.

⁶⁴⁷ vgl. Elementklassen der Basisdaten in Tabelle 6-3 auf S. 189

⁶⁴⁸ Für den Aufbau des Softwareprototyps wurde hierfür engl. „Base Collection“ verwendet.

Erweiterung des Regelwerks für die produkteigenschaftsbasierte Auswahl

Hierzu werden zum einen Auswahlregeln (engl. Select rules) erforderlich, mit denen Kombinationen gewählt werden können, die konkrete funktions- und anforderungsbezogene Produkteigenschaften beinhalten. Des Weiteren werden aber auch Ausschlussregeln (engl. Exclude rules) benötigt, mit denen Elementtypenkombinationen gefunden werden können, die bestimmte Produkteigenschaften nicht beinhalten. Die Anwendung einer auftragsspezifischen Kombination von Auswahl- und Ausschlussregeln reduziert die Anzahl an verbleibenden, gültigen Elementtypenkombinationen. Dabei kann auch der Fall eintreten, dass sich für die gewählte Kombination an Auswahl- und Ausschlussregeln keine gültigen Elementtypenkombinationen ergeben.

Hierzu wurden für die Nebenfunktionen⁶⁴⁹ zwölf, für die anwendungsbezogenen Produkteigenschaften⁶⁵⁰ drei und zusätzlich für die konkrete Einbeziehung von vier Elementklassen (Antriebselemente 1 und 2, Abtriebselemente und Radiallagerelemente)⁶⁵¹ Auswahlregeln mit den korrespondierenden 19 Ausschlussregeln formuliert und in Form von logischen Ausdrücken im Gesamtregelwerk ergänzt. Dadurch, dass Anforderungen hinsichtlich funktions- und anforderungsbezogenen Eigenschaften durch mehrere Elementtypen erbracht werden können, besteht die Möglichkeit, dass der Umfang der Produkteigenschaften innerhalb gültiger Elementtypenkombinationen den tatsächlich geforderten Eigenschaftsumfang übersteigt. Derartiger Elementtypenkombinationen lassen sich über zusätzliche Optimierregeln identifizieren und für die weiteren Aktivitäten im Rahmen des Auswahlprozesses ausschließen.

Optimierung der gültigen Elementtypenkombinationen (AP09)

An diese Stelle des Auswahlprozesses, können Optimierregeln auf funktions- und anforderungsbezogene Produkteigenschaften sowie auf Elementtypen angewendet werden. Bei den funktionalen Eigenschaften kann des Weiteren in Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden werden. Dabei besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Eigenschaften und Elementtypen innerhalb einer gültigen Kombination zu zählen und entsprechende Verhältniszahlen zu bilden, die dann wiederum als Optimiergrundlage herangezogen werden können. Im Rahmen von Workshops wurden verschiedene Möglichkeiten der Optimierung diskutiert. Dabei wurde deutlich, dass die Optimierung insbesondere hinsichtlich des Produktarchitekturtyps⁶⁵² unterschiedlich motiviert sein kann. Eine integrale Produktarchitektur bietet logistische Vorteile, indem durch eine hohe Funktionsintegration die Anzahl der benötigten Komponenten

⁶⁴⁹ vgl. Tabelle 6-6 auf S. 192 und Tabelle 6-7 auf S. 193

⁶⁵⁰ vgl. Tabelle 6-8 auf S. 194

⁶⁵¹ vgl. Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 auf S. 189 und 190

⁶⁵² vgl. Sedchaicharn 2010 S. 16 ff. und Kriterien und Kennzahlen auf S. 93 f.

reduziert werden kann. Jedoch kann sich ein hoher Anteil an funktionsrelevanten Parametern auch nachteilig auf die Kosten und die Lebensdauer auf Komponenten- und Systemebene auswirken. Demnach kann es fallspezifisch vorteilhaft sein, anstelle der Integralkonstruktion auf eine modulare Produktarchitektur zu optimieren und die Funktionen auf mehrere Komponenten zu verteilen, die zur Darstellung spezieller funktionsrelevanter Parameter in vorangegangenen Entwicklungsprojekten konzipiert worden sind. Die dabei erzeugte Komponentenvielfalt kann sich wiederum nachteilig auf die Montage auswirken, da eine höhere Anzahl an unterschiedlichen Bauteilen zusätzliche Montageeinrichtungen, Zuführungen, Lager- und Logistikkosten sowie Mitarbeiterkapazitäten bedingen.

Um die Möglichkeit zu haben, die Anzahl an gültigen Elementtypenkombinationen entsprechend den Anforderungen der konkreten Anfrage zu optimieren, werden drei Optimierungsmöglichkeiten vorgeschlagen:

- (1) **Standard** → Minimale Anzahl an Funktionen
- (2) **Integral** → Standard und minimale Anzahl an Elementtypen
- (3) **Modular** → Standard und maximale Anzahl an Elementtypen

Im nächsten Schritt wurde das Gesamtregelwerk bestehend aus den nockenwellenspezifischen Grundregeln, den produkteigenschaftsbezogenen Auswahl- und Ausschlussregeln sowie den Optimierregeln verifiziert.

Verifikation des Regelwerks zur Ermittlung der Typenkombinationen (AP10)

Die Verifikation des Regelwerks wurde auf Basis von neun Nockenwellen durchgeführt. Jede der neun Nockenwellen in Tabelle 6-12 ist durch eine Teilmenge aus zwölf Nebenfunktionen, drei anwendungsbezogenen Produkteigenschaften und vier Elementklassen beschrieben (● enthalten; ○ nicht enthalten). Zusätzlich teilen sich die funktions- und anforderungsbezogenen Produkteigenschaften nockenwellenspezifisch auf konkrete Elementtypen der zehn Elementklassen auf. Zum Nachweis, dass die definierten Regeln zur Bestimmung gültiger Elementtypenkombinationen richtig sind, müssen die nockenwellenspezifischen Elementtypen in der Tabelle 6-13 nach Anwendung der definierten Auswahl- und Ausschlussregeln in den verbliebenen Kombinationsmöglichkeiten enthalten sein. Dabei ist die Mindestanforderung, dass die Elementtypenkombinationen nach der Anwendung der Auswahl- und Ausschlussregeln noch enthalten sind. Da dies für alle neun Nockenwellen der Fall ist, und das Regelwerk zudem auf Basis einer Vielzahl von Testszenarien auf Plausibilität geprüft und dadurch iterativ verbessert wurde, konnte das Regelwerk zur Ermittlung der nockenwellenspezifischen Elementtypenkombinationen verifiziert werden.

Anforderungen ▲ Nockenwellentyp (Nr.)	Elementklassen									
	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●
1(1)	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○
1(2)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1(3)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2(4)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2(5)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3(6)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4(7)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4(8)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5(9)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Σ Ausschussregeln	○	●	○	●	○	○	○	○	○	○
Σ Auswahregeln	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Radiallager Elemente (RBE)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Abtriebs Elemente (DRVNGE)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Abtriebs Elemente 2 (DRVE2)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Abtriebs Elemente (DRVE)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Zentralschraube aufnehmen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Nockenwellenversteller aufnehmen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Antriebs Element aufnehmen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Vakuumpumpe antreiben	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kraftstoffpumpe antreiben	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ölpumpe antreiben	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Signal erzeugen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Nockenwelle verschließen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ölnebel abscheiden	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ölnebel abscheiden	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Schrauberfreigänge bereitstellen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Schrauberfreigänge bereitstellen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Lagerung mit Schmieröl versorgen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Lagerung mit Schmieröl versorgen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Nockenwelle ausrichten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Nockenwelle ausrichten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Rollenabgriff	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
MAHLE-CamInCam®	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Wälzgelagerte Nockenwelle	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Tabelle 6-12: Basisnockenwellen zur Verifikation des Regelwerkes beschrieben durch eine Teilmenge aus zwölf Nebenfunktionen, drei anwendungsbezogenen Produkteigenschaften und vier Elementklassen (● enthalten; ○ nicht enthalten)

Nockenwellentyp (Nr.)	Verbleibende Kombinationen nach Auswahl- und Ausschussregeln Anwendung der Auswahlregeln	Verbleibende Kombinationen nach Standardoptimierung	Kombination enthalten? Verbleibende Kombinationen nach integraler Optimierung		Kombination enthalten? Verbleibende Kombinationen nach modularer Optimierung		Kombination enthalten? Verbleibende Kombinationen nach modularer Optimierung	
			ja	nein	ja	nein	ja	nein
1(1)	DRVE_09, CABDY_13, VCAM_11, DRVNGE_07	980	36	980	36	ja	ja	ja
1(2)	DRVE_19, CABDY_07, VCAM_04, DRVNGE_01	9.596	6	9.596	6	ja	ja	ja
1(3)	DRVE_01, CABDY_02, VCAM_04, RBE_01, ABE_02	6.524	6	6.524	6	ja	ja	ja
2(4)	DRVE_09, CABDY_08, VCAM_11a, FTE_01	344	13	344	13	ja	ja	ja
2(5)	DRVE_28, CABDY_08, VCAM_04, ABE_06	344	13	344	13	ja	ja	ja
3(6)	DRVE2_02, CABDY_18, VCAM_09, RBE_01, ABE_02, TGE_01	128	7	128	7	ja	ja	ja
4(7)	DRVE_14, DRVE2_01, CABDY_04, VCAM_04, FTE_02, RBE_02, ABE_01, TGE_01	222	13	222	13	ja	ja	ja
4(8)	DRVE2_02, CABDY_04, VCAM_11, PCAM_01, RBE_02, TGE_01	715	16	715	16	ja	ja	ja
5(9)	DRVE2_05, CABDY_01, VCAM_04, RBE_01, ABE_01, TGE_01	5.014	10	5.014	10	ja	ja	ja

Nockenwellentyp (Nr.)	Verbleibende Kombinationen nach integraler Optimierung	Verbleibende Kombinationen nach modularer Optimierung	Kombination enthalten? Verbleibende Kombinationen nach integraler Optimierung		Kombination enthalten? Verbleibende Kombinationen nach modularer Optimierung		Kombination enthalten? Verbleibende Kombinationen nach modularer Optimierung	
			ja	nein	ja	nein	ja	nein
1(1)	24	6	ja	nein	ja	nein	ja	nein
1(2)	4	2	nein	nein	nein	nein	nein	nein
1(3)	4	2	ja	ja	nein	nein	ja	ja
2(4)	13	4	ja	nein	nein	nein	nein	nein
2(5)	13	4	ja	nein	nein	nein	nein	nein
3(6)	7	1	ja	nein	nein	nein	nein	nein
4(7)	13	4	ja	nein	nein	nein	ja	ja
4(8)	16	3	ja	ja	ja	nein	nein	nein
5(9)	10	1	ja	nein	nein	nein	nein	nein

Tabelle 6-13: Ergebnisse der Verifikation des Regelwerks zur Ermittlung der Elementtypen-kombinationen auf Grundlage von neun Basisnockenwellen

Durch die Anwendung der Optimierregeln kann gemäß Tabelle 6-13 der Fall eintreten, dass die Elementtypenkombinationen der Nockenwellen in der verbleibenden Menge an gültigen Kombinationen nicht mehr enthalten sind. Die Elementtypenkombinationen von vier der neun Nockenwellen befanden dabei sich unter den integralen bzw. modularen Optima. Die anderen fünf Nockenwellen lagen im Zwischenbereich.

Die nach der Optimierung gemäß Tabelle 6-13 zur Verfügung stehenden Elementtypenkombinationen bilden die Basis, um gebaute Nockenwellen auf Grundlage bestehender Bauteile aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten aufzubauen. Hierzu sind **Assemblierungsregeln** nötig, um die Elementtypen durch CAD-Modelle zu ersetzen und produktspezifische Varianten auf Systemebene zu erzeugen. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird unter **Assemblierung** der Zusammenbau (eng. Assembly) von Referenzprodukten zu Baugruppen im CAD-System verstanden. Assemblierungsregeln steuern dabei Anzahl und Kombination der Referenzprodukte.

6.3.3 Definition der produktspezifischen Assemblierungsregeln

Bislang wurden die Grundlagen geschaffen, um für funktions- und anwendungsbezogene Anforderungen einer konkreten Kundenanfrage aus einem bestehenden Baukasten gültige Kombinationen von Elementtypen zu generieren. Im dritten Teil der Produktanalyse wird durch ein weiteres Arbeitspaket untersucht, wie die Elementtypen der gültigen Elementtypenkombinationen mit den bestehenden Referenzprodukten zu verknüpfen sind, um produktspezifische Varianten assemblieren zu können.

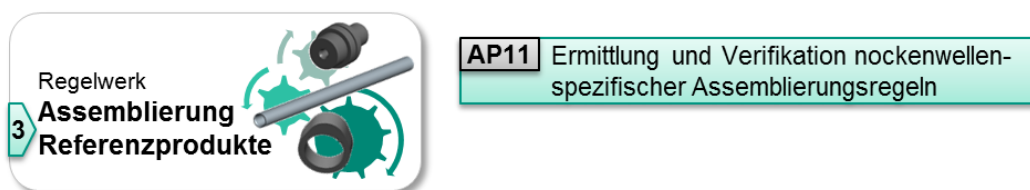


Abbildung 6-15: Arbeitspaket zum dritten Teilbereich der Produktanalyse⁶⁵³

Ermittlung nockenwellenspezifischer Assemblierungsregeln (AP11-1)

Zunächst müssen für jede gültige Kombination die Elementtypen durch die Dateninformationssätze der existierenden CAD-Modelle des aktuellen Baukastens ersetzt werden.⁶⁵⁴ Die Dateninformationssätze enthalten zum einen Informationen zum Zustand und zur Beschaffenheit des Bauteils (Härtezustand, Material, Oberflächenbeschaffenheit, etc.) sowie zum ursprünglichen Entwicklungsprojekt (Teilenummer⁶⁵⁵,

⁶⁵³ vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

⁶⁵⁴ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196

⁶⁵⁵ Teilenummern entsprechen hier den Dokumentenummern der Dateninformationssätze.

Elementtyp, Kundeninformationen, etc.). Diese Daten werden erst zu einem späteren Zeitpunkt für die Variantenauswahl relevant. An dieser Stelle werden für den produktspezifischen Aufbau von Nockenwellenvarianten zunächst nur die Teilenummern und die Elementtypen erforderlich. Die Teilenummern der CAD-Modelle entsprechen dabei den Dokumentennummern der korrespondierenden Dateninformationssätze. Über die in den Dateninformationssätzen den Baukastenelementen zugewiesenen Elementtypen, werden die Verknüpfungen zu den entsprechenden CAD-Modellen realisiert. Die Basis für den Aufbau der CAD-Nockenwellenbaugruppen bilden demnach die variantenspezifischen Teilenummern, die direkt auf die CAD-Modelle verweisen. Entscheidend ist hierbei zunächst die korrekte Zusammenstellung der Daten, d.h., dass insbesondere die mehrfach verwendete Komponenten⁶⁵⁶, Ventilknocken und Radiallagerelemente, in der erforderlichen Anzahl berücksichtigt werden und zwar noch unabhängig von der späteren, tatsächlichen räumlichen Anordnung auf der Nockenwelle. Hierzu werden die Parameter gemäß Tabelle 6-14 erforderlich.

Parameterbeschreibung	Variablenbenennung ⁶⁵⁷
Anzahl der Zylinder	CYLINDER_COUNT
Anzahl der Ventile je Zylinder	VALVES/CYLINDER_COUNT
Anzahl der radialen Lagerstellen	RB_Count
Ventilsteuerung ⁶⁵⁸	CAM_Config

Tabelle 6-14: Erforderliche Parameter für die Zusammenstellung der Teilenummern

Die Anzahl der Ventile je Zylinder in Verbindung mit der Art der Ventilsteuerung bestimmen z.B. die Anzahl der erforderlichen Ventilknocken.⁶⁵⁹ Analog regelt die Anzahl der geforderten radialen Lagerstellen die Anzahl der Radiallagerelemente. Zusätzlich müssen die bereits vorhandenen Informationen hinsichtlich des Nockenwellentyps sowie der Art der Ventilbetätigung (Gleit- oder Rollenabgriff) berücksichtigt werden. Nachfolgend wird geklärt warum Assemblierungsregeln für Ventilknocken und Radiallagerelemente benötigt werden und wie diese hergeleitet und formuliert wurden.

⁶⁵⁶ Für den Softwareprototyp wurde eine Mehrfachverwendung der Bauteile „Ventilknocken“ und „Radiallagerelemente“ berücksichtigt. In wenigen Fällen können beispielsweise auch Antriebselemente 2 (Zahn-, Ketten- und Riemenräder) oder Signalgeber-elemente (bei CIC-Anwendungen) auf einer Nockenwelle verbaut sein. Diese Fälle wurden für den Softwareprototyp nicht berücksichtigt.

⁶⁵⁷ Eingesetzte Variablenbenennung im Rahmen des Softwareprototyps.

⁶⁵⁸ vgl. MAHLE 2013 S. 7 und 120: Es werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit

Motorventilsteuerungen betrachtet, bei denen eine (Single Overhead Camshaft, SOHC) oder zwei obenliegende (Double Overhead Camshaft, DOHC) Nockenwellen im Zylinderkopf angeordnet sind.

⁶⁵⁹ Im NFZ-Bereich werden häufig Ventilbrücken eingesetzt, um mit einem Ventilknocken zwei Ventile gleichzeitig betätigen zu können. Da die Variantenauswahl in dieser Arbeit am Beispiel von PKW-Anwendungen untersucht wurde, sind Ausführungen mit Ventilbrücken nicht berücksichtigt.

Assemblierungsregeln für Ventilknocken

Dadurch, dass Ventilknocken auf einer Nockenwelle mehrfach verbaut werden und zudem durch die geforderten anwendungs- und funktionsbezogenen Anforderungen entsprechend Abbildung 6-16 unterschiedliche Ventilknockentypen⁶⁶⁰ auf einer Nockenwelle sein können, unterliegt die Zusammenstellung der Teilenummern und damit der späteren CAD-Modelle entsprechenden Assemblierungsregeln⁶⁶¹.

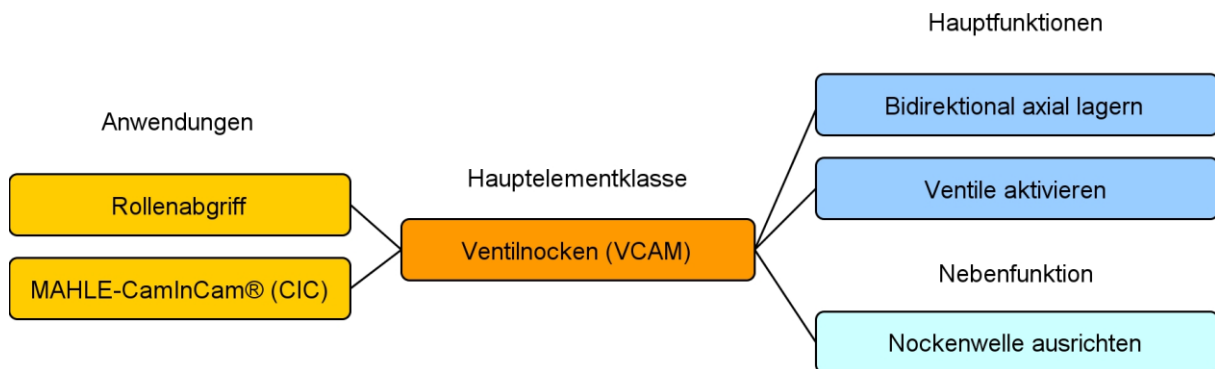


Abbildung 6-16: Anwendungen und Funktionen der Hauptelementklasse „Ventilknocken“⁶⁶²

Die Datenanalyse der Basisdaten ergab zwölf erforderliche Ventilknockentypen.⁶⁶³ Diese Elementtypen für die Ventilknocken sind als kombinierte Elementtypen zu verstehen. Wird beispielsweise eine Standardnockenwelle⁶⁶⁴ mit der Funktion „Nockenwelle ausrichten“ angefragt, so werden sieben Standardnocken und ein Ventilknocken mit integriertem Sechskant benötigt, um die Nockenwelle für einen 4-Zylinder-DOHC-Motor korrekt aufzubauen. Dieses Ventilknockensetting entspricht gemäß der nachfolgenden Tabelle 6-15 bei einem Rollenabgriff am Nocken dem kombinierten Nockentyp VCAM_07, und im Falle eines Gleitabgriffes dem Ventilknockentyp VCAM_01a.

In der Tabelle 6-15 sind den kombinierten Ventilknockentypen in der zweiten Spalte von rechts die korrespondierenden Stückzahlen der Einzelelementtypen am Beispiel eines 4-Zylinder-DOHC-Motors mit 4 Ventilen je Zylinder zugeordnet. Bei einem Gleitabgriff, der durch den Flachstößel neben den Nockendarstellungen symbolisiert wird, wird der kombinierte Typ VCAM_01a bei der Assemblierung der Nockenwelle in die Typen VCAM_01 (7x) und VCAM_01a (1x) aufgespalten.⁶⁶⁵ Hiernach werden die Einzelelementtypen in der benötigten Stückzahl durch entsprechende CAD-Modelle aus dem Baukasten ersetzt.

⁶⁶⁰ vgl. Tabelle 6-3 auf S. 189

⁶⁶¹ Der Begriff „Assemblierungsregeln“ wird im Kontext dieser Arbeit auf S. 206 eingeführt.

⁶⁶² Auszug aus Abbildung 6-11 auf S. 195

⁶⁶³ vgl. Abbildung 6-13 auf S. 198

⁶⁶⁴ vgl. Typ-5-Nockenwelle entsprechend Tabelle 6-1 auf S. 188

⁶⁶⁵ vgl. hierzu hervorgehobenes Beispiel in Tabelle 6-15 auf S. 209

Kombinierter Ventilnockentyp	Anw.					Funktionen		Einzelventilnockentypen			DOHC 4-Zyl. 4V E						
	Rollenabgriff	MAHLE-CamInCam®	Nockenwelle ausrichten	Bi-direktional axial lagern	Ventile aktivieren	VCAM_01 oder VCAM_04 Standardventilnocken	VCAM_01a oder VCAM_07 Nocken zur Wellenausrichtung	VCAM_05 oder VCAM_09 Bewegliche CIC-Ventilnocken	VCAM_11 oder VCAM_15 Ventilnocken mit Axiallagerbund	VCAM_11 oder VCAM_07	VCAM_15	VCAM_11	VCAM_05	VCAM_09	VCAM_05a	VCAM_09a	
VCAM_01	○	○	○	○	●												01 (8x)
VCAM_04	●	○	○	○	●												04 (8x)
VCAM_01a	○	○	●	○	●												01 (7x) 01a (1x)
VCAM_07	●	○	●	○	●												04 (7x) 07 (1x)
VCAM_15	○	○	○	●	●												01 (6x) 15 (2x)
VCAM_11	●	○	○	●	●												04 (6x) 11 (2x)
VCAM_16	○	○	●	●	●												01 (5x) 01a (1x) 15 (2x)
VCAM_11a	●	○	●	●	●												04 (5x) 07 (1x) 11 (2x)
VCAM_05	○	●	○	○	●												01 (4x) 05 (4x)
VCAM_09	●	●	○	○	●												04 (4x) 09 (4x)
VCAM_05a	○	●	●	○	●												01 (3x) 01a (1x) 05 (4x)
VCAM_09a	●	●	●	○	●												04 (3x) 07 (1x) 09 (4x)

Tabelle 6-15: Kombinierte Ventilnockentypen mit zugeordneten Einzelventilnockentypen und erforderlichen Ventilnockenstückzahlen je Typ am Beispiel einer einlassseitigen Nockenwelle eines 4-Zylinder-DOHC-Motors

Bei der Forderung nach einer Nockenwelle mit Ausrichtfunktion müssen demnach produktspezifische Regeln hinterlegt sein, die, abhängig von der Ventilsteuerung, der Zylinderanzahl, der Anzahl der Ventile je Zylinder sowie der geforderten anwen-

dungs- und funktionsbezogenen Produkteigenschaften, die kombinierten Ventilnockentypen der Elementtypenkombination in die korrespondierenden Einzelnockentypen unterteilen und die erforderlichen Stückzahlen für den Aufbau der Nockenwellenmodelle im CAD-System ermitteln.

Für einen 4-Zylinder-SOHC-Motor mit zwei Ventilen je Zylinder resultieren die identischen Stückzahlen je Ventilnockentyp wie bei einem 4-Zylinder-DOHC-Motor mit vier Ventilen je Zylinder. Hierbei wird zu Grunde gelegt, dass nicht in Einlass- und Auslassventilnocken unterschieden wird. Im Rahmen von Experteninterviews zu dieser Thematik wurde festgehalten, dass eine Unterscheidung in Einlass- und Auslassventilnocken keine Vorteile für die Variantenauswahl bringt und dies die Komplexität der Kombinationslogik unnötig in die Höhe treiben würde. Demnach wurde im weiteren Verlauf von einer Unterscheidung in Einlass- und Auslassventilnocken abgesehen.

Assemblierungsregeln für Radiallagerelemente

Bei der radialen Lagerung kann grundsätzlich unterschieden werden in die radiale Lagerung mittels Radial- und Axiallagerelementen in Form von Gleitlagerringen oder Wälzlagern und in eine radiale Lagerung ohne Lagerelemente. Bei der Lagerung ohne Lagerelemente wird direkt auf dem Nockenwellenkörper und gegebenenfalls auf den An- und Abtriebs-elementen gelagert. Die Abbildung 6-17 zeigt hierzu die anwendungs- und funktionsbezogenen Produkteigenschaften der beiden Lager-elementklassen (oben) und die Aufschlüsselung, welche Elementklassen zur radialen Lagerung der Nockenwelle herangezogen werden können (unten).

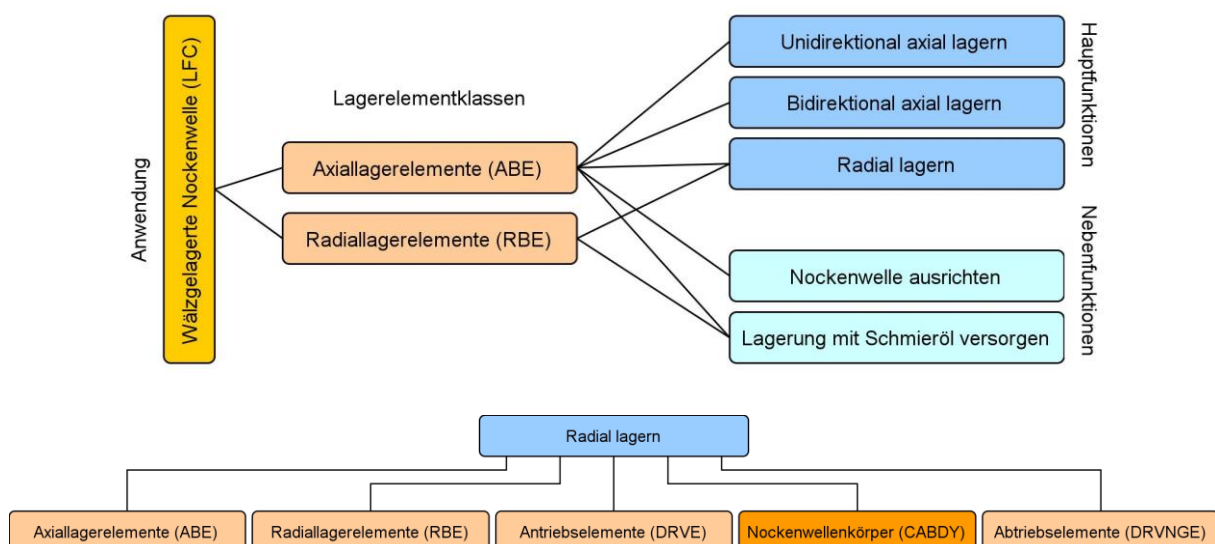


Abbildung 6-17: Anwendungen und Funktionen der Lagerelementklassen ABE und RBE (oben) und Übersicht der Elementklassen die „radial lagern“ (unten)⁶⁶⁶

⁶⁶⁶ Auszug aus Abbildung 6-11 auf S. 195

Neben den im einleitenden Abschnitt erläuterten Reinformen der radialen Lagerung, d.h., mit oder ohne Lagerelemente, sind auch Mischformen zulässig. Dies ist beispielsweise bei LFC-Nockenwellen der Fall.⁶⁶⁷ Per Definition ist es für diesen Nockenwellentyp ausreichen, dass ein Wälzlager integriert ist. Die restlichen Lagerstellen werden dann typischerweise nicht durch Gleitlagerelemente sondern durch direkte Lagerungen auf dem Nockenwellenkörper dargestellt (vgl. Abbildung 6-17). Die Tabelle 6-16 zeigt eine Auswahl der gängigen Lagerkonfigurationen mit Lagerelementen für einen 4-Zylinder-Motor mit fünf Radiallagerstellen.

	Lager 1	Lager 1	Lager 2	Lager 3	Lager 4	Lager 5	Lager 5
	DRVE	CABDY	CABDY	CABDY	CABDY	CABDY	DRVNGE

LFC-Nockenwellen mit Wälzlagererelementen (Typ 4)							
1		NALA	NALA	NALA	NALA	NALA	
2	NALA		NALA	NALA	NALA	NALA	
3	NALA		Radiallager	Radiallager	Radiallager	Radiallager	
4	RIKULA		Radiallager	Radiallager	Radiallager	Radiallager	
5		RIKULA	Radiallager	Radiallager	Radiallager	Radiallager	
6	RIKULA		NALA	NALA	NALA	NALA	

Standardnockenwellen mit Gleitlagerelementen (Typ 5)							
7		ABE	Radiallager	Radiallager	Radiallager	Radiallager	
8		ABE	Radiallager	Radiallager	Radiallager		Radiallager
9		ABE	RBE	RBE	RBE	RBE	
10		ABE	RBE	RBE	RBE		Radiallager
11	Axiallager		RBE	RBE	RBE	RBE	
12		RBE	RBE	RBE	RBE		Radiallager

RIKULA (ABE) = Rillenkugellager (Axiallagerelement) NALA (RBE) = Nadellager (Radiallagerelement)

Tabelle 6-16: Konfigurationen von Axial- und Radiallagerelementen für einen 4-Zylinder-Motor mit fünf radialen Lagerstellen resultierend aus der Analyse der 42 Basisnockenwellen

Die LFC-Nockenwellen (1), (2) und (6) sowie die Standardnockenwelle (9) sind rein lagerelementgelagerte Nockenwellen. Alle anderen sind Mischformen, bei denen die direkte Lagerung auf Elementen, die keine Lagerelemente sind, mit „Radiallager“ in Tabelle 6-16 beschrieben sind. Bei der LFC-Nockenwelle (5) wird für die axiale und radiale Lagerung ein Rillenkugellager (RIKULA) verwendet und die restlichen vier radialen Lagerstellen werden auf dem Nockenwellenkörper realisiert. Hingegen wird bei der Nockenwelle (11) das „Lager 1“ durch das Antriebselement dargestellt und für die verbleibenden Lagerstellen beispielsweise Gleitlagerringe verwendet. Außer bei wälzgelagerten Nockenwellen (Typ 4), die immer mit mindestens einem Lagerelement in Form von Rillenkugellagern (RIKULA) oder Nadellagern (NALA) bestückt

⁶⁶⁷ vgl. Typ-4-Nockenwelle entsprechend Tabelle 6-1 auf S. 188

sind, können alle anderen Nockenwellentypen auch ohne Lagerelemente aufgebaut sein.⁶⁶⁸ Diese Typen sind hier in Tabelle 6-16 zwar nicht aufgeführt, sind aber in den Assemblierungsregeln⁶⁶⁹ berücksichtigt.

Verifikation nockenwellenspezifischer Assemblierungsregeln (AP11-2)

Für die Verifikation der Assemblierungsregeln werden wiederum die neun Basiswellen herangezogen, die bereits zur Verifikation des Regelwerks zur Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen eingesetzt wurden. Das Ergebnis hieraus bildet zugleich den Ausgangspunkt für die Verifikation der Assemblierungsregeln.⁶⁷⁰ Um die Assemblierungsregeln verifizieren zu können, musste zunächst die bestehende Testdatenbank, die bereits zur Überprüfung des Regelwerkes zur Ermittlung der Elementtypenkombinationen verwendet wurde, entsprechend erweitert werden. Bislang umfassen die Beschreibungen der Elemente der Datenbank nur die Typenbeschreibung auf Grundlage der anwendungs- und funktionsbezogenen Produkteigenschaften.⁶⁷¹ Die Objektbeschreibung muss nun, entsprechend der für die Assemblierung erforderlichen Informationen, um einen weiteren Baustein, dem Dateninformationssatz, erweitert werden. Aus diesem Grund wurden für alle Bauteile der 42 Basisnockenwellen die relevanten Daten ermittelt und die bauteilspezifischen Dateninformationssätze in die bestehende Datenbank implementiert. Anschließend wurden die Verknüpfungen zwischen Elementtypenbeschreibungen und Dateninformationssätzen gesetzt und die aus Tabelle 6-15 und Tabelle 6-16 resultierenden Assemblierungsregeln in die entsprechende Datenbanklogik übersetzt. Bei der Formulierung der Regeln mussten zusätzlich die erforderlichen Parameter für die Zusammenstellung der Teilenummern berücksichtigt und als variable Eingabedaten deklariert werden.⁶⁷²

Die Eingangsdaten für die Assemblierung bilden, wie bereits erwähnt, die verbleibenden Elementtypenkombinationen. Deshalb wurde zunächst für jede der neun Nockenwellen die gültigen Elementtypenkombinationen wieder hergestellt, die sich infolge der nockenwellenspezifischen anwendungs- und funktionsbezogenen Anforderungen und der anschließenden Optimierung ergeben. Hierbei ist zu beachten, dass die nachzuweisenden Elementtypenkombinationen durch die Optimierungsregeln bereits ausgeschlossen werden können und damit der Nachweis für die Assemblierungsregeln nicht mehr erbracht werden kann.

Durch die Anwendung der Assemblierungsregeln auf Grundlage der nockenwellenspezifischen Elementtypenkombinationen wurden zunächst Kombinationen von Tei-

⁶⁶⁸ vgl. Tabelle 6-1 auf S. 188

⁶⁶⁹ Der Begriff „Assemblierungsregeln“ wird im Kontext dieser Arbeit auf S. 206 eingeführt.

⁶⁷⁰ vgl. Tabelle 6-13 auf S. 205

⁶⁷¹ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196

⁶⁷² vgl. Tabelle 6-14 auf S. 207

lenummern generiert, die als variantenspezifische Stücklisten verstanden werden können und demnach die erforderlichen Teilenummern zum Aufbau der Nockenwellen als abgeleitete Varianten des Baukastens zusammenstellen. Für jede der neun Nockenwellen waren die spezifischen Teilenummernkombinationen in der generierten Liste der gültigen Kombinationen enthalten. Auch die übrigen, regelbasiert ermittelten Teilenummernkombinationen wurden auf Plausibilität geprüft und Inkonsistenzen im Regelwerk schrittweise behoben.

Bislang wurde die Beschreibung der Elemente des Baukastens durch den Elementtyp und den Dateninformationssatz untersucht. Diese beiden Bausteine der Objektbeschreibung sind erforderlich, um gültige Elementtypenkombinationen und, darauf aufbauend, Teilenummernkombinationen (Stücklisten) der vorhandenen Baukastenelemente zu erzeugen. Die Abbildung 6-18 fasst den derzeitigen Informationsinhalt der Baukastenelemente zusammen.

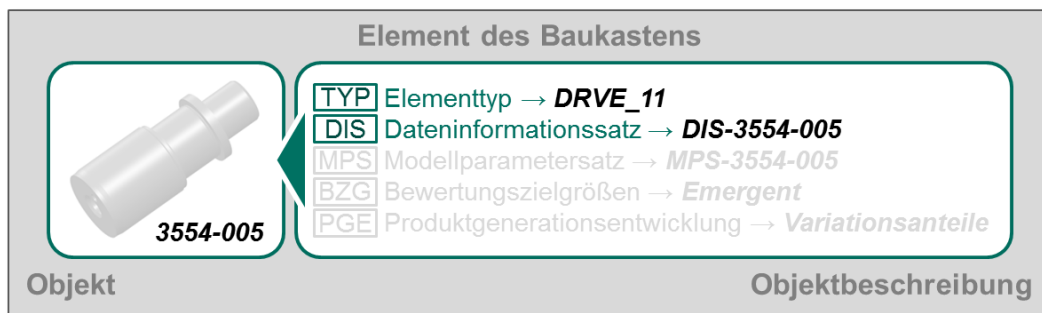


Abbildung 6-18: Aktueller Informationsinhalt der Baukastenelemente

Für den Aufbau der CAD-Modelle (Objektseite der Baukastenelemente), die zur Bestimmung geometrieegebundenen Bewertungszielgrößen benötigt werden, müssen Modellparametersätze auf Elementebene und ein korrespondierender Gesamtparametersatz auf Systemebene der Nockenwelle definiert werden. Mit diesem Parametersatz wird festgelegt, an welchen Stellgrößen und in welchem Umfang die Baukastenelemente modifiziert werden können. Hierzu werden im nächsten Unterkapitel zunächst die Beziehungen zwischen Parametern (Merkmale), Produkteigenschaften und Anforderungen beschrieben, da sich Anforderungen beispielsweise auf geometrieegebundene Bewertungszielgrößen (Bauteilmasse, Steifigkeit, Trägheit, etc.) beziehen, die sich infolge der Variation an zuvor festgelegten Parametern ergeben.

Demzufolge muss im nächsten Schritt geklärt werden, auf welcher Grundlage festgelegt werden kann, welche prozess- und funktionsbestimmenden Modellparameter aktiv und welche passiv sein sollen, und wie die Rückkopplung von aktiven auf passive Parameter realisiert werden kann.

6.3.4 Ermittlung der Anforderungsbeziehungen

In diesem Kapitel werden die Beziehungen zwischen Anforderungen, Merkmalen und Eigenschaften hinsichtlich der Ermittlung von Bewertungszielgröße zur Variantenbewertung beschrieben. Die Abbildung 6-19 führt hierzu das korrespondierende Arbeitspaket zum vierten Teilbereich der Produktanalyse auf.

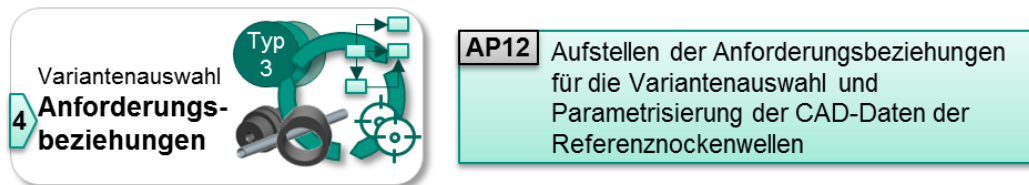


Abbildung 6-19: Arbeitspaket zum vierten Teilbereich der Produktanalyse⁶⁷³

Aufstellen der Anforderungsbeziehungen für die Variantenauswahl (AP12)

Anforderungen können sich auf Produkteigenschaften und Produktparameter (Produktmerkmale)⁶⁷⁴ beziehen. Dieser Arbeit liegt bei der Unterscheidung zwischen Eigenschaften und Merkmalen das Verständnis zugrunde, dass sich Merkmale, wie beispielsweise Modellparameter (Längen, Breiten, Durchmesser, etc.), direkt vom Konstrukteur beeinflussen lassen, wohingegen Eigenschaften (Bauteilmasse, Kosten, Funktionen, Teileverwendungen, Bauraum, Steifigkeiten, etc.) passiv emergieren und nicht aktiv variiert werden können.⁶⁷⁵ Anforderungen können sich damit entsprechend Abbildung 6-20 grundsätzlich auf feste Merkmale und Eigenschaften sowie emergente (passive) Eigenschaften beziehen.

Feste Eigenschaften sind dadurch gekennzeichnet, dass diese zu Beginn der Variantenauswahl in den Elementtypenbeschreibungen und den Dateninformationssätzen der Baukastenelemente bereits (fest) vorliegen und keinen Änderungen unterliegen können. Die Anforderungserfüllung wird hierbei mittels Mindest- und Maximalforderungen sowie Festforderungen abgeprüft. Wird eine spezifische Funktion gefordert, so muss diese funktionale Produkteigenschaft im Rahmen einer gültigen Elementtypenkombination in den betreffenden Elementtypenbeschreibungen der verwendeten Baukastenelemente enthalten sein. Bei den Produkteigenschaften in den Dateninformationssätzen der Baukastenelemente wird ferner in Eigenschaften unterschieden, die sich direkt auf Anforderungen beziehen (vgl. Abbildung 6-20 unten links),

⁶⁷³ vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

⁶⁷⁴ Die Begriffe Merkmale und Parameter werden in dieser Arbeit synonym verwendet. Vgl. hierzu Ausführungen zu Eigenschaften, Merkmalen und Parametern in Kapitel 2.3.1.

⁶⁷⁵ vgl. Weber 2012 S. 7 ff. und Eigenschaften und Merkmale in Kapitel 2.3.1 auf S. 93 ff.

und solche, die indirekte Auswirkungen auf die Bewertungszielgrößen auf Gesamtsystemebene haben (vgl. Abbildung 6-20 unten rechts).

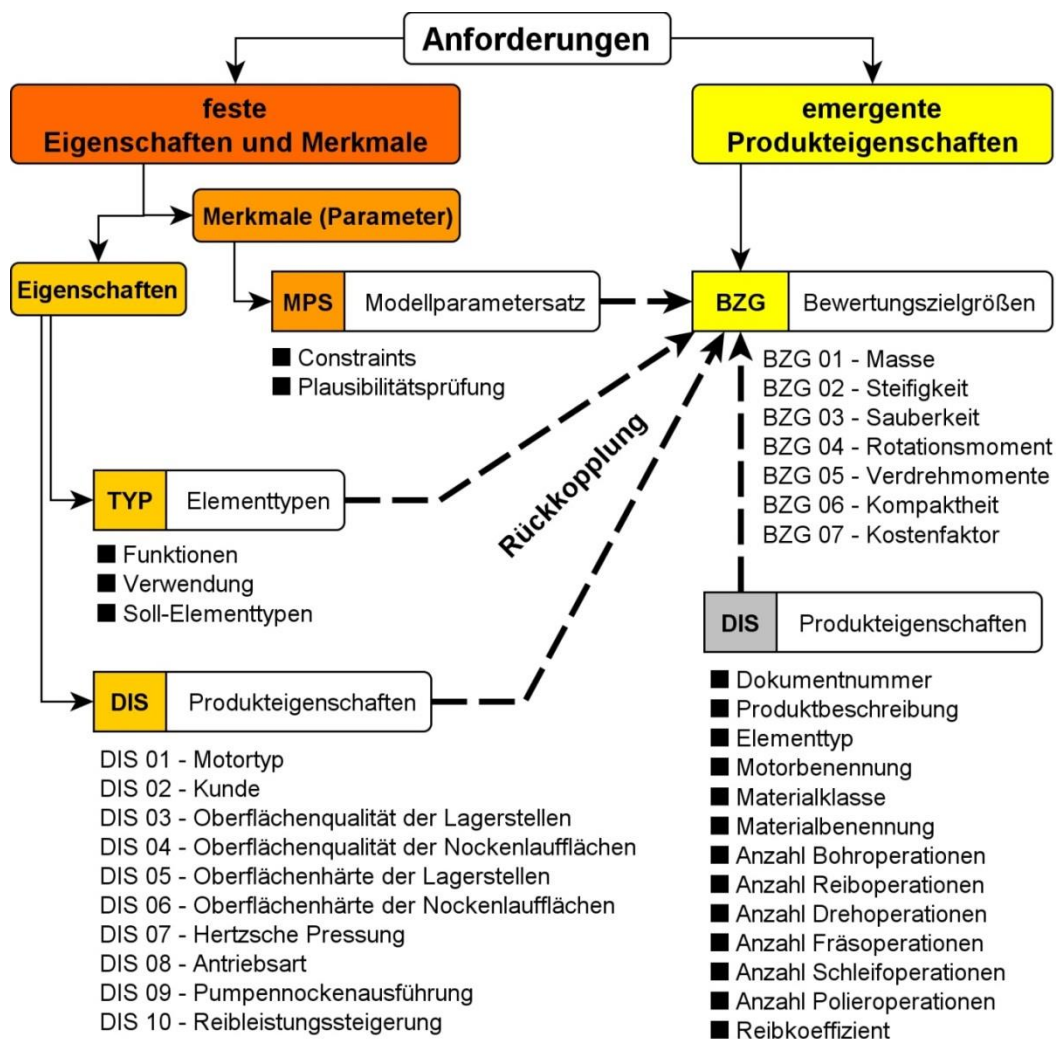


Abbildung 6-20: Anforderungsbeziehungen und Rückkopplung von festen Eigenschaften und Merkmalen auf emergente Produkteigenschaften

Anforderungen, die sich direkt auf Produkteigenschaften des Dateninformationssatzes beziehen sind beispielsweise Forderungen nach einer ertragbaren Pressung an der Nockenlauffläche von mindestens 1.800MPa oder nach gehärteten Lagerstellen mit einer Oberflächenhärte größer 50HRC. Daneben hat das Material indirekt Auswirkungen auf die Masse und die Materialkosten, die erst auf Grundlage der angepassten Geometrie durch die Modellparameter ermittelt werden können.

Feste Modellparameter (Merkmale) sind in diesem Zusammenhang dadurch gekennzeichnet, dass diese durch die gegebenen, geometrischen Randbedingungen im Zylinderkopf (Lagerabstände, Zylinderabstand, Ventilpositionen, etc.) fest vorgegeben sind. Zur Festlegung der relevanten Modellparameter, die zur geometrischen Definition einer Nockenwelle erforderlich sind, wurden die 42 Nockenwellen des Basisdatensatzes herangezogen. Aus der Diskussion der Untersuchungsergebnisse mit No-

ckenwellenkonstrukteuren resultierten 44 Parameter, die zur geometrischen Beschreibung der betrachteten Nockenwellentypen⁶⁷⁶ notwendig sind und aktiv variiert werden können.⁶⁷⁷ Bei der Festlegung des Modellparametersatzes auf Systemebene der Nockenwelle wurde dabei bewusst davon abgesehen, zu tief in die Detailkonstruktion einzugreifen. So wurden die als nicht unmittelbar funktionsrelevant eingestuft Modellparameter (z.B. zur Variation von Fasen, Rundungen, Nuten, Bohrungen, Gewinde etc.), zu passiven Parametern deklariert, d.h., dass sich deren Werte durch eine Variation der aktiven Parameter und den definierten Konstruktionsbedingungen (Constraints) ergeben. Daneben wurden auch die Produkteigenschaften in den Dateninformationssätzen der Baukastenelemente in aktive Produkteigenschaften (direkter Bezug auf Anforderungen) und passive Produkteigenschaften (indirekter Bezug auf Anforderungen) unterteilt.

Bei den Anforderungen selbst kann ebenfalls von Anforderungen gesprochen werden, die aktiv durch Eingabe von Fest-, Mindest-, Maximal- oder Intervallforderungen vorgegeben werden können. Zur Festlegung dieser aktiven Anforderungen wurden Kundenlastenhefte hinsichtlich der gängigen Anforderungen an gebaute Nockenwellensysteme verglichen.⁶⁷⁸ Daneben müssen Anforderungen berücksichtigt werden, deren Wertebereiche nicht aktiv vorgegeben werden sondern anwendungsspezifisch auf der vorhandenen Unternehmensexpertise basieren (Konstruktionsrichtlinien, Produktstandards, etc.). Demzufolge werden für eine fundierte Variantenauswahl neben den Kundenanforderungen auch immer die anbieterinternen Anforderungen relevant. Bei der Variantenauswahl werden für die Bewertung der aktiven Anforderungen die FIT-Bedingungen⁶⁷⁹ eingesetzt und für die Beurteilung der internen Anforderungen insbesondere die ermittelten Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung⁶⁸⁰ nach ALBERS.

Die Entscheidungen für die Einteilung in aktive und passive Größen können dabei unterschiedlich motiviert sein:

Kundenorientiert

Die Einteilung orientiert sich an den Hauptkunden und deren Anforderungen an die zu liefernden Produkte, beispielsweise infolge einer mehrjährigen Entwicklungspartnerschaft zwischen Kunde und Zulieferunternehmen oder häufig wiederkehrenden Entwicklungsprojekten mit den gleichen Kunden.

⁶⁷⁶ vgl. Tabelle 6-1 auf S. 188

⁶⁷⁷ siehe Kapitel 11.2.3 im Anhang: Geometrieparametrisierung der CAD-Daten

⁶⁷⁸ vgl. Abbildung 6-20 auf S. 215

⁶⁷⁹ Vgl. Kapitle 6.1 – Variantenentwicklung im erweiterten ZHO-Modell

⁶⁸⁰ Vgl. Kapitel 6.2 – Variantenentwicklung in der PGE

Unternehmensstrategisch

Hier stehen Faktoren wie das unternehmensspezifische Produktportfolio, die Marktposition, das zu beliefernde Marktsegment, das Markenzeichen und Alleistellungsmerkmal gegenüber Konkurrenzprodukten, die zur Verfügung stehenden Fertigungs- und Montageeinrichtungen und auch die Patentsituation im Vordergrund.

Produktspezifisch

Durch Anpassen des Produktes an die zur Verfügung stehenden Produktionssysteme können beispielsweise aktive Merkmale durch interne Vorgaben zu passiven Produkteigenschaften (z.B. Durchmesserverhältnisse und Wandstärken, Lage und Ausführung von Bezugselemente (Bohrungen, Nuten, etc.), Fasen und Rundungen) deklariert werden. Dies kann auch dadurch motiviert sein, den ursprünglichen Charakter inklusive der Konstruktionsabsicht einer Lösung beim Einsatz unter neuen Randbedingungen zu bewahren.⁶⁸¹

Für die meisten Kundenentwicklungsprojekte wird aus Sicht des Zulieferunternehmens die Festlegung von aktiven und passiven Größen immer aus einer Kombination der oben genannten Motivationshintergründe resultieren, und zwar schon aus dem Grund, dass für die Variantenauswahl, neben den Kundenanforderungen, auch immer die Anbieteranforderungen mit berücksichtigt werden müssen.

Auf Grundlage der vorhergehenden Diskussion zur Unterscheidung in aktive und passive Größen, werden die Soll-Werte für die kundenbasierten Anforderungen zwar aktiv durch den Konstrukteur vorgegeben, jedoch emergieren die tatsächlichen Ist-Werte der anforderungsbezogenen Bewertungszielgrößen passiv auf Basis fester Eigenschaften und Merkmale. Die Rückkopplungspfeile sind im Kontext des zu Grunde gelegten Forschungsansatzes zu verstehen.⁶⁸² Feste Eigenschaften und Merkmale, die bereits zu Beginn der Variantenauswahl vorliegen, führen zur Anpassung der vorhandenen Elemente im Baukasten mit anschließender, regelbasierter Neukombination entsprechend der neuen Kundenanfrage. Da die Bewertungszielgrößen zunächst implizit in der angepassten Geometrie auf Gesamtsystemebene der gültigen Varianten vorliegen, müssen die tatsächlichen Werte der Bewertungszielgrößen zunächst in das Zielsystem expliziert werden, um diese als Bewertungsgrundlage für die Variantenauswahl einsetzen zu können.⁶⁸³

⁶⁸¹ vgl. auch Erläuterungen zu Constraints im Unterkapitel „Ziele und Anforderungen“ auf S. 85 ff.

⁶⁸² vgl. Abbildung 6-2 auf S. 174 und Abbildung 6-20 auf S. 215

⁶⁸³ Die Begründung, dass für die Rückkopplung der festen, aktiven Größen auf die sich emergent ergebenden, passiven Größen mindestens zwei Iterationen notwendig sind, bis sich Änderungen am Zielsystem auf Änderungen der zu Grunde gelegten, emergenten Bewertungszielgrößen auswirken, wird in Kapitel 6.4 beschrieben.

Hierzu werden die Beziehungen zwischen festen und emergenten Bewertungszielgrößen im folgenden Kapitel am Beispiel der gebauten Nockenwelle näher erläutert.

6.3.5 Bestimmung emergenter Bewertungszielgrößen

Zur Bestimmung emergenter Bewertungszielgrößen werden im fünften Teil der Produktanalyse, basierend auf dem in Abbildung 6-21 definierten Arbeitspaket, die Beziehungen zwischen den festen Merkmalen und Eigenschaften der Elementtypen, den aktiven und passiven Dateninformationssätzen sowie den aktiven Parametern des Modellparametersatzes und den emergenten Produkteigenschaften ermittelt.⁶⁸⁴

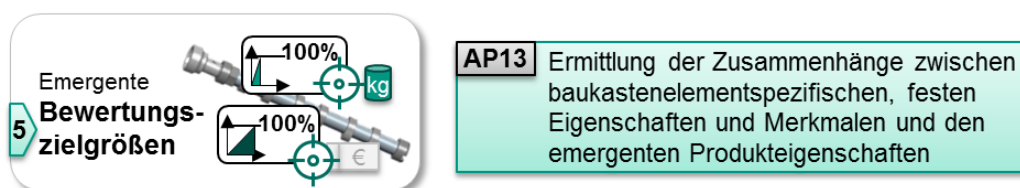


Abbildung 6-21: Arbeitspaket zum fünften Teilbereich der Produktanalyse⁶⁸⁵

Entsprechend der nachfolgenden Abbildung 6-22 wurden zunächst die Zusammenhänge zwischen den Elementklassen und den festen Eigenschaften und Merkmalen untersucht.⁶⁸⁶ Eine Änderung des Modellparametersatzes hat demnach Auswirkungen auf alle Elementklassen und damit alle Ausprägungen (Elementtypen) innerhalb der Klasse (vgl. Zeile 1 in Abbildung 6-22). Ebenso resultiert die Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen aus einer Betrachtung aller vorhandenen Elementtypen in den Elementklassen. Diejenigen Eigenschaften in den Dateninformationssätzen, die sich nicht direkt auf Anforderungen beziehen, sind ebenfalls an alle Typen geknüpft mit Ausnahme des Reibkoeffizienten (vgl. letzte Zeile in Abbildung 6-22), da dieser den auf den Nockenwellenkörper gefügten Bauteilen zugeordnet ist. Bei den Eigenschaften (DIS 01 bis DIS 10) in den Dateninformationssätzen, die sich direkt auf Anforderungen beziehen gibt es (mit Ausnahme von DIS 01 und DIS 02) elementklassenspezifische und damit elementtypenspezifische Einträge (● Eintrag enthalten und ○ nicht enthalten entsprechend Abbildung 6-22 links).

Nachdem die Zusammenhänge zwischen Elementklassen und festen Eigenschaften und Merkmalen geklärt wurden (vgl. links und Mitte in Abbildung 6-22), wurden die festen Größen mit den emergenten Produkteigenschaften verknüpft (vgl. Mitte und rechts in Abbildung 6-22). Diese werden auf Basis des erweiterten ZHO-Modells

⁶⁸⁴ vgl. Abbildung 6-20 auf S. 215

⁶⁸⁵ vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

⁶⁸⁶ vgl. Tabelle 6-3 auf S. 189

durch Rückkopplung von festen auf emergente Größen in das Zielsystem expliziert und stehen so als Bewertungszielgrößen für die Variantenauswahl zur Verfügung.⁶⁸⁷

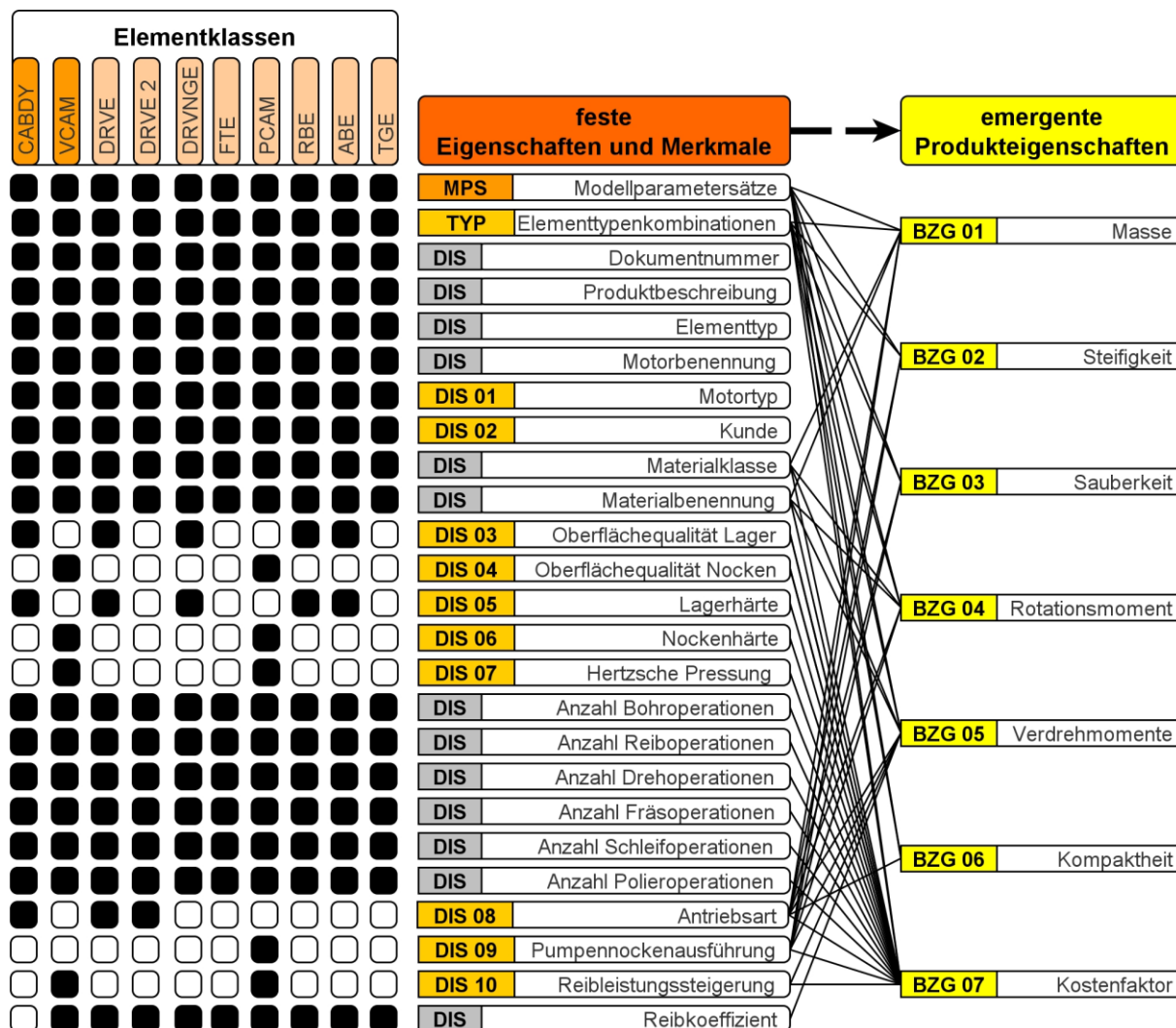


Abbildung 6-22: Zusammenhang zwischen baukastenelementspezifischen, festen Eigenschaften und Merkmalen und den emergenten Eigenschaften (Bewertungszielgrößen)

Alle Bewertungszielgrößen gemäß Abbildung 6-22 sind an die Geometrie und damit an die aktiven Parameter des Modellparametersatzes gebunden. Über den Modellparametersatz des Gesamtsystems sind damit alle emergenten Produkteigenschaften indirekt mit den Elementtypen der Elementklassen verknüpft. Demzufolge müssen wiederum die durch die Baukastenelementbeschreibungen an die Elementtypen geknüpften, vorhandenen CAD-Modelle des Baukastens an die zuvor festgelegte Parametrisierung der Geometrie angepasst werden.⁶⁸⁸ Hierzu wurden die CAD-Modelle der neun gebauten Nockenwellen, die zur Verifikation des Regelwerkes zur Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen verwendet wurden, entsprechend aktuali-

⁶⁸⁷ vgl. Kapitel 6.1 und Kapitel 6.4

⁶⁸⁸ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196 und Kapitel 11.2.3 im Anhang zu Kapitel 6

siert.⁶⁸⁹ Hierbei konnten die bestehenden Modelle teilweise in variiert Form übernommen werden. Andere mussten jedoch neu aufgebaut werden. Zur Steuerung der Geometrie der CAD-Modelle werden Skelettmodelle⁶⁹⁰ der Einzelteile eingesetzt, die in Abhängigkeit des zugeordneten Elementtyps auf eine Teilmenge an Parametern aus dem Gesamtmodellparametersatz der Nockenwelle zurückgreifen. Zur Kopplung der Einzelteilmodelle an den variantenspezifischen Gesamtmodellparametersatz auf Systemebene wurde ein übergeordnetes Multiskelettmodell und eine Basisnockenwellenbaugruppe aufgebaut, mit denen im Kontext der Variantenbeschreibung nach Anwendung der Assemblierungsregeln⁶⁹¹ die CAD-Modelle der Nockenwellenvarianten generiert werden können. In den erzeugten Varianten werden die für die Variantenauswahl relevanten, geometriegebundenen Bewertungszielgrößen berechnet.⁶⁹²

Anknüpfend an die Verifikation des Regelwerkes zur Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen und der Assemblierungsregeln wurde die parameterbasierte Anpassung und der Zusammenbau der Modelle verifiziert. Hierzu wurde zunächst geprüft, ob die Anwendung der spezifischen Modellparametersätze der neun Nockenwellen auf die Basisnockenwellenbaugruppe die passenden, d.h., die der jeweiligen Originalnockenwelle entsprechenden CAD-Modelle liefert. Nach Abschluss der Korrektur- und Überarbeitungsphase wurden die Parameter variiert und die Verifikation auf freie, d.h., losgelöst von den neun Basisnockenwellen, Modellparametersätze erweitert. Nach Beendigung der Plausibilitäts-Checks konnte die Verifikation der parameterbasierten Anpassung und des Zusammenbaus im CAD mit positivem Ergebnis abgeschlossen werden.

Durch die Ausführungen in diesem und dem vorhergehenden Kapitel wurde der bisherige Arbeitsstand zur Beschreibung der Baukastenelemente auf der Objektseite um das CAD-Modell und auf der Seite der Objektbeschreibung um den Modellparametersatz und die Bewertungszielgrößen erweitert.⁶⁹³ Damit ist gemäß der Abbildung 6-23 am Ende dieses Kapitels noch die Beschreibung der Baukastenelemente im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung offen. Die aktuell integrierten Baukastenelementbeschreibungen dienen im Rahmen der Variantenbewertung vorwiegend zur Bestimmung der FIT-Bedingungen⁶⁹⁴, mit denen der Grad der Erfüllung der Kundenanforderungen variantenabhängig beurteilt werden kann.

⁶⁸⁹ vgl. Tabelle 6-13 auf S. 205

⁶⁹⁰ Skelettmodelle enthalten Bezüge wie Achsen, Ebenen und Punkte sowie Referenzflächen.

⁶⁹¹ Der Begriff „Assemblierungsregeln“ wird im Kontext dieser Arbeit auf S. 206 eingeführt.

⁶⁹² Die parametergesteuerte Anpassung der Geometrie sowie der Zusammenbau im CAD lässt sich prinzipiell mit parametrischen CAD-Systemen darstellen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit PTC CREO 2 M140 gearbeitet.

⁶⁹³ vgl. Abbildung 6-18 auf S. 213

⁶⁹⁴ Vgl. Kapitle 6.1 Variantenentwicklung im erweiterten ZHO-Modell

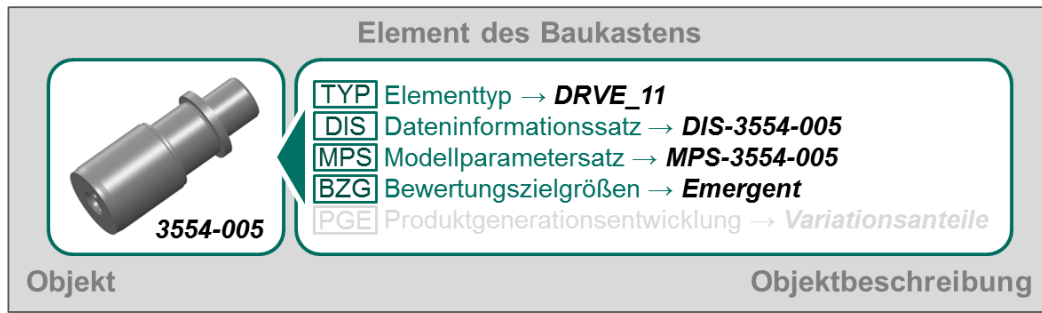
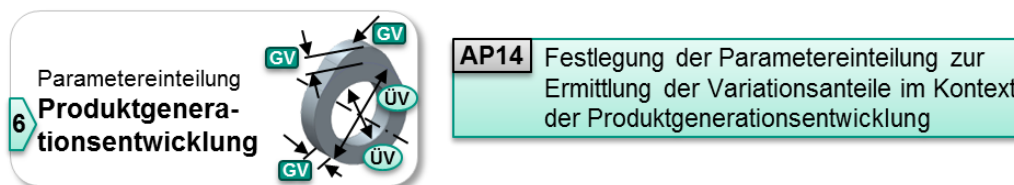


Abbildung 6-23: Aktueller Informationsinhalt der Beschreibung der Baukastenelemente

Die Einbeziehung der Beschreibung der Baukastenelemente im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung zielt auf die unternehmensinterne Beurteilung des Risikos, des Arbeitsaufwandes und des Potentials ab. Die maßgebende Basis bildet hierbei die Übersetzung der Unternehmensexpertise in eine Kategorisierung der Modellparameter, um die Variationsanteile im Sinne der PGE als Beurteilungsgrundlage für die Variantenauswahl ermitteln zu können.⁶⁹⁵

6.3.6 Parametrisierung im Kontext der PGE

Im vorherigen Kapitel wurde erläutert, dass sich der Modellparametersatz in Teilmengen auf alle Elementklassen und damit auch auf alle Elementtypen innerhalb der Klassen bezieht. Demzufolge wurden die relevanten Parameter des Gesamtmodellparametersatzes über die Elementtypen und die Dateninformationssätze mit den Baukastenelementen verknüpft und modelltechnisch durch Skelettmodelle in den korrespondierenden CAD-Modellen verankert. Hierzu wurde im letzten Teil der Produktanalyse das Arbeitspaket 14 gemäß Abbildung 6-24 bearbeitet. Auf Basis von Kapitel 6.2 zur Variantenentwicklung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung, wurden die Parameter mit Experten aus der Nockenwellenkonstruktion in Übernahmevariationsparameter ÜS($V \neq 0$) und Gestaltvariationsparameter an den Schnittstellen GS(Con) und im Inneren der Konstruktion GS(Int) eingeteilt.

Abbildung 6-24: Arbeitspaket zum sechsten Teilbereich der Produktanalyse⁶⁹⁶

⁶⁹⁵ Vgl. Kapitel 6.2 – Variantenentwicklung in der PGE

⁶⁹⁶ vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

Hiermit lassen sich die Übernahmevariationsanteile ($\delta_{\ddot{U}V(V \neq 0),n}$ und $\delta_{\ddot{U}V(V=0),n}$) und die Gestaltvariationsanteile ($\delta_{GV(Int),n}$ und $\delta_{GV(Con),n}$) auf Baukastenelementebene bestimmen und zur Entscheidungsunterstützung auf Systemebene zusammenführen.

Damit sind die Aktivitäten zur Beschreibung der Baukastenelemente als korrespondierende Paare aus Objekt und Objektbeschreibung, die zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage FF2.2 bearbeitet wurden, abgeschlossen.⁶⁹⁷ Hiermit lässt sich das Gesamtsystembild zur Variantenentwicklung basierend auf dem erweiterten ZHO-Modell und der PGE - Produktgenerationsentwicklung beschreiben.

6.4 Entscheidungsunterstützungssystem (VDSS)

Dieses Kapitel fügt die Ergebnisse aus der Produktanalyse zu gebauten Nockenwellen zu dem methodischen Gesamtverständnis zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl VDSS⁶⁹⁸ auf Basis des ZHO-Modells zusammen.⁶⁹⁹ Die detaillierte Beschreibung des Entscheidungsunterstützungssystems zur Variantenauswahl gliedert sich in die nachfolgenden drei Schritte.

1 - Ableiten gültiger Varianten auf Basis fester Eigenschaften und Merkmale

Die Wissensbasis als Subsystem des Handlungssystems bildet die Grundlage der Variantenauswahl. Wie in Abbildung 6-25 dargestellt ist in ihr zum einen das Wissen der objektseitig zur Verfügung stehenden Baukastenelemente (A) abgelegt. Dabei nimmt das Verständnis der Baukastenelemente als korrespondierende Paare bestehend aus Objekt und Objektbeschreibung bei der Variantenableitung und der Variantenbewertung, als Teilprozesse der Variantenauswahl, eine zentrale Rolle ein.⁷⁰⁰ Die Objektbeschreibung enthält Informationen darüber, was das Objekt kann und für welche Anwendung es, basierend auf der ursprünglichen Konstruktionsabsicht, im Rahmen eines vorhergehenden Projektes entwickelt wurde. Neben diesen für das Ableiten von Varianten relevanten Informationen, werden für die Variantenbewertung Zielgrößen erforderlich, die zu Beginn der Variantenauswahl noch nicht vorliegen, da sie sich erst nach Anpassung im Rahmen einer gültigen, abgeleiteten Variante ergeben. Das Wissen bezüglich der für die Variantenauswahl erforderlichen Zusammenhänge zwischen festen und emergenten Größen sowie das produktspezifische Know-how, das für die Definition interner Anforderungen und Randbedingungen und damit für die Ermittlung der Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsent-

⁶⁹⁷ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196

⁶⁹⁸ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012 (VDSS, engl. Variant Decision Support System)

⁶⁹⁹ vgl. Abbildung 6-1 auf S. 172

⁷⁰⁰ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196

wicklung zur Abschätzung des variantenspezifischen Aufwandes, Risikos und Potentials unabdingbar ist, sind ebenfalls essentielle Bestandteile der Wissensbasis (B).⁷⁰¹ Zusätzlich unterliegt die Wissensbasis einer stetigen Wissenserweiterung, beispielsweise durch die Einbindung neuer Baukastenelemente mit den gegebenenfalls hierfür erforderlichen neuen Fertigungs- und Montagetechnologien. Des Weiteren werden mit jedem Auswahlprozess neue, fallspezifische Erfahrungswerte gesammelt, die für neue Projekte zur Verfügung stehen. Erweitert wird die Wissensbasis grundsätzlich bei jeder neuen Kundenanfrage um das anfragespezifische kunden- und anbieterbasierte Anforderungsprofil (C), das die relevanten Informationen enthält, um auf Grundlage der Objektbeschreibungen der Baukastenelemente geeignete Varianten zu finden. Zur Einschränkung des Lösungsraumes sind dabei insbesondere Informationen notwendig, die die Elementtypenbeschreibungen sowie die Dateninformations- und Modellparametersätze der Baukastenelemente adressieren.

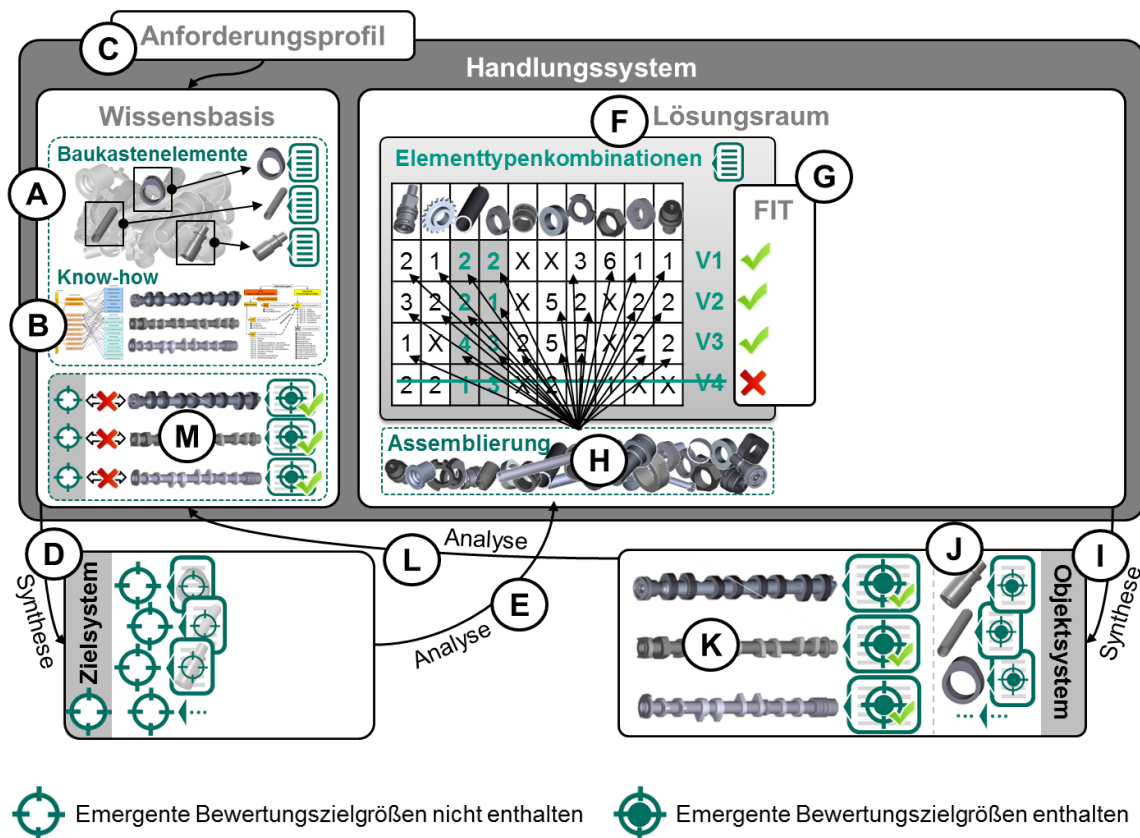


Abbildung 6-25: 1. Iteration – Ableiten gültiger Varianten

Bei den kundenseitig zur Verfügung gestellten Informationen kann dabei grundsätzlich zwischen produkt- und auftragsabwicklungsspezifischem Wissen unterschieden werden. Durch die Dokumentation von Erfahrungen aus der Zusammenarbeit mit Kunden kann dabei bei Folgeanfragen die Erstellung von kundengerechten Angebo-

⁷⁰¹ vgl. hierzu Ergebnisse aus Kapitel 6.3 – Produktanalyse zu gebauten Nockenwellen

ten beschleunigen. Im Mittelpunkt steht jedoch immer der Konstrukteur, dessen Expertenwissen bezüglich Produkt und Anwendung des Entscheidungsunterstützungssystems unabdingbar sind für eine fundierte Variantenauswahl.

Ausgehend von der aktuellen Wissensbasis wird ein erstes Zielsystem für die konkrete Anfrage synthetisiert (D), von dem die Elementzielsysteme für die Baukastenelemente abgeleitet werden. Da zu Beginn der Variantenauswahl zunächst nur feste Eigenschaften und Merkmale explizit in den Objektbeschreibungen der Baukastenelemente vorliegen, die sich auf Elementtypen, Dateninformations- und Modellparametersätze beziehen, werden die Objektbeschreibungen der Baukastenelemente zunächst durch Abgleich der funktions- und anwendungsbezogenen Eigenschaften mit den entsprechenden Elementzielsystemen auf deren Eignung hin analysiert (E). Unter Berücksichtigung gegebenenfalls explizit laut Anforderungsprofil einzubeziehender Elementtypen und den produktspezifischen Regeln werden die gültigen Elementtypenkombinationen im Lösungsraum bestimmt (F). Die aktuelle Anzahl an zulässigen Kombinationen wird hiernach durch die Anwendung von Optimierregeln⁷⁰² weiter reduziert. Als erstes Zwischenergebnis ergibt sich mittels der FIT-Bedingung (G) eine Vorauswahl an aktuell gültigen Elementtypenkombinationen. Diese Kombinationen wurden bis zu diesem Zeitpunkt losgelöst von einer konkreten Entsprechung in Form eines CAD-Modells betrachtet. Dies geschieht im nächsten Schritt, indem die Elementtypen durch typkompatible Baukastenelemente ersetzt und unter Anwendung der produktspezifischen Assemblierungsregeln⁷⁰³ die Stücklisten⁷⁰⁴ zu den Nockenwellenvarianten erstellt werden (H). Diese Stücklisten sind für die Synthese der CAD-Modelle im Objektsystem (I) erforderlich, wobei die Verknüpfungen zwischen den Teilenummern in den Stücklisten und den korrespondierenden CAD-Modellen durch die Dateninformationssätze (DIS) in den Objektbeschreibungen der Baukastenelemente gebildet werden. Zusammen mit den erzeugten Stücklisten wird zudem der Modellparametersatz zum Aufbau der CAD-Modelle benötigt. Dabei werden die CAD-Modelle der Baukastenelemente an die neuen, geometrischen Randbedingungen angepasst (J) und zu Nockenwellenbaugruppen assembliert (K). Dabei ergeben sich geometriegebundene Bewertungszielgrößen (Masse, Steifigkeit, etc.) auf Element- und Systemebene. Da diese erst beim Eintreten in die nächste Schleife in das Zielsystem expliziert werden können und damit für den weiteren Auswahlprozess zur Verfügung stehen, gibt es zum aktuellen Zeitpunkt ein Informationsdelta zwischen den Zielsystemen auf System- und Elementebene mit den korrespondie-

⁷⁰² vgl. Optimierung der gültigen Elementtypenkombinationen (AP09) auf S. 202 f. in Kapitel 6.3.2

⁷⁰³ Der Begriff „Assemblierungsregeln“ wird im Kontext dieser Arbeit auf S. 206 eingeführt.

⁷⁰⁴ Die Stücklisten enthalten die Dokument- bzw. Teilenummern der Baukastenelemente.

renden Objektbeschreibungen.⁷⁰⁵ Durch die Analyse des Objektsystems (L) wird die Wissensbasis hiernach um die fallspezifisch gültigen Varianten (M) unter Berücksichtigung des Informationsdeltas zwischen Ziel- und Objektsystem erweitert.

2 - Variantenbewertung durch Rückkopplung von festen auf emergente Größen

In der zweiten Iteration wird das Informationsdelta zwischen Ziel- und Objektsystem durch Rückkopplung von festen auf emergente Bewertungszielgrößen synchronisiert. Hierzu wird gemäß Abbildung 6-26 zunächst in Abstimmung mit dem Kunden und dem internen Entwicklungsteam das Anforderungsprofil (1) auf Aktualität geprüft.

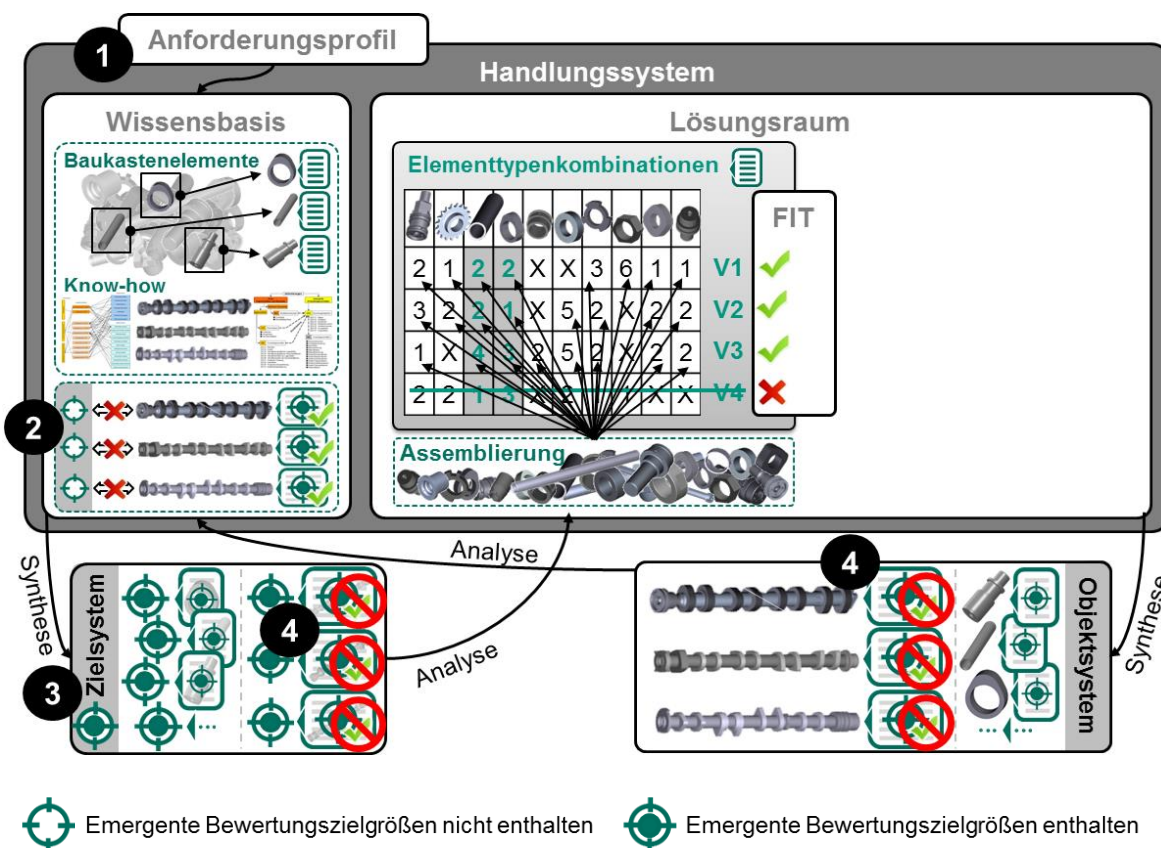


Abbildung 6-26: 2. Iteration – Variantenbewertung durch Rückkopplung von festen auf emergente Bewertungszielgrößen (Schritte 1 - 4)

Falls bereits zu diesem Zeitpunkt kundeseitige Änderungen vorliegen, muss die erste Iteration gemäß Abbildung 6-25 wiederholt werden. Bei unverändertem Anforderungsprofil werden auf Grundlage der fallspezifischen Erweiterung der Wissensbasis (2) die impliziten, geometriegebundenen Bewertungszielgrößen in das Zielsystem geschrieben (3). Die konkretisierten, expliziten Zielgrößen stehen zunächst für vergleichende Bewertungen zwischen Elementzielsystemen und Objektbeschreibungen

⁷⁰⁵ Dieser Informationsunterschied ist in den Abbildungen durch gefüllte und ungefüllte Punkte im Zielsystemsymbold der Objektbeschreibungen auf Element- und Systemebene gekennzeichnet.

zur Verfügung. Zusätzlich wurde durch die erste Iteration die nötige Datenbasis geschaffen, um auch die Zielsysteme auf Systemebene der Nockenwellenvarianten zu synthetisieren und direkt den konkretisierten Objektbeschreibungen gegenüberzustellen (4).⁷⁰⁶ Hierdurch wird die bisherige, elementtypenbasierte FIT-Bedingung ungültig und muss im nächsten Schritt aktualisiert werden (5). Für die Aktualisierung der FIT-Bedingung (6) werden entsprechend Abbildung 6-27 die Deckungsbeiträge zwischen Zielsystem und Objektbeschreibung auf Systemebene der Nockenwellenvarianten ermittelt, indem die variantenspezifischen Ist-Werte der Bewertungszielgrößen mit den Soll-Vorgaben in Form von Intervallforderungen verglichen werden.

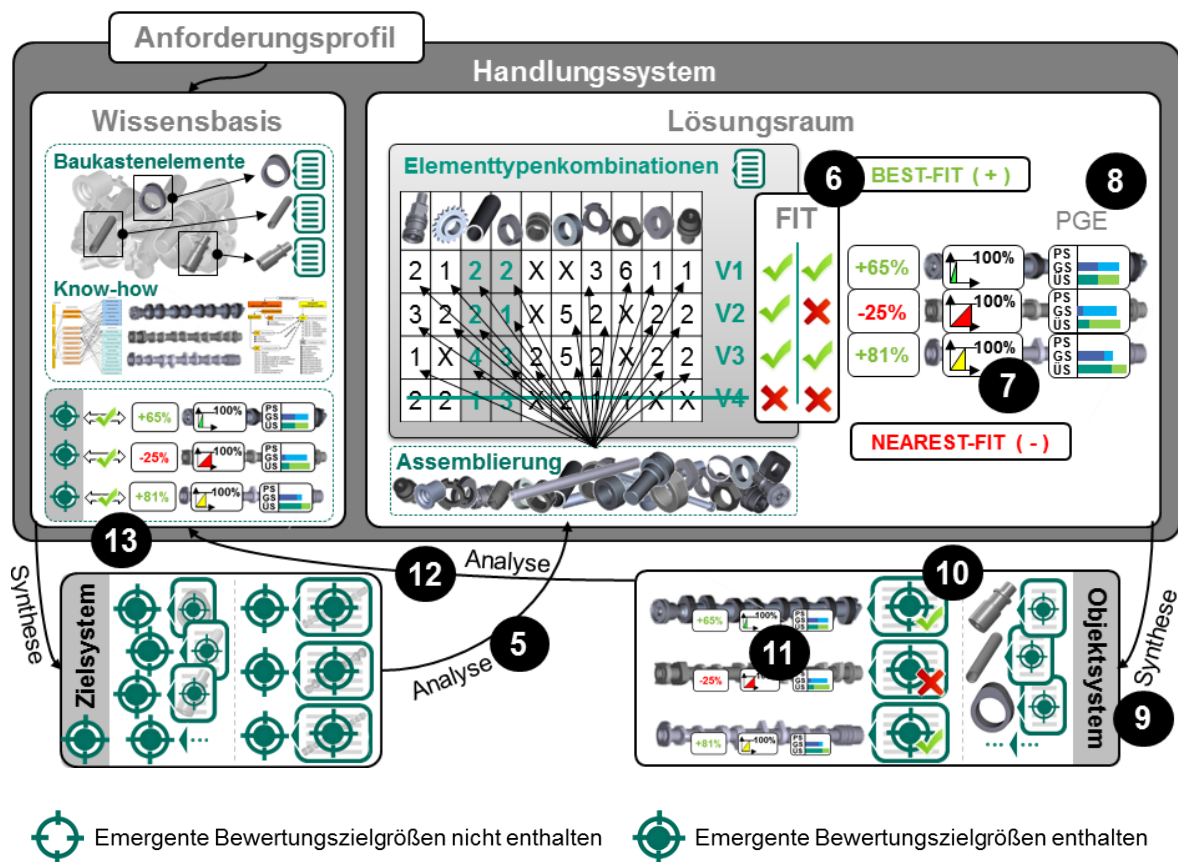


Abbildung 6-27: 2. Iteration – Variantenbewertung durch Rückkopplung von festen auf emergente Bewertungszielgrößen (Schritte 4 - 13)

Diese Intervallforderungen sind nach oben und unten durch Minimalforderungen (z.B. für ertragbare Lasten) und Maximalforderungen (z.B. für Kosten, Masse) begrenzt, so dass ein Unter- oder Überschreiten dieser Vorgaben eine Nichterfüllung der FIT-Bedingung zur Folge hat. Die BEST-FIT-Bedingung quantifiziert den Grad der Überdeckung zwischen den Varianten mit dem Zielsystem. Dabei kann der Fall eintreten, dass ursprünglich gültigen Varianten infolge der Konkretisierung der variantenspezifischen

⁷⁰⁶ Der Informationsabgleich wird durch die gefüllten Punkte im Zielsystemsymbold auf Ziel- und Objektsystemseite gekennzeichnet.

schen Bewertungszielgrößen vom Zielsystem ausgeschlossen werden. Die NEAREST-FIT Bedingung (7) quantifiziert dabei, wie weit diese nachträglich ausgeschlossenen Varianten von den Zielvorgaben entfernt sind. Diese Informationen dienen in Verbindung mit der Aufwandsabschätzung, die 100%-Lösung (HPL) zu erreichen, der Identifikation von Baukastenlücken und Verbesserungspotentialen. Komplettiert wird die Entscheidungsunterstützung durch die variantenspezifischen Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung (8), die insbesondere die Beurteilung der internen Anforderungen basierend auf der produktspezifischen Unternehmensexpertise ermöglichen. Die Bewertungsergebnisse (Zielgrößen und Variationsanteile) werden bei der Objektsystemsynthese (9) in die Objektbeschreibungen der Baukastenelemente geschrieben. Ferner wird die FIT-Bedingung auf Systemebene (10) aktualisiert und die Kennzahlen zur Entscheidungsunterstützung mit den Varianten verknüpft. Durch die Analyse des Objektsystems (12) werden die Ergebnisse der Variantenbewertung in die Wissensbasis (13) gespeichert.

3 - Variantenauswahl auf Grundlage des Entscheidungsunterstützungssystems

Vor der Variantenauswahl muss nochmals geprüft werden, ob zwischenzeitlich kunden- oder anbieterseitige Änderungen am Anforderungsprofil (I) getätigt wurden, da diese direkte Auswirkungen auf das Zielsystem und damit auf die aktuellen Bewertungsergebnisse (II) entsprechend Abbildung 6-28 haben.

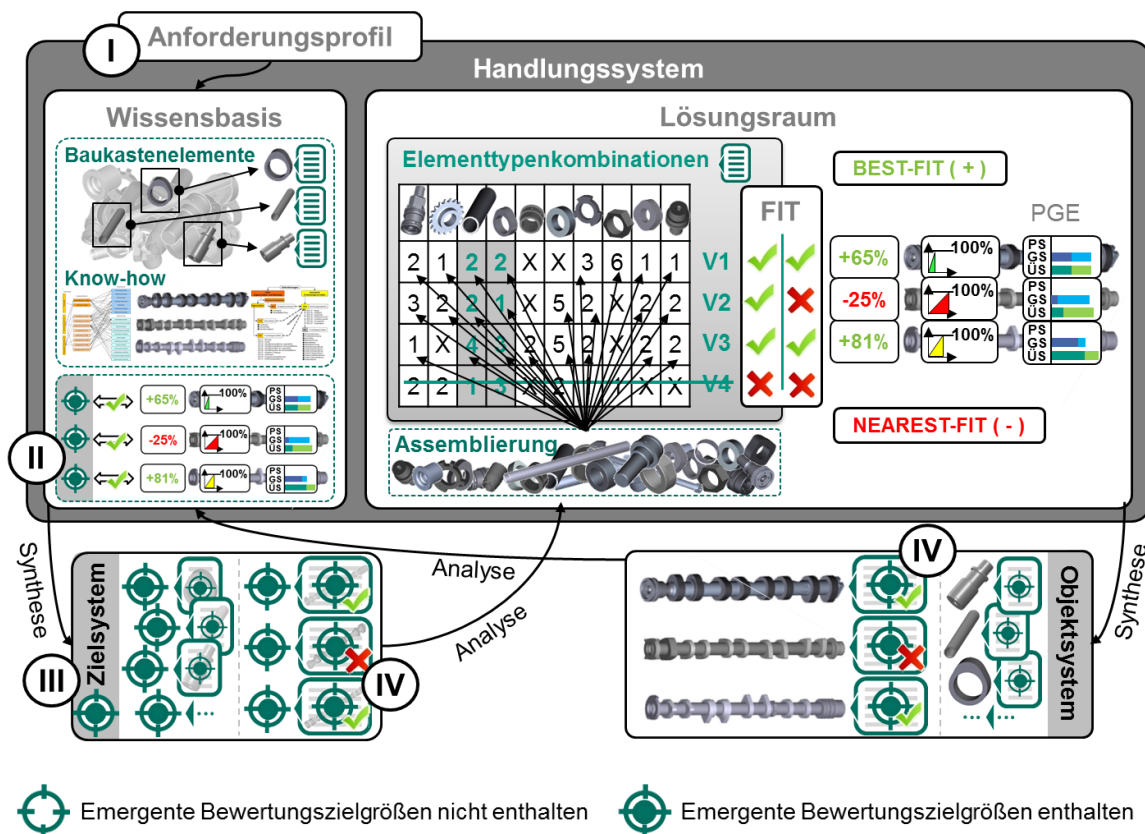


Abbildung 6-28: Variantenauswahl auf Basis des Entscheidungsunterstützungssystems

Eine Zielsystemänderung hätte demnach eine nochmalige Bearbeitung der beiden vorhergehenden Iterationen zur Folge. Bei unverändertem Anforderungsprofil werden die Bewertungsergebnisse im Rahmen der Zielsystemsynthese (III) in das Zielsystem expliziert. Damit stehen im Zielsystem die Begründungen (IV) für die konstruktiven Umsetzungen der Nockenwellenvarianten und die resultierenden variantenspezifischen Überdeckungsgrade mit den Zielvorgaben. Es sind demnach mindestens zwei Iterationen erforderlich, bis sich Änderungen am Anforderungsprofil und damit am Zielsystem in entsprechenden Überdeckungsgraden auf Ziel- und Objektsystemseite darstellen lassen. Erst hiernach kann auf Basis der Bewertungsergebnisse und dem Expertenwissen des Konstrukteurs in Abstimmung mit dem involvierten Entwicklungsteam die Entscheidung für eine oder auch mehrere Varianten getätigt werden, die für die Aufnahme in das Kundenangebot zur konstruktiven Ausdetaillierung freigegeben werden. Eine Variantenauswahl kann aber nur dann getroffen werden, wenn sich passende Varianten finden deren Objektbeschreibungen sich zum einen mit einem akzeptablen Prozentsatz mit dem Zielsystem decken und sich von den anderen, gültigen Varianten in der Bewertung abheben.

Die Frage nach einer akzeptablen Überdeckung mit dem Zielsystem legt die Definition eines Schwellenwertes für die BEST-FIT-Bedingung nahe. Daneben kann ein unterer Schwellenwert anzeigen, dass sich auf Basis des aktuellen Baukasteninhaltes keine hinreichend passenden Varianten ableiten lassen. Denkbar wäre auch der Fall, dass sich zwar passende Varianten finden lassen, die aber in der Bewertung nahe beieinander liegen, so dass kein klarer Favorit identifiziert werden kann. Die Fragestellung, ob sich geeignete Schwellenwerte definieren lassen die signalisieren, dass die geeigneten Lösungen gefunden sind oder keine hinreichend passenden Varianten auf Basis des aktuellen Baukasteninhaltes abgeleitet werden können, wird am Praxisbeispiel in Kapitel 8.2 untersucht. Zur Definition von Schwellenwerten werden Kombinationen aus variantenspezifischen Variationsanteilen und den Kennwerten zur Abschätzung des Aufwandes, die 100%-Lösung (HPL) zu erreichen, untersucht. Hierzu werden die fallabhängigen Zusammenhänge zur Berechnung der Gesamtbewertung (Total) einer Variante in der zweiten Iteration wie folgt definiert:

$$Total_{(FIT=YES)} = (BESTFIT - HPL)[\%] \quad \text{Gl. 6-11}$$

$$Total_{(FIT=NO)} = (NEARESTFIT - HPL)[\%] \quad \text{Gl. 6-12}$$

6.5 Fazit zur Methode zur Entscheidungsunterstützung

Die Untersuchungen zur Variantenentwicklung im Kontext des erweiterten ZHO-Modells haben gezeigt, dass sich dieses iterative Prozessmodell zur Beschreibung

der Variantenauswahl auf Basis bestehender Lösungen eignet (Ziel 2). Dabei setzt sich die Variantenauswahl gemäß Definition 6-1 aus zwei Teilprozessen zusammen:

Definition 6-1: Variantenauswahlprozess im erweiterten ZHO-Modell

Der Variantenauswahlprozess im erweiterten ZHO-Modell setzt sich aus den beiden aufeinander aufbauenden Teilprozessen der Variantenableitung und der Variantenbewertung zusammen. Diese Unterteilung ist notwendig, um emergente Bewertungszielgrößen zu ermitteln (2. Iteration), die sich erst auf Grundlage zuvor abgeleiteter, gültiger Varianten (1. Iteration) auf Systemebene ergeben.

Die erforderliche Unterteilung der Variantenauswahl in zwei grundlegende Teilprozesse wurde durch die Beschreibung des methodischen Gesamtverständnisses durch das Entscheidungsunterstützungssystem (VDSS) deutlich. Für die Variantenauswahl wurden im Rahmen der beiden Teilprozesse variantenspezifische Kennzahlen ermittelt. Zur Bewertung der aktiven Anforderungen wurden FIT-Bedingungen definiert, die die variantenspezifischen Überdeckungsgrade mit dem Zielsystem quantifizieren. Zur Beurteilung der internen Anforderungen, die sich maßgeblich an der produktspezifischen Unternehmensexpertise orientieren, wurde die Ermittlung der variantenspezifischen Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung im Entscheidungsunterstützungssystem verankert.

Die Grundlagen zur Erreichung von Ziel 2 wurden auf Basis der Hypothese 2 und den korrespondierenden Forschungsfragen erarbeitet.⁷⁰⁷ In diesem Zusammenhang wurde gezeigt, wie die Baukastenelemente bestehend aus Objekt und Objektbeschreibung zu beschreiben sind, um sie für neue Kundenanfragen einsetzen und auf deren Eignung bewerten zu können. Hierzu wurden in einer in sechs Teilbereiche gegliederten Produktanalyse insgesamt 14 Arbeitspakete definiert, um die korrespondierenden Forschungsfragen zu beantworten.⁷⁰⁸ Das resultierende Gesamtverständnis zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl verdeutlicht, dass es auf Basis des Verständnisses der Baukastenelemente als korrespondierende Paare aus Objekten und Objektbeschreibungen für neue Produkthanfragen möglich ist, geeignete Elementkombinationen zu finden.

⁷⁰⁷ vgl. Abbildung 6-1 auf S. 172

⁷⁰⁸ vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

7 Entwicklungswerkzeug zur Entscheidungsunterstützung

Im ersten Teil der Präskriptiven Studie wurde, entsprechend der Ausführungen aus dem vorangegangenen Kapitel, im Rahmen der Produktanalyseaktivitäten zu gebauten Nockenwellen eine relationale Testdatenbank aufgebaut. Hiermit wurden die Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen, das Ersetzen der Elementtypen durch Teilenummern vorhandener CAD-Modelle und die Assemblierung von variantenspezifischen Stücklisten verifiziert. Neben den Regeln wurden hierzu die erforderlichen Inhalte der fünf Objektbeschreibungsbausteine für die relevanten, zu kombinierenden Elemente des Baukastens bereits in die Datenbank integriert.⁷⁰⁹ Diese zunächst für Testzwecke aufgebaute Datenbank wurde, gemäß den Erfordernissen des Entscheidungsunterstützungssystems (VDSS), kontinuierlich überarbeitet.

Im zweiten Teil der Präskriptiven Studie wird, entsprechend Ziel 2, zur Operationalisierung des Entscheidungsunterstützungssystems (VDSS) eine prototypische Softwareanwendung zur Untersuchung der Forschungsfrage 2.3 aufgebaut.⁷¹⁰

Forschungsfrage zur Präskriptiven Studie Teil 2 – Prototypensynthese

FF2.3 Wie kann die Methode im Rahmen einer prototypischen Softwareanwendung operationalisiert werden?

Die Datenbank wurde bei der Realisierung des Softwareprototyps insbesondere für die Variantenableitung in der ersten Iteration im Kontext des Entscheidungsunterstützungssystems benötigt.⁷¹¹ Zur Darstellung des Softwareprototyps wurde die Datenbank zum Aufbau der Modelle im Objektsystem an ein CAD-System geknüpft. Da die datenbankbasierte Berechnung der Variantenbewertung im Rahmen der zweiten Iteration unter Einbeziehung der Rückgabewerte aus dem CAD-System einen hohen, programmiertechnischen Aufwand zur Folge gehabt hätte, wurde hierfür ein Tabellenkalkulationsprogramm eingesetzt, das zudem durch vorhandene Berechnungsroutinen wesentlich flexibler im Rahmen der Programmerstellung variiert werden konnte.

Abschließend zur Einleitung dieses Kapitels zeigt die nachfolgende Abbildung 7-1 den zweiten Teil der Präskriptiven Studie zur Erreichung von Ziel 2 im Gesamtkontext des Forschungsvorgehens.

⁷⁰⁹ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196

⁷¹⁰ vgl. Kapitel 4.1

⁷¹¹ vgl. Abbildung 6-25 auf S. 223

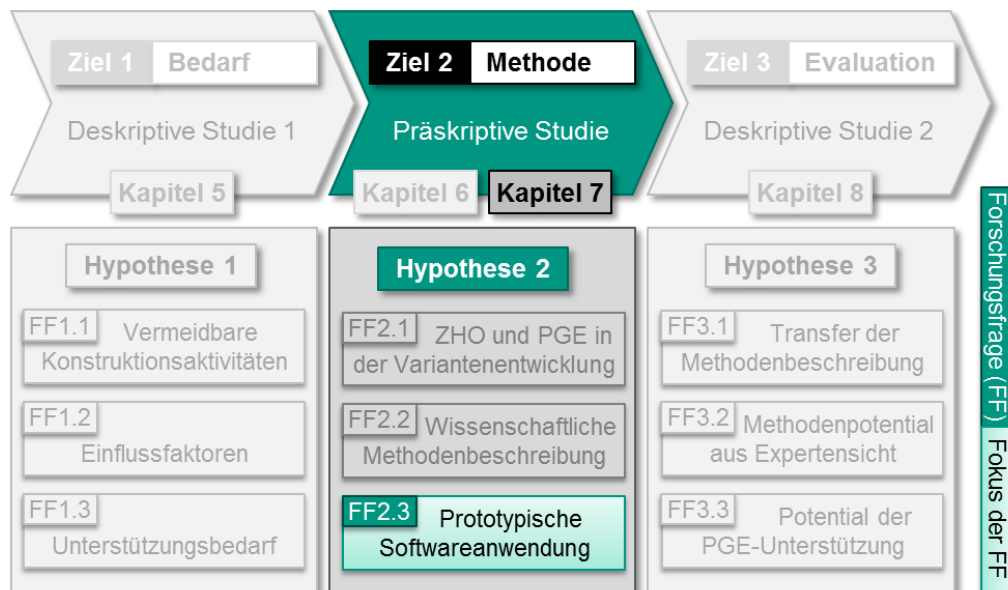


Abbildung 7-1: Einordnung der Forschungsfrage zum zweiten Teil der Präskriptiven Studie (Prototypensynthese) in den Gesamtkontext des Forschungsvorhabens

7.1 Softwareprototyp zur Entscheidungsunterstützung

Zur Realisierung des Softwareprototyps werden für die Datenbankerstellung zur Variantenableitung, die Kennwertberechnung für die Variantenbewertung und die Modellierung der CAD-Modelle jeweils spezifisch geeignete Programme eingesetzt.

Die Anwendung beginnt mit dem Öffnen des Haupteingabeformulars der Datenbank, die mit Microsoft Access 2010 erstellt wurde. Der Konstrukteur sieht hiernach die im Hintergrund der Abbildung 7-2 gezeigte Benutzeroberfläche. Zur besseren Orientierung am Entscheidungsunterstützungssystem (VDSS) wird zur Erläuterung des Softwareprototyps die identische Nummerierung verwendet.⁷¹² Die Elementtypenbeschreibungen und Dateninformationssätze zur Verknüpfung von Objekten und Objektbeschreibungen der aktuellen Baukastenelemente (A) sowie das in der Wissensbasis enthaltene, produktspezifische Know-how (B) sind in entsprechenden Tabellen abgelegt. In diesem Zusammenhang gibt es beispielsweise für jede der zehn Elementklassen eine Tabelle, in der die unterschiedlichen Elementtypen der Klasse enthalten sind. Ebenso gibt es für jede Elementklasse Tabellen, die die Dateninformationssätze der zur Verfügung stehenden Baukastenelemente enthalten. Die Datenbanklogik zur Ermittlung der Elementtypenkombinationen sowie der Assemblierungsregeln⁷¹³ sind ebenfalls in Tabellen abgelegt. Auf diese werden mittels Datenbankabfragen zugegriffen und fallspezifische Anfrageergebnisse ermittelt.

⁷¹² vgl. Kapitel 6.4

⁷¹³ Der Begriff „Assemblierungsregeln“ wird im Kontext dieser Arbeit auf S. 206 eingeführt.

Auf Grundlage der aktuellen Wissensbasis werden zunächst die funktions- und anwendungsbezogenen Informationen des kunden- und anbieterbasierten Anforderungsprofils (C) im Rahmen der Zielsystemsynthese (D) dazu verwendet, gültige Elementtypenkombinationen für die konkrete Anfrage zu generieren. Hierzu gibt es auf der einen Seite die Möglichkeit, geforderte Funktionen und Anwendungen sowie konkret einzubeziehende Elementtypen auszuwählen (D1). Zusätzlich können auf der anderen Seite Funktionen, Anwendungen und Elementtypen auch ausgeschlossen werden (D2). Um die mehrfach im Rahmen einer assemblierten Nockenwelle verbauten Elemente, wie Ventillocken oder auch Lagerringe, in der richtigen Anzahl in die variantenspezifischen Stücklisten aufzunehmen, werden Informationen zur Zylinderanzahl, der Anzahl der Ventile je Zylinder und der Ventilsteuerung sowie die Anzahl der radialen Lagerstellen benötigt (D3).⁷¹⁴ Die für den Aufbau der CAD-Modelle erforderliche Parametersätze (D4) und die Anforderungen zur Bewertung der abgeleiteten Varianten (D5) werden in entsprechende Eingabemasken eingegeben. Alle Informationen werden dabei für die konkrete Auswahl unter einem selbst gewählten Projektnamen abgespeichert.

Nachdem die relevanten Informationen in die Datenbank eingegeben sind, werden diese (E) hinsichtlich der ableitbarer Elementtypenkombinationen (F) analysiert. Die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten im Lösungsraum wird anschließend durch die Wahl einer Optimierregel⁷¹⁵ (G) reduziert. Die Elementtypen der gültigen Elementtypenkombinationen werden hiernach durch die Baukastenelemente ersetzt (H). Hierzu wird zunächst eine Vorassemblierung (H1) zum Aufbau der Nockenwellenvarianten durchgeführt. Die hierfür generierten Datensätze enthalten neben den Stücklisteninformationen auch feste Produkteigenschaften, die in den Dateninformationssätzen der Elementbeschreibungen der einbezogenen Baukastenelemente enthalten sind. Durch Anwendung der Anforderungen (D5), die sich auf die bereits vorhandenen, festen Eigenschaften beziehen, werden die derzeitigen Nockenwellendatensätze weiter reduziert (H2). Die generierten Datensätze (H2) werden dann in die mit Microsoft Excel 2010 erstellten Berechnungstabellen exportiert, in denen die Datensätze für die Weiterverarbeitung im CAD aufbereitet werden. Da die Variantenbewertungen außerhalb der Datenbank mit Hilfe von Berechnungstabellen ermittelt werden, werden an die übermittelten Datensätze zusätzlich die hierfür relevanten Daten aus der Wissensbasis geknüpft und an Microsoft Excel übertragen.

Die Übertragung der Daten aus der Datenbank an die Berechnungstabellen zeigt Abbildung 7-3. Die für die Bewertung relevanten Daten (A), (B) und (C) aus der Wissensbasis werden an die datenbankintern generierten Variantendatensätze geknüpft

⁷¹⁴ vgl. Tabelle 6-14 auf S. 207

⁷¹⁵ vgl. Kapitel 6.3.2 – Optimierung der gültigen Elementtypenkombinationen

(H2) und an die Berechnungstabelle (T1) übertragen. In Abbildung 7-3 sind diese Verknüpfungen der Einfachheit wegen direkt dargestellt. Tatsächlich konnten diese aber erst infolge der Zielsystemsynthese (D) auf Basis der aktuellen Wissensbasis mit anschließender Analyse (E) im Lösungsraum erzeugt werden (vgl. hierzu Abbildung 7-2). Die übertragenen Datensätze werden im nächsten Schritt in einer zweiten Tabelle (T2) auf die CAD-relevanten Informationen reduziert, die im Rahmen der Objektsystemsynthese (I) für die Anpassung der CAD-Modelle der Baukastenelemente (J) sowie für deren Zusammenbau zu Nockenwellenbaugruppen (K) benötigt werden. Für jede aufgebaute Nockenwellenvariante ermittelt das CAD-System emergente Produkteigenschaften.⁷¹⁶ Diese geometriegebundenen Bewertungszielgrößen (K1) liegen bislang nur in den internen Modellen des CAD-System vor und erweitern zunächst im Anschluss an den Analyseprozess (L) zusammen mit alle derzeitigen Zwischenergebnissen im Objektsystem die Wissensbasis (M).

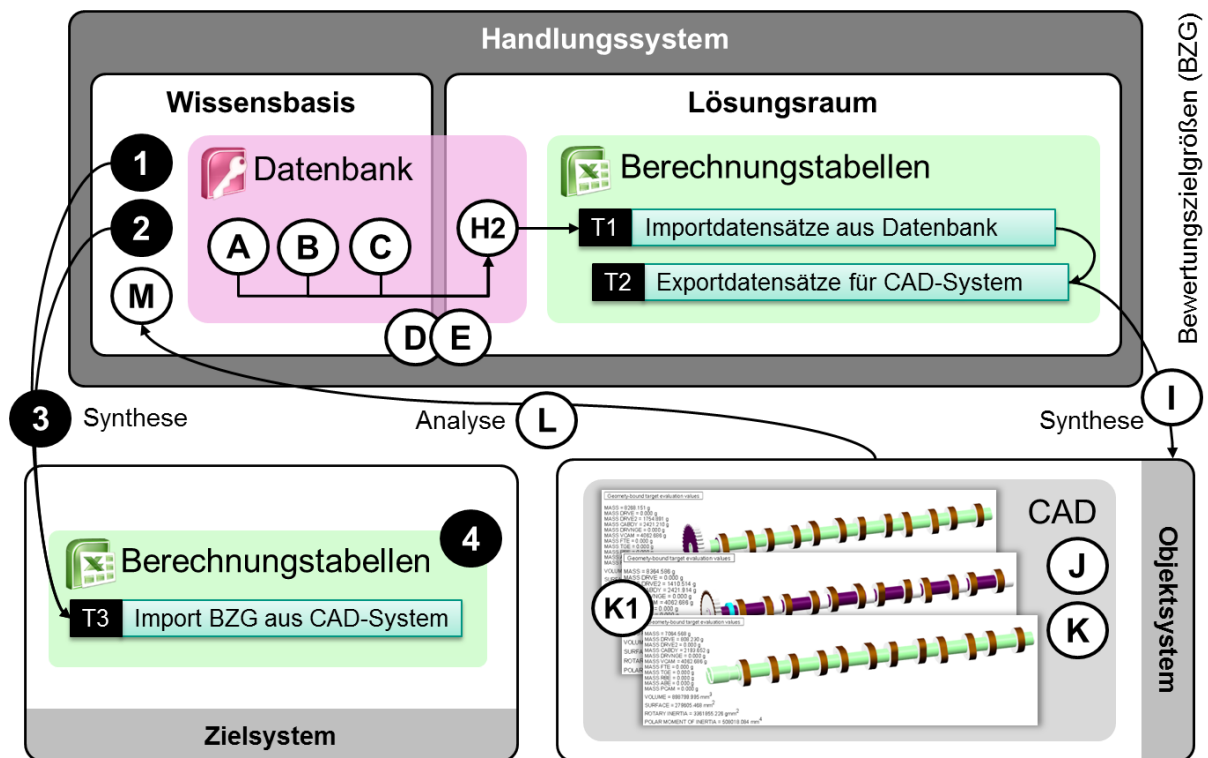


Abbildung 7-3: Aufbau der CAD-Modelle und Explizieren der geometriegebundenen Bewertungszielgrößen (BZG) über die Wissensbasis in das Zielsystem (1. → 2. Iteration)

Nachdem die Aktualität des Anforderungsprofil (1) geprüft, bestätigt und die anfrage-spezifischen Zwischenergebnisse (M) in der Wissensbasis verankert wurden, wird auf Grundlage der erweiterten Wissensbasis (2) das Zielsystem im Rahmen der Ziel-systemsynthese (3) konkretisiert, indem die objektspezifischen Bewertungszielgrö-

⁷¹⁶ vgl. Abbildung 6-22 auf S. 219

ßen der gültigen Nockenwellenvarianten aus dem Objektsystem in das Zielsystem expliziert werden. Hierzu werden die bewertungsrelevanten Größen in die Berechnungstabelle (T3) geschrieben. Bei der Gültigkeitsprüfung der aktuell im Objektsystem vorliegenden Nockenwellenvarianten konnten bislang die geometriegebundenen Bewertungszielgrößen noch nicht berücksichtigt werden, da diese erst nach Durchlaufen der ersten Iteration explizit im Zielsystem für die Bewertung zur Verfügung stehen. Demzufolge muss im nächsten Schritt die FIT-Bedingung unter Einbeziehung der emergenten Produkteigenschaften aktualisiert werden.

Die Überprüfung der FIT-Bedingung unter Berücksichtigung der explizit im Zielsystem (4) vorliegenden Bewertungszielgrößen bildet gemäß Abbildung 7-4 den Ausgangspunkt für den weiteren Variantenbewertungsprozess. Zur Analyse (5) werden die variantenspezifischen Werte an die Berechnungstabelle (T12) zur Überprüfung der FIT-Bedingung und der Berechnung der korrespondierenden BEST- und NEAREST-FIT-Bewertungsergebnisse (6) übertragen. Daneben werden für die Nockenwellenvarianten die relativen Aufwände quantifiziert, die zur Erreichung der 100%-Lösung erforderlich sind (7).

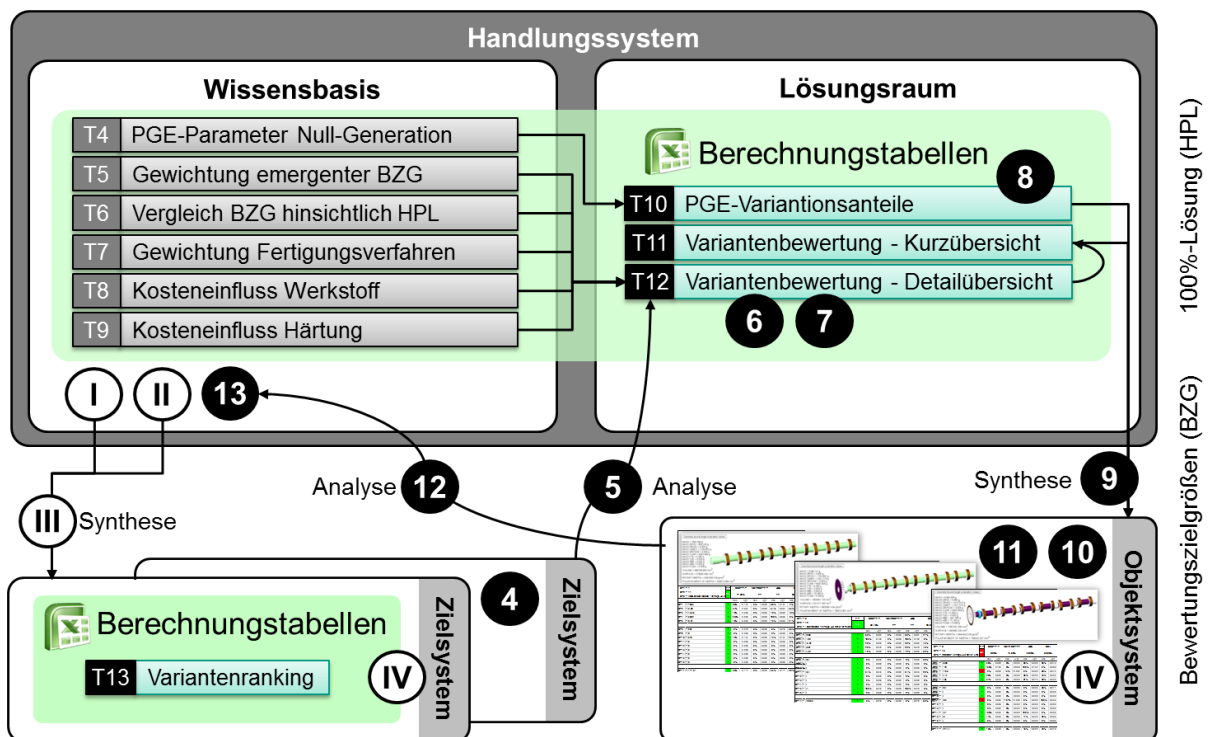


Abbildung 7-4: Generierung des Variantenrankings zur Unterstützung der Variantenauswahl auf Grundlage des Softwareprototyps (2. Iteration)

Zur Aktualisierung der FIT-Bedingung (6) und zur Berechnung des Aufwandes zur Erreichung der 100%-Lösung (7) werden Informationen aus der Wissensbasis erforderlich, die in den Tabellenblättern T5 bis T9 abgelegt sind. Zur Analyse der FIT-Bedingungen wurden hierzu die emergenten Bewertungszielgrößen zunächst in einer

ersten Paarvergleichsmatrix gewichtet (T5) und in einer zweiten Matrix auf den Aufwand zur Erreichung der 100%-Lösung (HPL) gegeneinander abgewogen (T6). Zusätzlich werden für die Ermittlung eines Faktors zur vergleichenden Kostenabschätzung der Varianten die Fertigungsverfahren (T7) sowie der Kosteneinfluss der verwendeten Werkstoffe (T8) und der gegebenenfalls erforderlichen Härtung von Bauteilen (T9) berücksichtigt. Die Anzahl der Bearbeitungsschritte sind dabei mit Bezug auf das entsprechende Fertigungsverfahren in den Dateninformationssätzen (DIS) der Objektbeschreibungen der Baukastenelemente enthalten.⁷¹⁷ Die Tabelle T11 fasst in einer Kurzübersicht⁷¹⁸ die Hauptinformationen aus den in Tabelle T12 enthaltenen Detailinformationen zur Variantenbewertung zusammen. Daneben enthält die Kurzübersicht zusätzlich die variantenspezifischen Variationsanteile gemäß der PGE - Produktgenerationsentwicklung. Die Berechnung der Variationsanteile (8) findet im Berechnungsblatt T10 statt. Die hierfür erforderlichen Parameterwerte der Originale der 42 Basisnockenwellen⁷¹⁹ sind als Teil der Wissensbasis in der Tabelle T4 dokumentiert. Auf Basis der Variationsanteile (T10) und der Variantenbewertungen (T12) werden in der Objektsynthese (9) die Objektbeschreibungen der Baukastenelemente (10) und der Nockenwellenvarianten (11) im Objektsystem verankert.

Die Ergebnisse im Objektsystem werden im Anschluss im Kontext des bisherigen, fallspezifischen Inhaltes der Wissensbasis analysiert (12) und entsprechend erweitert (13). Entspricht zu diesem Zeitpunkt das Anforderungsprofil (I) noch dem, das beim Eintritt in die erste Iteration zur Variantenableitung Gültigkeit hatte, dann wird auf Grundlage des Anforderungsprofils und der aktualisierten Wissensbasis (II) das Zielsystem synthetisiert (III) und die Bewertungsergebnisse in Form eines Variantenrankings⁷²⁰ durch die Berechnungstabelle T13 ins Zielsystem expliziert. Damit ist der Abgleich zwischen Ziel- und Objektsystem (IV) vollzogen, d.h., das Zielsystem beinhaltet die Begründung für die Variantenbewertungen, die auf dem Vergleich der Soll-Werte aus dem Anforderungsprofil und den generierten Ist-Werten in den Objektbeschreibungen der gültigen Varianten im Objektsystem basiert.

7.2 Mehraufwand für ein unternehmensweit einsetzbares Tool

Der Aufbau und der Funktionsumfang des Softwareprototyps basieren auf den Untersuchungsergebnissen der Produktanalyse von gebauten Nockenwellen.⁷²¹ Für die Operationalisierung der Methode im Rahmen der prototypischen Softwareanwen-

⁷¹⁷ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196

⁷¹⁸ vgl. Abbildung 11-20 und Abbildung 11-21 im Anhang zu Kapitel 7

⁷¹⁹ vgl. Kapitel 6.3.1 – Definition der relevanten, zu kombinierenden Elementtypen

⁷²⁰ vgl. Tabelle 11-16 im Anhang zu Kapitel 8

⁷²¹ vgl. Produktanalyse in Kapitel 6.3

derung wurden Art und Anzahl der zu kombinierenden Elemente des Baukastens beschränkt, um die Anzahl der Beziehungen zwischen Merkmalen, Eigenschaften, Elementen und Anforderungen und den daraus resultierenden Regelsätzen zur Ableitung gültiger Nockenwellenvarianten zu begrenzen.

In diesem Kapitel wird erläutert, was auf Basis des Softwareprototyps getan werden muss, um diesen in ein unternehmensweit anwendbares Entwicklungswerkzeug zu überführen. Eine entsprechende Gegenüberstellung hierzu zeigen Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2, die sich an den Arbeitspaketen (1) bis (14) der Produktanalyse orientiert.⁷²² Als weitere Punkte wurden die datenbankbasierte, prototypische Umsetzung der Variantenableitung (15), die auf Berechnungsblättern basierenden Variantenbewertungen (16) sowie die Beschreibung der Baukastenelemente (17) mit in Gegenüberstellung aufgenommen, da insbesondere die Beschreibung der Baukastenelemente als korrespondierende Paare aus Objekt und Objektbeschreibung auf Kompatibilität mit bestehenden Datenmanagementsystemen geprüft werden muss. In den Gegenüberstellungen in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 sind aus den 17 zu berücksichtigenden Aktivitäten bei der Erstellung eines unternehmensweiten Entwicklungstools die Hauptpunkte aufgeführt, die die größten Aufwände generieren.⁷²³

Softwareprototyp	Aktivität (Nr.)	Entwicklungswerkzeug
42 gebaute Nockenwellen verteilt auf 5 Nockenwellentypen	Zusammenstellung der Referenzdaten (1)	Zugriff auf 2D- und 3D-CAD-Daten mit korrespondierenden Dateninformationssätzen des unternehmensweiten Datenmanagementsystems.
10 Elementklassen	Ermittlung enthaltener Elementklassen (2)	Definition zusätzlicher Elementklassen zur Abdeckung der unternehmensweit verfügbaren Nockenwellentypen. Anpassung der funktions- und anwendungsbezogenen Produkteigenschaften und deren Beziehungen mit den neuen und bestehenden Elementklassen.
87 Elementtypen die mit den Produkteigenschaften 264 Beziehungen bilden	Ableitung erforderlicher Elementtypen (6)	Erweiterung der Elementklassen um neue Elementtypen zur Beschreibung der unternehmensweiten Nockenwellentypen mit Anpassung und Erweiterung der produktspezifischen Regeln.

Tabelle 7-1: Untersuchung des Mehraufwandes für den Aufbau eines unternehmensweit einsetzbaren Entwicklungswerkzeuges bezogen auf die Datenbasis des Softwareprototyps (1/2)

⁷²² vgl. Abbildung 6-9 auf S. 187

⁷²³ vgl. grau markierte Hauptaktivitäten in der Gesamtübersicht im Anhang in Kapitel 11.3.2

Softwareprototyp	Aktivität (Nr.)	Entwicklungswerkzeug
Zugriff auf CREO-CAD-Daten ⁷²⁴ von 9 Nockenwellen und über 50 weiteren Einzelteilen. Für die geometrische Beschreibung dienen 44 Parameter.	Parametrisierung der CAD-Daten (13)	Überarbeitung der Parametrisierung der CAD-Modelle. Zusätzlich die bisherigen, CAD-internen Zusammenbaubedingungen unabhängig vom CAD-System definieren.
Access-Datenbank	Datenbankerstellung zur Variantenableitung (15)	Programmierung der Logik zur Variantenableitung auf Grundlage des unternehmensweit zur Verfügung stehenden Datenmanagementsystems.
Excel-Berechnungsblätter	Variantenbewertung (16)	Die Variantenbewertung kann weiterhin auf Excel basieren. Hierbei sind die in den Berechnungsblättern enthaltenen Annahmen für den Prototyp zu verifizieren und Datenbankinformationen zur Steigerung der Performance aus den Berechnungsblättern in die Datenbank zu transferieren.
Korrespondierende Paare aus Objekt- und Objektbeschreibung ⁷²⁵	Beschreibung der Baukastenelemente (17)	<p>Objekt:</p> <p>Künftige, aber gerade auch bestehende CAD-Modelle müssen (unabhängig vom CAD-System) entsprechend der erforderlichen Parametrisierung aufgebaut sein, und zwar auf Element- und Systemebene.</p> <p>Objektbeschreibung:</p> <p>DIS: Auch unter Beibehaltung der Access-Datenbank müssen zur Verwendung der Daten im unternehmensweiten Datenmanagementsystem die Dateninformationssätze um zusätzliche Informationen (Typ, MPS, PGE und zusätzliche, feste Produkteigenschaften) erweitert werden.</p> <p>Grundsätzliches:</p> <p>Die Verwendung der Daten im unternehmensweiten Datenmanagementsystem funktioniert nur bei CAD-integrierten Datensätzen.⁷²⁶</p>

Tabelle 7-2: Untersuchung des Mehraufwandes für den Aufbau eines unternehmensweit einsetzbaren Entwicklungswerkzeuges bezogen auf die Datenbasis des Softwareprototyps (2/2)

⁷²⁴ Die CAD-Daten wurden für den Softwareprototyp mit PTC CREO 2 M140 aufgebaut.

⁷²⁵ Die Beschreibung der Baukastenelemente (vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196) muss auch für ein unternehmensweites Entwicklungstool durch das Datenmanagementsystem abgebildet werden.

⁷²⁶ Neben der 2D-Zeichnung und dem korrespondierendem Dateninformationssatz sind zusätzlich die 2D- und 3D-CAD-Daten in der Datenbank mit abgelegt.

Die in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 aufgezeigten Aktivitäten müssen beim Aufbau eines Entwicklungswerkzeugs auf Grundlage des Softwareprototyps erneut unter Berücksichtigung unternehmensweiter Randbedingungen, wie dem Datenmanagementsystem, bearbeitet werden. Dabei kann der Softwareprototyp als Referenzprodukt dienen und einzelne, bereits vorhandene Elemente übernommen werden. Der gemäß Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 beschriebene Mehraufwand muss in diesem Zusammenhang mit in die Entscheidung hinsichtlich der Darstellung eines unternehmensweit zur Verfügung stehenden Entwicklungswerkzeuges zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl in der Konzeptentwicklung einbezogen werden.

7.3 Fazit zum Softwareprototyp

Im Kapitel 7 wurde entsprechend Ziel 2 ein Softwareprototyp auf Basis des Entscheidungsunterstützungssystem (VDSS)⁷²⁷ anhand einer konkreten Industriebanwendung aufgebaut und verifiziert. Mit dem Softwareprototyp lassen sich fallspezifische Nockenwellenvarianten für konkrete Anfragen datenbankbasiert ableiten und mit Hilfe von Berechnungstabellen bewerten. Die erforderlichen, geometriegebundenen Bewertungszielgrößen auf Systemebene der gültigen Nockenwellenvarianten werden CAD-basiert ermittelt. Hierzu werden für die datenbankbasiert generierten Beschreibungen der abgeleiteten Nockenwellenvarianten die korrespondierenden CAD-Modelle auf Teileebene aufgebaut und im Zusammenbau hinsichtlich der emergenten Bewertungszielgrößen analysiert. Dabei wird auf den für den Softwareprototyp erstellten Baukasten zugegriffen, der Baukastenelemente von neun Nockenwellen und weiteren 50 Einzelteilen enthält. Diese Baukastenelemente sind, um mit der für die Variantenauswahl erforderlichen Beschreibung der Baukastenelemente⁷²⁸ konform zu sein, neu erstellt worden und damit vom unternehmensinternen Datenmanagementsystem abgekoppelt. In diesem Zusammenhang deckt der aktuelle Baukasten des Softwareprototyps fünf Nockenwellentypen ab. Damit können Anfragen zu neuen Nockenwellentypen nur bedingt aus dem Baukasten bedient werden, weshalb die gemäß den Ausführungen aus Kapitel 7.1 der Wissensbasis zuzuordnenden Datenbankinhalte und Berechnungstabellen einer ständigen Überarbeitung und Erweiterung unterliegen. Für eine Unternehmensentscheidung, auf Grundlage des Softwareprototyps ein Entwicklungswerkzeug zu generieren, das in den unternehmensweiten Konstruktionsabteilungen eingesetzt werden kann, sind die an die in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 aufgeführten Aktivitäten geknüpften Mehraufwände zu beachten. Hinzu kommt, dass neben der Einbindung des Werkzeuges in die Prozess- und

⁷²⁷ vgl. Kapitel 6.4

⁷²⁸ vgl. Abbildung 6-12 auf S. 196

Softwarelandschaft des Unternehmens auch eine zentrale Stelle für die Erweiterung, Mitarbeiterunterstützung und Pflege des Tools eingerichtet werden sollte.

Nachdem entsprechend Ziel 2 die Operationalisierung der Methode durch einen anwendbaren Softwareprototyp realisiert wurde, wurde die Methode im nächsten Schritt anhand zweier Beispielprojekte evaluiert. Ergänzend hierzu wurde eine Interview-Studie mit Konstrukteuren für Ventiltriebkomponenten durchgeführt, um die Methode aus Sicht von Experten hinsichtlich des Potentials für einen Einsatz in der industriellen Konstruktionspraxis zu bewerten. Die Evaluationsergebnisse aus den Experteninterviews und die Ergebnisse aus der Anwendung des Softwareprototyps werden im nachfolgenden Kapitel 8 vorgestellt.

8 Evaluation der Methode in der industriellen Praxis

In diesem Kapitel wird die Evaluation der Methode im Kontext des fallgebenden Unternehmens beschrieben (Ziel 3). Hierzu wird anhand der in Kapitel 4 vorgestellten Forschungshypothese 3 überprüft, ob der Einsatz der Methode zur Entscheidungsunterstützung die Variantenauswahl in der Konzeptentwicklung während der Angebotserstellungsphase unterstützt. Die zur Überprüfung der Gültigkeit der Forschungshypothese 3 formulierten Forschungsfragen werden im Rahmen der Deskriptiven Studie 2 bearbeitet. Die Bewertung der Methode aus Sicht der industriellen Praxis wurde hierbei in zwei Teile untergliedert. Zum einen wurde die Methode im Rahmen von semistrukturierten Interviews aus Expertensicht hinsichtlich des Potentials für einen Praxiseinsatz bewertet. Die Expertenaussagen im Rahmen der Interview-Studie trugen dabei entscheidend zum Verständnis der unternehmens- und mitarbeiterseitigen Randbedingungen zur Gewährleistung der Nutzbarkeit der Methode im industriellen Praxisbetrieb bei. Die im Rahmen der Untersuchungen zum Mehraufwand für ein unternehmensweit einsetzbares Entwicklungswerkzeug bereits identifizierten Randbedingungen wurden dabei unabhängig durch die Experten bestätigt und ergänzt.⁷²⁹ Mit den Experteninterviews sollen dabei konkret die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden.

Forschungsfragen zur Deskriptiven Studie 2 – Experteninterviews (HP 3)

- FF3.1** Ist die Methode derart beschrieben, dass sie lehr- und lernbar ist und damit der Transfer der wissenschaftlichen Methodenbeschreibung durch eine Softwareanwendung für den Praxiseinsatz geleistet werden kann?
- FF3.2** Wie wird das Potential der Methode hinsichtlich eines Einsatzes in der Konstruktionspraxis aus Expertensicht bewertet?

Im zweiten Teil der Deskriptiven Studie 2 wird die Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl mit Hilfe des Softwareprototyps retrospektiv anhand zweier abgeschlossener Anfrageprojekte getestet. Durch die Anwendung der Methode auf historische Daten soll mittels eines Rückvergleichs analysiert werden, wie das Methodenpotential für den Einsatz in der industriellen Praxis zu bewerten ist.⁷³⁰ Hierzu soll die folgend Forschungsfrage beantwortet werden.

⁷²⁹ vgl. Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 auf S. 237 und S. 238

⁷³⁰ vgl. Kapitel 4.2 – Forschungsvorgehen

Forschungsfrage zur Deskriptiven Studie 2 – Methodenanwendung (HP 3)

FF3.3 Kann das Potential der auf der PGE - Produktgenerationsentwicklung basierenden Entscheidungsunterstützung der Methode durch retrospektive Anwendung auf abgeschlossene Anfrageprojekte nachgewiesen werden?

Zur Orientierung werden einleitend in den beiden folgenden Unterkapiteln die adressierten Forschungsfragen in den Gesamtkontext des Forschungsdesign eingeordnet.

8.1 Durchführung einer semistrukturierten Interview-Studie

Der Fokus der Interviews liegt auf der Experteneinschätzung hinsichtlich des Methodenpotentials für einen Praxiseinsatz im Rahmen der Konzeptentwicklung bei Neuanfragen durch Kunden. Für die Interviews wird ein Fragebogen erstellt, in den die quantitativen Aussagen der Interviewteilnehmer direkt eingetragen werden können. Die qualitativen Aussagen hingegen werden im Nachgang an die Interviews unter Verwendung der Tonaufzeichnung herausgearbeitet.⁷³¹ Bevor die Einladungen zu den Interviews verschickt werden können, wird ein gemeinsamer Vorberechungs-termin mit allen Teilnehmern organisiert. An diesem Termin wird das übergeordnete Ziel der Interview-Studie vorgestellt und im Gesamtkontext des Forschungsvorhabens diskutiert. Die Diskussion wird dabei entlang des Fragebogens geführt. Der Aufbau und Inhalt des Fragebogens orientiert sich an den Forschungsfragen, die die folgende Abbildung 8-1 in den Kontext des Forschungsvorhabens einordnet.

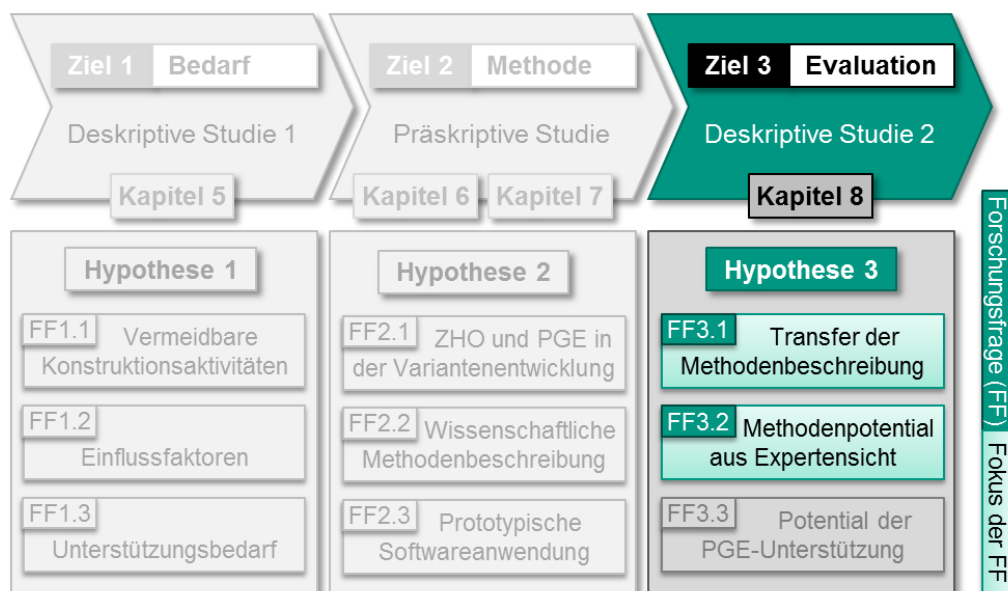


Abbildung 8-1: Einordnung der Forschungsfragen zum ersten Teil der Deskriptiven Studie 2 (semistrukturierte Experteninterviews) in den Gesamtkontext des Forschungsvorhabens

⁷³¹ Fragebogen zur Interview-Studie im Anhang in Kapitel 11.4

Durchführung der Interviews

Der Fragebogen wird zur Strukturierung der Interviews in drei Teilbereiche untergliedert und insgesamt sieben Interviews anhand dieses Schemas durchgeführt. Da mit dem Softwareprototyp Nockenwellenvarianten abgeleitet werden können, fällt die Wahl der Teilnehmer auf Konstrukteure von Nockenwellensystemen, die bereits an der Fragebogen-Studie zur Analyse der Konzeptentwicklung teilgenommen haben.⁷³²

Im ersten Teil des Interviews werden allgemeine Fragen zur Angebotserstellungsphase gestellt, um auf die Methode und den Softwareprototyp zur Entscheidungsunterstützung hinzuleiten. Die hierfür formulierten Fragestellungen werden teilweise bereits im Rahmen der Fragebogen-Studie aus Kapitel 5 untersucht. Da alle Teilnehmer der Interview-Studie auch an der Fragebogen-Studie teilgenommen haben, kann durch Vergleich der Bewertungsergebnisse überprüft werden, ob sich die Aussagen in der Zwischenzeit⁷³³ verändert haben. Dies ist, auch gerade hinsichtlich der Kernaussagen mit Bezug auf (1) das Auftreten redundanter und häufig wiederkehrender Konstruktionsaktivitäten, (2) der Einschätzung des aufgrund zusätzlicher Iterationen entstehenden Mehraufwandes und (3) dem Anteil an vermeidbaren Konstruktionsschleifen in der Angebotsphase, nicht der Fall gewesen.⁷³⁴

Im zweiten Teil des Interviews wird der Softwareprototyp zunächst im Detail vorgestellt und diskutiert. Erst nachdem die Funktionsweise, die Anwendung, die Ein- und Ausgabegrößen sowie der angedachte Nutzen des Werkzeuges nach Aussage der Interviewpartner verstanden ist, wird mit dem zweiten Fragenblock begonnen, indem die Teilnehmer zunächst nach Entwicklungssituationen aus abgeschlossenen oder laufenden Projekten gefragt werden, für die sich die Anwendung der Methode ihrer Meinung nach eignet.⁷³⁵ Die Diskussionen mit den Experten anhand echter Praxisbeispiele aus ihrer täglichen Arbeit trägt, nach Einschätzung des Interviewers, entscheidend zum Methodenverständnis bei den Interviewpartnern bei. Darüber hinaus wird, durch die Operationalisierung der Methode durch den vorgestellten Softwareprototyp, den Interviewteilnehmern auch der Zugang zu den eingesetzten, wissenschaftlichen Erklärungsmodellen ermöglicht, wodurch sich anregende Diskussionen zum Transfer von wissenschaftlicher Theorie in praktische Vorgehensweisen ergeben (FF3.1). Neben dem Transfer der wissenschaftlichen Methode in eine praxistaugliche Anwendung wird auch, wie zuvor beschrieben, der Methodentransfer von

⁷³² vgl. Kapitel 5 auf S.139 ff.

⁷³³ Zwischen Fragebogen- (Mai-Sept.'14) und Interview-Studie (Apr.-Mai'15) lag ein halbes Jahr

⁷³⁴ Quantitative Bewertungen in Abbildung 11-22 und Abbildung 11-23 im Anhang in Kapitel 11.4.2

⁷³⁵ Die Anwendung des Tools an Beispielen von Entwicklungssituationen aus der täglichen Arbeit der Interviewteilnehmer wurde im Rahmen der Detailvorstellung des Softwareprototyps bewusst durch den Interviewer vorgenommen, um zu verhindern, dass die spätere Bewertung der Methode durch Einflüsse der Benutzerfreundlichkeit des Softwareprototyps verfälscht wird.

dem Experten für die Methode (Interviewer) auf die Methodenanfänger (Interviewten) adressiert. Hierzu werden die Interviewteilnehmer zum einen konkret gefragt, ob die Anwendung der Methode mit dem Softwareprototyp derart umgesetzt ist, dass sie sich nach entsprechenden Schulungseinheiten eine selbständige Anwendung des Werkzeuges für neue Anfrageprojekte vorstellen können. Zusätzlich werden in diesem Zusammenhang zwei Unterfragen diskutiert, inwieweit die Vorgehensweise durch die Ausweitung des Softwareprototyps auf ein unternehmensweit einsetzbares Entwicklungswerkzeug überarbeitet werden sollte und welche bereits realisierten Teilaspekte des Prototyps beibehalten werden können. Der Frage hinsichtlich der grundsätzlichen Anwendbarkeit der Methode wird dabei durchgängig zugestimmt. Das primäre Interesse liegt aus Sicht des Unternehmens jedoch, neben der generellen Anwendbarkeit, darin, ob die Experten die Methode für Anfragephasen von neuen Projekten auch einsetzen können. Einen Einsatz der Methode können sich fünf der sieben Konstrukteure auf Grundlage einer ausgereiften Entwicklungssoftware gut vorstellen, wohingegen zwei der Befragten sich eher gegen eine Anwendung der Methode im Rahmen der Konzeptentwicklung in der Anfragephase aussprechen.⁷³⁶ In diesem Zusammenhang sind nachfolgend die möglichen Risiken zusammengefasst, die nach Aussage der Experten bei der Anwendung der Methode zur Variantenauswahl in der Anfragephase in Betracht zu ziehen sind.

Risiken der Methodenanwendung

Bei der Diskussion der Methode wird als eines der Hauptrisiken genannt, dass die Bewertung auf Grundlage von Lösungen aus einem bestehenden Baukasten immer einen Blick in die Vergangenheit darstellt und es hierbei die Bedenken gibt, den Anschluss an neue Technologien zu verlieren. Dies bedingt die Notwendigkeit, die Baukastenentwicklung als kontinuierliche Aktivität im Sinne des iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell zu verstehen, die parallel zur Entwicklung von Produkten erfolgt.⁷³⁷ Folglich muss der Baukasten methodenbedingt, entsprechend einer Vielzahl anderer im Unternehmen eingesetzter datenbankbasierter Entwicklungstools, einer ständigen Pflege und Erweiterung unterliegen. Bei der Anpassung des Baukasteninhaltes an aktuelle Entwicklungstrends im Hinblick auf das Design von Bauteilen und der gegebenenfalls dafür erforderlichen, neuen Herstelltechnologien, muss entschieden werden, welche Inhalte auf Grundlage kundenorientierter, unternehmensstrategischer und produktspezifischer Aspekte aufgenommen werden sollen.⁷³⁸ Hierzu gibt es unter den befragten Experten zwei grundlegende Meinungen. Zum einen wird sich

⁷³⁶ Quantitative Bewertungsergebnisse in Abbildung 11-24 im Anhang in Kapitel 11.4.2

⁷³⁷ vgl. Verständnis der Baukastenentwicklung in der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung, Kapitel 2.2.3 (S. 81 f.)

⁷³⁸ vgl. Kapitel 6.3.4 auf S. 216

für eine Aufnahme derjenigen Bauteile ausgesprochen, die in der Ablage des Datenmanagementsystems mit dem Status „Produktion freigegeben“ abgelegt sind. Damit ist gewährleistet, dass die Bauteile und Komponenten in einem vorhergehenden Kundenprojekt oder auch einem internen Entwicklungsprojekt tatsächlich hergestellt worden sind und demzufolge das nötige Know-how im Unternehmen für eine Serienfertigung der Teile vorhanden ist. Auf der anderen Seite gibt es auch die Auffassung, dass für eine schnellere Reaktion auf die Erfordernisse des Marktes Ergebnisse aus Vorentwicklungsprojekten früher mit in die Variantenauswahl einbezogen werden sollten. Daneben ist das generelle Risikopotential durch die Interpretation der variantenspezifischen Kennwerte zur Variantenauswahl durch den Methodenanwender zu berücksichtigen. Zusätzlich müssen aber auch die methodenbasierten Empfehlungen stets kritisch hinterfragt werden, da durch die kontinuierliche Anpassung und Verbesserung durchaus Inkonsistenzen im Regelwerk denkbar sind. Um diese erkennen zu können sind zusätzliche Plausibilitätschecks zu integrieren. In den Gesprächen wird daran anknüpfend hervorgehoben, dass es sich bei einem derartigen Entwicklungswerkzeug um ein Expertensystem handelt, das nur von Mitarbeitern der Konstruktion angewendet werden sollte. Dabei müssen die toolbasierten Empfehlungen mit dem involvierten Entwicklungsteam diskutiert und kritisch hinterfragt werden, bevor die Entscheidung für eine oder mehrere Angebotsvarianten gefällt wird.

Neben den Risiken sind die nachfolgende Anpassungen und Erweiterungen am aktuellen Softwareprototyp mit Blick auf ein zukünftiges, unternehmensweit einsetzbares Entwicklungswerkzeug diskutiert worden.

Erweiterungen und Anmerkungen zur derzeitigen Softwareanwendung

Im Rahmen der Diskussionen zum aktuellen Inhalt und Funktionsumfang der Softwareanwendung ist die Anforderung geäußert worden, die Variantenauswahl nach Möglichkeit noch stärker an den vorhandenen Herstellprozessen für gebaute Nockenwellen zu orientieren. Daran anknüpfend ist in der Diskussion angemerkt worden, dass durch werksabhängige Maschinenparks mit den korrespondierenden Herstellprozessabläufen sich auch werksabhängig, unterschiedliche Bewertungsergebnisse für das gemäß Zusammenbauzeichnung identische Produkt ergeben können. Bei der Erstellung des Softwareprototyps wird jedoch zunächst die Standardvorgehensweise zu Grunde gelegt. Damit haben aus Sicht der Softwareanwendung, und auch aus Sicht einiger produzierender Werke im Unternehmen, neue Produktanfragen den Status von Sonderprodukten, da die Herstellung nicht mit etablierten Prozessabläufen realisierbar ist.⁷³⁹ Deshalb ist es gängige Praxis, die angefragten Produkte gemäß deren Anforderungen an die Herstellung und die Liefermengen den

⁷³⁹ vgl. Erläuterungen zur Prinzipvariation (PS) in der Variantenentwicklung auf S. 182

entsprechenden Produktionsstandorten zuzuteilen. Daher sollte auch das Werkzeug für eine konkrete Anfrage anzeigen, dass das eingegebene Anforderungsprofil aus Sicht des aktuellen Baukasteninhaltes eine Anfrage für eine Sondernockenwelle beschreibt und demzufolge zwar Lösungen abgeleitet werden können, diese aber bezogen auf die Kundenanfrage, funktionsfähige Kompromisslösungen darstellen.

Zur Beschreibung des im vorhergehenden Abschnitts diskutierten Sachverhaltes und des mehrfach angemerkten Bedarfes seitens der Interviewpartner, die Verwendbarkeit von Gleichteilen zu prüfen, wird die Beschreibung der gültigen Varianten durch die Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung zur Entscheidungsunterstützung im Nachgang an die Interview-Studie hinzugefügt. Die Entscheidungsunterstützung durch die Variationsanteile der PGE wurde im Anschluss an die Interview-Studie entwickelt und war demnach nicht mehr Inhalt der Expertenbeurteilung in den Interviews.⁷⁴⁰ Das Potential der kennwertbasierten Entscheidungsunterstützung konnte aber durch retrospektive Methodenapplication anhand zweier abgeschlossener Anfrageprojekte evaluiert werden.⁷⁴¹

Im dritten Teil des Interviews wurden die Teilnehmer nach ihrer konkreten Einschätzung hinsichtlich des Methodenpotentials gefragt (FF3.2). Hierzu wird zunächst erörtert, inwieweit die Methode im Rahmen der vorgestellten Softwareanwendung den angedachten Nutzen zur Unterstützung der Variantenauswahl in der Angebotsphase abdeckt. Das Bewertungsergebnis hierzu zeigt Abbildung 8-2.

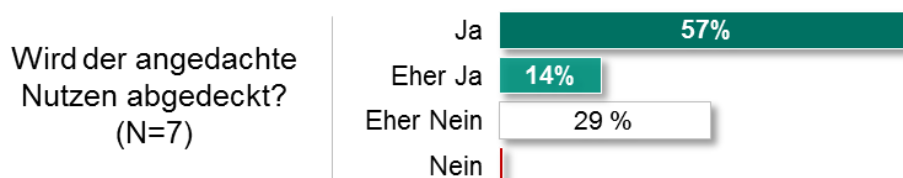


Abbildung 8-2: Bewertungsergebnis zur Einschätzung des angedachten Methodennutzens

Demzufolge wird mehrheitlich die Auffassung vertreten, dass mit der Methode auf Grundlage einer zukünftigen, ausgereiften Softwareanwendung die Variantenauswahl im Rahmen der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase unterstützt werden kann. Diejenigen, die auf die Frage gemäß Abbildung 8-2 mit nein geantwortet haben, sehen den Nutzen der Methode in der Anwendung für andere Produkte und unter anderen Randbedingungen. Einerseits wurde der Nutzen der Methode eher in der Anwendung zur fallspezifischen Auswahl komplexerer Einzelteile, wie beispielsweise der Auswahl von Nockenwellenantriebselementen, gesehen. Dies wird damit begründet, dass bereits viele kundenseitige Vorgaben und Randbedingungen einzuhal-

⁷⁴⁰ vgl. Kapitel 4.2 – Forschungsvorgehen

⁷⁴¹ vgl. Kapitel 8.2 – Evaluation der Methode am Praxisbeispiel

ten sind, wodurch der Lösungsraum für mögliche Kombinationen starken Einschränkungen unterliegt. Die Stärke der Methode wird hier eher in der Detailanalyse von einzelnen Baukastenelementen hinsichtlich der kunden- und anbieterseitigen Eignung für die konkrete Anfrage gesehen, und weniger in der bedingten Kombinatorik von bestehenden Elementen. Demgegenüber wird die gegensätzliche Meinung geäußert, dass zwar der Nutzen mit der Höhe der konstruktiven Freiheitsgrade steigt, jedoch die Stärke nicht in der Detailkonstruktion, sondern vielmehr in der Analyse weit komplexerer Bauteile als Nockenwellensystembaugruppen zu sehen ist. Generell kann hierzu angemerkt werden, dass die Methode grundsätzlich gleichermaßen zur Kombination von Konstruktionselementen für einzelne Bauteile sowie, durch entsprechende Erweiterungen, auch zur Analyse sehr großer Baugruppen eingesetzt werden kann. Der Einsatz von gebauten Nockenwellen als Leitbeispiel befindet sich etwa in der Mitte der beiden zuvor beschriebenen Extreme und eignete sich daher als Referenzbeispiel und Diskussionsgrundlage im Rahmen der Interview-Studie.⁷⁴²

Im Anschluss an die Diskussion inwieweit der angedachte Nutzen für die Variantenauswahl mit der vorgestellten Methode abgedeckt wird, folgt der abschließende Fragenblock zum Methodenpotential (FF3.2). Hierzu wird die Einschätzung zum generellen Potential der Methode hinsichtlich eines Praxiseinsatzes zusätzlich in Teilfragen aufgeteilt, um neben dem Nutzen auch eine Abschätzung des Aufwandes für die Anwendung und Pflege aus Expertensicht mit in Betracht zu ziehen. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 8-3 zusammengestellt.

Wie schätzen Sie das Potential der Methode ein hinsichtlich (N=7) ...

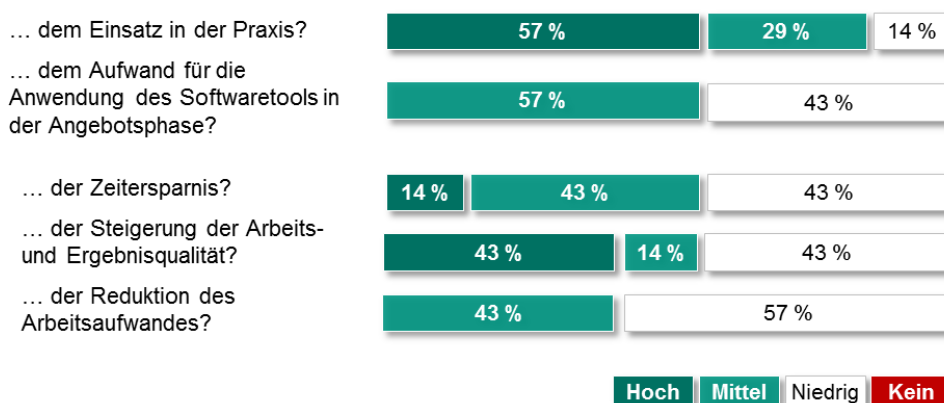


Abbildung 8-3: Bewertungsergebnisse der semistrukturierten Interview-Studie mit Mitarbeitern aus der Konstruktion für Nockenellensysteme⁷⁴³

Entsprechend Abbildung 8-3 wird das generelle Potential für einen Praxiseinsatz der Methode von den Experten mit mittel bis hoch bewertet und der Aufwand für die An-

⁷⁴² vgl. Abbildung 5-1 auf S.139

⁷⁴³ Erweiterte Ergebnisdarstellung in Anlehnung an Albers, Walch & Bursac 2016

wendung im Rahmen der Angebotsphase mit niedrig bis mittel. Die Zeitersparnis und die Steigerung der Arbeits- und Ergebnisqualität durch die Methodenanwendung bewertet die Mehrheit der Experten mit mittel bis hoch. Demgegenüber sehen die befragten Konstrukteure eine mittlere bis niedrige Reduktion des Arbeitsaufwandes. Eine mittlere bis hohe Zeitersparnis wird nach Auffassung der Mehrheit der befragten Experten erst dann erreicht, wenn es gelingt, die Methode in bestehende Entwicklungsabläufe zu integrieren. Die Ermittlung und entsprechende Eingabe des Modellparametersatzes sowie der kundenseitigen Anforderungen in die Datenbank, könnte beispielsweise im Rahmen von Design-Kick-off-Meetings zusammen mit dem Projektteam getätigt werden. In diesem Kontext wird auch eine Einbindung der Methode in Rahmen der Machbarkeitsanalyse gesehen. Die Einbindung des Entwicklungsteams bei der Vorbereitung der Variantenauswahl reduziert in diesem Zusammenhang den Arbeitsaufwand, da die Besprechungsergebnisse zur Detailuntersuchung der vorliegenden Kundendaten im Rahmen eines Design-Kick-off-Meetings direkt in der Datenbank der Softwareanwendung zur Variantenauswahl dokumentiert werden können. Damit reduziert sich gerade auch aus Sicht der Methodenanwender der Arbeitsaufwand, da die Diskussionsergebnisse zur konstruktiven und produktionstechnischen Umsetzung der kunden- und anbieterseitigen Anforderungen mit den entsprechenden geometrie-, funktions- und prozessbestimmenden Parametern nicht erst im Nachgang zusätzlich zu den bisherigen Konstruktionsaktivitäten in die Datenbank eingepflegt werden müssen. Denn nach Einschätzung der Experten macht die Aktivität der Erfassung der relevanten Parameter zur Beschreibung des Anforderungsprofils den größten Aufwand bei der Methodenanwendung aus. Die Unterstützung bei dieser Tätigkeit durch das Entwicklungsteam reduziert zudem die Unsicherheit durch die gemeinsame Diskussion der relevanten, zu berücksichtigenden Parameter. Eine hohe Parametrisierung kann aus Sicht von erfahrenen Mitarbeitern die tägliche Arbeit erleichtern, da sie wissen, wofür die Parameter gebraucht werden und wie sie mit anderen Parametern in Beziehung stehen. Für neue Mitarbeiter kann es dahingehend hilfreich sein, da durch das in der Methode abgebildete, produktspezifische Wissen die Fehlerquote sinken kann, da gerade in den Parametermodellen sehr viel Firmen-Knowhow implementiert ist. Das darf jedoch nicht dazu führen, dass sich gerade neuere Mitarbeiter blind auf die methodenbasierten Variantenempfehlungen verlassen. Bei der Methodenanwendung ist es entscheidend, die Ergebnisse kritisch zu hinterfragen, um den Transfer von Methoden-Know-how und dem Wissens erfahrener Methodenanwender auf neue auf Mitarbeiter zu realisieren.

Gewährleistung der Nutzbarkeit der Methode

Der im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Methodentransfer zur Sicherung des firmeninternen Know-hows bildet aus Sicht des Unternehmens einen wichtigen Kern-

baustein zur Gewährleistung der Methodennutzbarkeit. Die Methode muss in diesem Kontext derart konzipiert sein, dass sie durch die adressierten Zielgruppenkonstrukteure angewendet werden kann und nicht nur von wenigen Methodenexperten. Wohlgleich macht es aber aus Unternehmenssicht Sinn, die Pflege und die Aufrechterhaltung der Aktualität des Baukastens zentral an einer Stelle durch sogenannte „Methoden-Key-User“ zu organisieren. Damit wird gerade bei weltweit agierenden Unternehmen sichergestellt, dass die global verteilten Konstruktionsabteilungen unternehmensweit auf das gleiche Softwarepaket zur Variantenauswahl in der Anfragephase zugreifen. Dies setzt Schulungsaktivitäten voraus, die beim Einstieg in die Methodenanwendung sowie bei entsprechenden Änderungen und Neuerungen an der Methode kontinuierlich angeboten werden müssen. Einige weitere wichtige Punkte zur Gewährleistung der Nutzbarkeit aus Sicht des Unternehmens wurden bereits im Rahmen der Erläuterungen zum entstehenden Aufwand hervorgehoben, der beim Übergang von dem Softwareprototyp in dieser Arbeit auf ein unternehmensweit einsetzbares Entwicklungswerkzeug zur Variantenauswahl zu berücksichtigen sind.⁷⁴⁴ Hierbei standen der erforderliche Funktionsumfang und die Anzahl der zu kombinierenden Elemente sowie die nötigen Anpassungen am Softwareprototyp zur Darstellung der Integrierbarkeit in die bestehende Softwarelandschaft im Fokus. Neben der Integrierbarkeit der Software muss aber auch die durch die Anwendung operationalisierte Methode in die bestehenden Entwicklungsabläufe in der Konzeptentwicklung integrierbar sein. Hierzu merken die Teilnehmer der Interview-Studie eine sehr gute Integrierbarkeit im Rahmen eines Design-Kickoff-Meetings und bei der Durchführung der Produktmachbarkeitsanalyse an. Die Integration der Methode in bestehende Entwicklungsabläufe kristallisiert sich auf Basis der Diskussionen in den Mitarbeiterinterviews als einer der Haupteinflussfaktoren auf die Methodenakzeptanz heraus.⁷⁴⁵

Nach Aussage der Befragten darf die Anwendung der Methoden im Vergleich zur bisherigen Vorgehensweise nicht zu einem Mehraufwand führen. Aus diesem Grund muss die zuvor beschriebene Arbeitserleichterung bei der Methodenanwendung durch die Erfassung der relevanten Daten während eines Design-Kick-off-Meetings zur Steigerung der Akzeptanz in die bestehenden Abläufe zur Konzeptentwicklung in der Angebotsphase integriert werden. Positive Auswirkungen auf die Akzeptanz hat des Weiteren die CAD-basierte Ermittlung emergenter Bewertungszielgrößen, da hierfür CAD-Modelle der abgeleiteten Varianten erforderlich werden. Diese stehen damit bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt zur Verfügung und erleichtern durch die visuellen Repräsentationen der potentiellen Lösungen die unternehmensinternen und

⁷⁴⁴ vgl. Kapitel 7.2 – Mehraufwand für ein unternehmensweit einsetzbares Tool

⁷⁴⁵ vgl. Abbildung 11-24 im Anhang zu Kapitel 8 sowie Ergebnisse aus der Fragebogen-Studie zur Akzeptanz und dem Potential der Methode gemäß Kapitel 5.1.3

kundenseitigen Abstimmungsgespräche. Zudem lassen sich auf Grundlage der CAD-Modelle direkt Simulationsmodelle, z.B. für FEM-Analysen, ableiten. Aus dem ersten Teil der Methodenevaluation im Kontext des fallgebenden Unternehmens ergab sich aus der semistrukturierten Interview-Studie ein überwiegend positives Feedback.

8.2 Evaluation des Methodenpotentials am Praxisbeispiel

Im Anschluss an die semistrukturierten Interviews wurde die Methode um die Entscheidungsunterstützung durch die Variationsteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS erweitert, da hiermit essentielle Anforderungen an eine Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl abgebildet werden können. In diesem Zusammenhang kann anhand der Übernahmevarianteanteile erkannt werden, ob eventuell Gleichteile verwendet werden können und wie hoch der verbleibende Anpassungsaufwand an den Schnittstellen (Konnektoren) bei Verwendung bestehender Referenzprodukte ist. Damit sind Rückschlüsse auf den variantenspezifischen Aufwand möglich. Über das Verhältnis aus Übernahme- zu Gestaltvarianteanteilen kann zudem auf das Risiko geschlossen werden, das bei der Wahl einer konkreten Variante aus Unternehmenssicht zu berücksichtigen ist.⁷⁴⁶

Die Evaluation der Methode wurde durch retrospektive Methodenanwendung auf zwei abgeschlossene Anfrageprojekte durchgeführt, um die in der Abbildung 8-4 in den Gesamtkontext eingeordneten Forschungsfrage 3.3 zu beantworten.

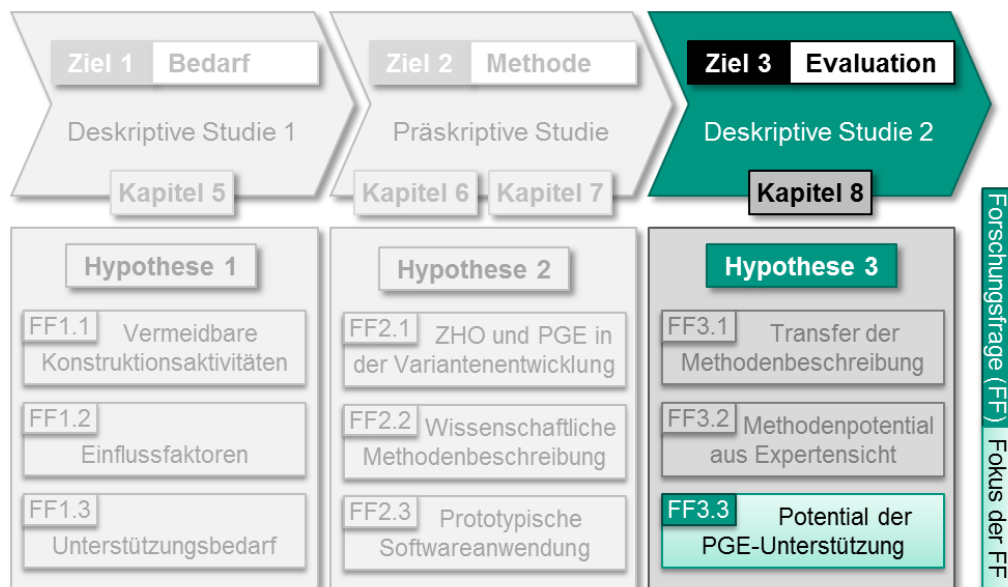


Abbildung 8-4: Einordnung der Forschungsfragen 3.3 zum zweiten Teil der Deskriptiven Studie 2 (retrospektive Methodenanwendung) in den Gesamtkontext des Forschungsvorhabens

⁷⁴⁶ vgl. Albers, Walch & Bursac 2016

Im ersten Anfrageprojekt wurden gebaute Nockenwellen für eine PKW- und im zweiten für eine NFZ-Anwendung angefragt. Da die dem Softwareprototyp zugrunde liegenden Basisdaten ausschließlich PKW-Nockenwellen enthalten, wurde anhand des PKW-Anfrageprojekts hinsichtlich der Potentialanalyse (FF3.3) im Speziellen die Eignung der definierten Kennwerte zur Entscheidungsunterstützung sowie die Möglichkeit einer quantitativen Abschätzung des Methodenpotential untersucht. Ergänzend wurden durch die Verwendung des PKW-Softwareprototyps für das NFZ-Projekt kennwertbasierte Schwellenwerte untersucht, die, basierend auf Bewertungsergebnissen in Form von Variantenrankings, Handlungsempfehlungen für die weitere Vorgehensweise geben.

8.2.1 Retrospektive Methodenanwendung für A-Projekt 1 (PKW)

Bei dem ersten Anwendungsbeispiel handelt es sich um eines der in Kapitel 5.2 untersuchten Anfrageprojekte.⁷⁴⁷ Bei diesem variantenreichen Projektverlauf wurde ein Satz gebauter Nockenwelle bestehend aus einer Einlass- und einer Auslassnockenwelle für eine PKW-Anwendung in einem 4-Zylinder-DOHC-Dieselmotor in verschiedenen Kundenvarianten angefragt. Das Projekt eignet sich für eine Anwendung der Methode sehr gut, da unter den 15 untersuchten Anfrageprojekten im A-Projekt 1 absolut gesehen die meisten Nockenwellenvarianten erstellt wurden. Hinter der für dieses Anfrageprojekt ermittelten Konstruktionsleistung⁷⁴⁸ verbergen sich die in der folgenden Abbildung 8-5 gezeigten Detailinformationen.

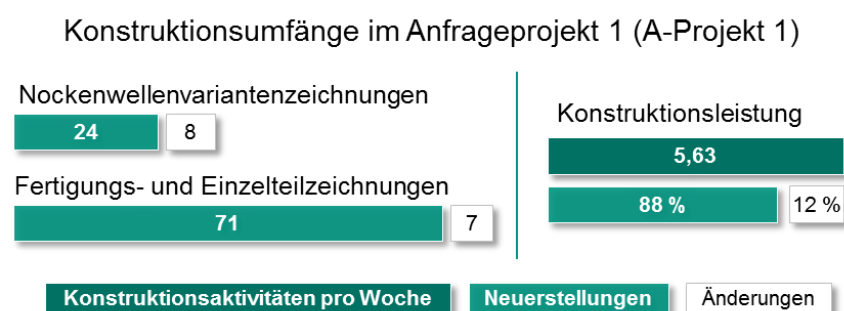


Abbildung 8-5: Anzahl neu erstellter und geänderter Zeichnungen (links) und Konstruktionsleistung in Konstruktionsaktivitäten pro Arbeitswoche (rechts) im Anfrageprojekt A-Projekt 1

Die Konstruktionsleistung von 5,63 Konstruktionsaktivitäten je Arbeitswoche teilt sich, wie rechts in Abbildung 8-5 dargestellt, in 88% neu erstellte Zeichnungen und Modelle und 12% Änderungsaktivitäten auf. In dem Neuerstellungsanteil sind 24 Nocken-

⁷⁴⁷ vgl. A-Projekt 1 in Abbildung 5-18 auf S.167

⁷⁴⁸ Die Konstruktionsleistung bezieht die Konstruktionsaktivitäten in Form von neu erstellten Modellen und Zeichnungen für den Zusammenbau, für Fertigungsstände, für Roh- und Fertigteile sowie deren Änderungen auf den Zeitraum für die Bearbeitung der Anfrage.

wellenvariantenzeichnungen und 71 Fertigungs- und Einzelteilzeichnungen enthalten. Dabei wurden innerhalb der neu erstellten Nockenwellenvarianten 8, und unter den Fertigungs- und Einzelteilzeichnungen 7 Änderungen vorgenommen.⁷⁴⁹

Verlauf der Anfragephase im Beispielprojekt A-Projekt 1

Die Anfragephase des Beispielprojektes untergliedert sich entsprechend der nachfolgenden Tabelle 8-1 in drei Anfragerunden.

Änderungen an Nockenwellenvariantenzeichnungen								
Anfragerunde		Nockenwellenvariantenzeichnungen						▼
▼		Variantenzähler		Variantenmotivation			▼	
▼		Hauptcharakteristika der Anfrage				▼		▼
		DRVE2	RBE	LFC	CABDY			
1	000	●	●	○	Ø25/Ø19	Kunde	2	0
	001	●	○	○	Ø25/Ø19	Intern	2	0
	002	●	●	●	Ø24/Ø18	Kunde	2	0
	003	●	●	○	Ø25/Ø19	Kunde	2	0
	004	●	●	○	Ø25/Ø19	Kunde	2	0
	005	●	○	○	Ø25/Ø19	Intern	2	0
	006	●	●	●	Ø24/Ø18	Intern	2	0
2	007	●	○	○	Ø23/Ø18	Kunde	2	2
	008	●	○	○	Ø23/Ø18	Intern	2	4
	009	●	●	●	Ø24/Ø18	Kunde	2	1
	010	●	●	●	Ø24/Ø18	Intern	2	0
3	011	●	○	○	Ø26/Ø21	Kunde	2	1

Legende

- Element enthalten
- Element nicht enthalten
- CABDY (Camshaft Body): Nockenwellenkörper
- RBE (Radial bearing Element): Radiallagerement
- LFC (Low Friction Camshaft): Nockenwelle mit Wälzlagern
- DRVE2 (Drive Element 2): Antriebelement 2 (z.B. Zahnrad)

Tabelle 8-1: Details zur Anfrage und den erzeugten Varianten im Beispielprojekt A-Projekt 1

Die Varianten 000 bis 011 unterscheiden sich durch die aufgeführten Hauptcharakteristika (● enthalten; ○ nicht enthalten). Unter den 24 Nockenwellen sind neben den geforderten Kundenvarianten auch zuliefererintern motivierte Varianten, die aus Zulfersicht die kunden- und anbieterseitig zielführenderen Lösungen darstellen.

In der ersten Anfragerunde sind gemäß Tabelle 8-1 unter den erstellten Varianten 000 bis 006 vier kundenmotivierte und drei unternehmensinterne Nockenwellenvarianten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für den 4-Zylinder-DOHC-Motor eine einlass- und eine auslassseitige Nockenwelle zur Steuerung der zwei Ein- und der zwei Auslassventile je Zylinder erforderlich sind. Vom Kunden werden dabei Varianten mit Lagerringen (RBE) für einen Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers von Ø25mm gefordert. Zusätzlich soll eine reibleistungsgesteigerte Variante (LFC) angeboten werden, bei der alle Radiallagerstellen durch Wälzlager zu ersetzen sind. Hierzu wird der Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers auf Ø24mm reduziert auf-

⁷⁴⁹ vgl. Abbildung 5-3: Motivation für eine neue Version oder eine neue Variante

grund des Platzbedarfs der Nadellager im Zylinderkopf. Nach der ersten Anfragerunde wird kundenseitig die LFC-Variante verworfen. Ebenso soll die Variante mit Gleitlagerringen (RBE) kundenseitig nicht weiter verfolgt werden.

Für die zweite Anfragerunde hat der Kunde seine Variante ohne Lagerringe mit einem Lagerdurchmesser von $\varnothing 25\text{mm}$ auf $\varnothing 23\text{mm}$ geändert. Anbieterseitig wird diese Kundenvariante zum einen zu 100% in der Variante 007 umgesetzt und eine weitere unternehmensintern motivierte, verbesserte Lösung 008 vorgeschlagen. Trotz der Kundenaussage, kein weiteres Interesse an einer reibleistungsreduzierten Lösung zu haben, wird eine in der ersten Anfragerunde zunächst nicht bearbeitete LFC-Kundenvariante in der zweiten Runde aufgegriffen, um am potentiellen Einsatz der LFC-Technologie für die vorliegende Anfrage festzuhalten. Für die abschließende dritte Anfragerunde wird der Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers nochmal von $\varnothing 23\text{mm}$ auf $\varnothing 26\text{mm}$ geändert.

In der dritten Anfragerunde wird die Kundevariante 011 realisiert, die fertig bearbeitete Nockenwellen mit einem Lagerdurchmesser von $\varnothing 26\text{mm}$ beinhaltet. Diese Nockenwellenausführung gilt ab diesem Zeitpunkt als gesetzt und sollte nach Kundenaussage keinen weiteren Änderungen mehr unterliegen. Bei der kundenseitigen Anfrage nach Kosteneinsparungen für halbfertige Nockenwellenvarianten, an denen der Kunde die Fertigbearbeitung selbst übernehmen möchte, wird aus unternehmensstrategischen Gründen das Anfrageprojekt anbieterseitig beendet.

Retrospektiver Methodeneinsatz für Anfragerunde 1

Wie in der Tabelle 8-1 aufgeführt unterscheiden sich die erzeugten Varianten in drei Hauptcharakteristika und zwar dem Vorhandensein von Lagerelementen (RBE) in Form von Gleitlagerringen (1) oder in Form von Wälzlagern (2) zur Reibleistungsreduzierung (LFC) sowie dem Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers (3).

In der ersten Anfragerunde sind gemäß Tabelle 8-1 Varianten mit und ohne Lagerringen für einen Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers von $\varnothing 25\text{mm}$ sowie eine reibleistungsgesteigerte LFC-Variante generiert worden. Aufgrund der Bauverhältnisse im Zylinderkopf wird der Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers wegen dem Platzbedarf für die Nadellager auf einen Durchmesser von maximal $\varnothing 24\text{mm}$ begrenzt. Lediglich im Bereich des Axiallagers ist im Zylinderkopf ausreichend Bauraum vorhanden, um beispielsweise ein Rillenkugellager mit einem größeren Außendurchmesser zur Übertragung der axialen und radialen Lagerkräfte einsetzen zu können. Da die Nicht-LFC-Kundenvarianten, die für einen Außendurchmesser von $\varnothing 25\text{mm}$ angefragt sind, auch mit einem Durchmesser von $\varnothing 24\text{mm}$ dargestellt werden können, bietet sich als erster Ansatz zunächst der methodengestütz-

te Vergleich der Kundenvarianten für den Außendurchmesser von Ø24mm an. Die Tabelle 8-2 zeigt die hierzu definierten drei Datenbankabfragen 14, 15 und 16.

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; transform: rotate(-45deg); font-size: 8px;">Datenbankabfrage</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; transform: rotate(-45deg); font-size: 8px;">Hauptcharakteristika der Datenbankabfrage</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; transform: rotate(-45deg); font-size: 8px;">Verbleibende Elementtypen-Kombinationen nach Auswahlregeln</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; transform: rotate(-45deg); font-size: 8px;">Optimierregel</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; transform: rotate(-45deg); font-size: 8px;">Elementtypenkombinationen nach Ausschlussregeln und Optimierregel</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; transform: rotate(-45deg); font-size: 8px;">Anzahl der Nockenwellenvarianten (Stücklisten) nach Assemblierung</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; transform: rotate(-45deg); font-size: 8px;">Anzahl der Varianten nach Berücksichtigung geforderter Produkteigenschaften</div> </div>					
vgl. Abbildung 7-1 ▶		D1	G	D1 und G	H1	H2	
14	DRVE2	7.168	Standard	10	723	6	Legende CABDY (Camshaft Body) → Nockenwellenkörper RBE (Radial bearing Element) → Radiallagerelement LFC (Low Friction Camshaft) → Nockenwelle mit Wälzlagern DRVE2 (Drive Element 2) → Antriebselement 2
	RBE		Integral	4	129	0	
	CABDY Ø24/Ø18		Modular	1	120	0	
15	DRVE2	10.180	Standard	10	241	6	
	ohne RBE		Integral	4	43	0	
	CABDY Ø24/Ø18		Modular	1	40	0	
16	DRVE2	3.584	Standard	16	2.031	10	
	LFC		Integral	4	258	0	
	CABDY Ø24/Ø18		Modular	3	420	0	

Tabelle 8-2: Ergebnisse der Datenbankabfragen auf Basis des Softwareprototyps für drei Abfrageszenarien für Ø24mm und Wandstärke 3mm des Nockenwellenkörpers

Die Tabelle 8-2 zeigt die Abfrageergebnisse der für die Angebotsrunde 1 definierten drei Datenbankabfrageszenarien 14, 15 und 16.⁷⁵⁰ Neben der Berücksichtigung der übergeordneten Unterscheidungskriterien in der zweiten Spalte in Tabelle 8-2 sollen darüber hinaus alle Kundenvarianten über ein Signalgeberelement verfügen und für einen Rollenabgriff am Ventilonocken geeignet sein. Die Modellparameter, wie der Außen- und Innendurchmesser des Nockenwellenkörpers (Ø24/Ø18 in Tabelle 8-2), haben in diesem Zusammenhang auf die Anzahl an abgeleiteten, gültigen Varianten zunächst keinen Einfluss. Die Parameter werden aber bei der Assemblierung⁷⁵¹ (H1) fest mit den Datensätzen der Nockenwellenvarianten (Stücklisten) verknüpft und an das CAD-System zum Aufbau und zur Anpassung der CAD-Variantenmodelle übertragen. Auf diese Weise beeinflussen die Modellparameter die geometriegebundenen, emergenten Bewertungszielgrößen und damit die FIT-Bewertungen der Varianten auf Grundlage der im Rahmen der 2. Iteration ermittelten Bewertungsergebnisse. Bevor jedoch die Datensätze an das CAD-System übertragen werden, müssen die assemblierten Nockenwellen zunächst noch bzgl. der Erfüllung der geforderten, aktiven Produkteigenschaften untersucht werden (H2). Die verbleibenden Datensätzen

⁷⁵⁰ Zur Orientierung an den mit Hilfe der Benutzeroberfläche des Softwareprototyps zur Variantenableitung (1. Iteration) ausgelösten Aktionen, sind die Positionsangaben entsprechend Abbildung 7-2 auf S. 232 mit aufgeführt.

⁷⁵¹ Der Begriff „Assemblierung“ wird im Kontext dieser Arbeit auf S. 206 eingeführt.

werden dann noch um die Intervallforderungen für die emergenten Bewertungszielgrößen ergänzt, die für die Variantenbewertung (2. Iteration) benötigt werden.⁷⁵²

Entsprechend Tabelle 8-2 sucht Abfrage 14 nach Lösungen mit Radiallagererelementen und Abfrage 15 nach Nockenwellenvarianten ohne Radiallagererelemente (RBE). Mit der Abfrage 16 werden hingegen gebaute Nockenwellen mit Radiallagererelementen für eine LFC-Anwendung auf Grundlage des aktuellen Baukasteninhaltes abgeleitet. Das Abfrageergebnis nach Anwendung der Auswahlregeln zeigt die dritte Spalte (D1). Die aktuell gültigen Elementtypenkombinationen werden hiernach durch Ausschlussregeln und der Wahl einer Optimierregel weiter reduziert (D1 und G). Die verbliebenen Elementtypenkombinationen bilden die Ausgangsmenge zur Assemblierung der Nockenwellenvarianten, indem die Elementtypen durch Teilenummern von korrespondierenden CAD-Modelle ersetzt werden.⁷⁵³ Damit vervielfacht sich die Anzahl an gültigen Datensätzen (H1). Diese werden jedoch durch die Anwendung weiterer Ausschlussregeln zur Berücksichtigung geforderter Produkteigenschaften wieder reduziert (H2). Die letzte Spalte in Tabelle 8-2 zeigt, dass sich in keinem der drei Abfrageszenarien abschließend modulare oder integrale Optima auf Grundlage des aktuellen Baukasteninhaltes ergeben. Begründet werden kann das damit, dass die datenbankinterne Wissensbasis zwar alle erforderlichen Beschreibungen der Elementtypen zur Abbildung der 42 Basisnockenwellen⁷⁵⁴ enthält, aber nicht alle korrespondierenden Objekte in Form von CAD-Modellen im Baukasten des Softwareprototyps verfügbar sind. Modelltechnisch sind für den Softwareprototyp die CAD-Modelle von neun Referenznockenwellen aus den 42 Basisnockenwellen sowie weitere 50 Einzelteilmodelle umgesetzt worden.⁷⁵⁵

Methodenbasierte Bewertungsergebnisse zu den Abfragen 14, 15 und 16

Die verbleibenden Datensätze zu den Abfragen 14, 15 und 16 gemäß Tabelle 8-2 werden mit dem Softwareprototyp weiterverarbeitet, um die CAD-Modelle aufzubauen und die emergenten, geometriegebundenen Bewertungszielgrößen durch Explizieren in das Zielsystem für die Variantenbewertungen in der 2. Iteration verfügbar zu machen.⁷⁵⁶ Im Folgenden wird die Variantenauswahl für die drei Abfragen 14, 15 und 16 auf Grundlage der Entscheidungsunterstützung durch die generierten Varianten-

⁷⁵² Auszugsweise sind für die Abfrage 16 die ein- und ausgeschlossenen Elementtypen sowie die funktions- und anwendungsbezogenen Eigenschaften in Abbildung 11-25 und die relevanten Modellparameter, die aktiven Produkteigenschaften und die Intervallforderungen für die emergenten Bewertungszielgrößen in Abbildung 11-26 im Anhang zu diesem Kapitel dargestellt. Für die Abfragen 14 und 15 wurden entsprechend abgeänderte Datensätze verwendet.

⁷⁵³ vgl. Beschreibung der Baukastenelemente gemäß Abbildung 6-12 auf S.196

⁷⁵⁴ vgl. Definition der relevanten, zu kombinierenden Elementtypen in Kapitel 6.3.1

⁷⁵⁵ vgl. Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 zum Mehraufwand für ein unternehmensweit einsetzbares Tool

⁷⁵⁶ vgl. Kapitel 6.4 (Entscheidungsunterstützungssystem VDSS) und Kapitel 7.1 (Softwareprototyp)

rankings erläutert.⁷⁵⁷ Die favorisierten Varianten aus den drei Abfragen werden im Anschluss in einem Variantenranking entsprechend Tabelle 8-3 gegenübergestellt.⁷⁵⁸

Abfrage 14 mit Gleitlagerringen (Anfragerunde 1)

Für die entsprechend Tabelle 8-2 nach der Standardoptimierung verbleibenden sechs Variantendatensätze werden auf Grundlage der Ausführungen in Kapitel 7.1 mit Hilfe des Softwareprototyps die korrespondierenden CAD-Variantenmodelle aufgebaut, die geometriegebundenen Bewertungszielgrößen (Bauteilmassen, Steifigkeiten, etc.) ermittelt und in das Zielsystem expliziert. Das Variantenranking zur Abfrage 14 zeigt auf Basis der FIT-Bedingungen vier gültige und zwei ungültige Varianten, die das geforderte Mindestantriebsmoment zwischen Nockenwellenkörper und Antriebselement (Zahnrad) nicht übertragen können.⁷⁵⁹ Die erstplatzierte Variante erreichte einen BEST-FIT-Wert (BF) von 73,17%, die zweitplatzierte 69,07%, die drittplatzierte 63,58% und die vierplatzierte Nockenwellenvariante noch 59,47%. Dabei erreicht die dritte Variante mit 3,71 das höchste Verhältnis von Übernahmevariations- zu Gestaltvariationsanteil (ÜS/GS). Zudem kann bei dieser Variante auf ein Gleichteil zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund werden für die weiteren Vergleichsuntersuchungen die erst- und zweitplatzierte sowie die drittplatzierte Variante berücksichtigt und in die Gegenüberstellung in Tabelle 8-3 übernommen.

Abfrage 15 ohne Gleitlagerringe (Anfragerunde 1)

Das Variantenranking für die Abfrage 15 empfiehlt die Variantenauswahl aus vier gültigen Varianten.⁷⁶⁰ Dabei erzielte die erstplatzierte Variante einen BEST-FIT-Wert (BF) von 83,03%, die zweite 82,57%, die dritte 79,46% und die vierplatzierte Nockenwellenvariante 78,77%. Die beiden auf Grundlage der FIT-Bedingungen als ungültig deklarierten Varianten, können das geforderte Mindestmoment am Antrieb nicht übertragen. Die Variante auf Platz 1 entspricht mit Ausnahme des Signalgeberelements (TGE) der Variante auf Platz 3. Dieser Sachverhalt trifft gleichermaßen auch auf die beiden Variantenempfehlungen auf den Plätzen 2 und 4 zu. Da im Vergleich dieser beiden Paarungen die Verhältnisse von Übernahmevariation zu Gestaltvariation bei den Nockenwellenvarianten auf den Plätzen 1 (ÜS/GS = 3,23) und 2 (ÜS/GS = 4,30) deutlich höher liegen als die der Plätze 3 (ÜS/GS = 2,44) und 4 (ÜS/GS = 3,08), werden die beiden erstplatzieren Lösungsempfehlungen in die Gegenüberstellung in Tabelle 8-3 übernommen.

⁷⁵⁷ vgl. Abbildung 7-4 auf S. 235

⁷⁵⁸ Tabelle 8-3 in diesem Kapitel fasst die favorisierte Varianten aus den Variantenrankings im Anhang zu Kapitel 8 aus Tabelle 11-15 (Abfrage 14 und 15) und Tabelle 11-16 (Abfrage 16) zusammen.

⁷⁵⁹ vgl. links in Tabelle 11-15 im Anhang zu Kapitel 8

⁷⁶⁰ vgl. rechts in Tabelle 11-15 im Anhang zu Kapitel 8
















Nr.	Abf.	Benennung	CAD-Modell	Ranking										PCE - Produktgenerationsentwicklung				Gleichanteil		
				FIT	BF	NF	HPL	Total	Rang	δGV(lmt)	δGV(Con)	δGV	δÜV	δÜV(V≠0)	Üs/GS	δÜV(V=0)	T	GT		
2	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		YES	83,03% FIT		13,13%	69,91% 	1	1,82%	21,82%	23,64%	76,36%	20,00%		3,23	56,36%	12	0	
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		YES	82,57% FIT		14,90%	67,67% 	2	0,00%	18,87%	18,87%	81,13%	20,75%		4,30	60,36%	12	0	
1	14	A-Projekt 1 - RBE D24		YES	73,17% FIT		21,74%	51,43% 	3	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	23,88%		2,94	50,75%	16	0	
4	14	A-Projekt 1 - RBE D24		YES	69,07% FIT		23,78%	45,29% 	4	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	22,39%		2,35	47,76%	16	0	
3	14	A-Projekt 1 - RBE D24		YES	63,58% FIT		26,17%	37,41% 	5	6,06%	15,15%	21,21%	78,79%	24,24%		3,71	54,55%	17	1	
2	16	A-Projekt 1 - LFC D24		YES	46,09% FIT		33,50%	12,59% 	6	6,06%	15,15%	21,21%	78,79%	31,82%		3,71	46,97%	17	0	

Tabelle 8-3: Variantenranking der favorisierten Nockenwellenvarianten aus den Abfragen 14 (mit RBE), 15 (ohne RBE) und 16 (LFC) bei konstantem Außendurchmesser von Ø24mm und konstanter Wandstärke von 3 mm des Nockenwellenkörpers

Abfrage 16 mit Nadellagern (Anfragerunde 1)

Bei der Bestimmung des Variantenranking für die zehn LFC-Varianten ergeben sich vier gültige und sechs ungültige Varianten, die wiederum aufgrund der Nichtdarstellbarkeit des geforderten Antriebsmomentes die FIT-Bedingung nicht erfüllen können.⁷⁶¹ Aufgrund der Kundenanforderung in Rahmen der Anfragerunde 1, alle Radiallagerstellen durch entsprechende Wälzlager zu ersetzen, kommen aus den gültigen vier Nockenwellen nur noch die Varianten auf den Plätzen 3 (BF = 46,09%) und 4 (BF = 42,02%) in Frage. Die Lösungen auf den Plätzen 1 (BF = 57,06%) und 2 (BF = 52,99%) schlagen einen Gleitlagerring mit beidseitigen Axiallagerschultern für radialen und axialen Gleitkontakt zum Zylinderkopf vor und kommen demzufolge nicht in Frage. Aufgrund des höheren Verhältnisse von Übernahmevariation zu Gestaltvariation der drittplatzierten Variante (ÜS/GS = 3,71) im Vergleich zur viertplatzierten Variante (ÜS/GS = 2,88) wird letztlich nur die Lösung auf Platz 3 in die Gegenüberstellung in Tabelle 8-3 mit aufgenommen. Durch den Einsatz von Nadellagern ergeben sich im Vergleich zu den Abfragen 14 und 15 niedrigere FIT-Werte. Dies liegt unter anderem an dem Einfluss der Wälzlager auf die Masse, die Oberfläche und damit die technische Sauberkeit sowie die Kosteneinflussfaktoren.

Durchmesservariation (Anfragerunde 1)

Die Kundenvarianten mit und ohne Lageringe werden im Rahmen der ersten Anfragerunde für einen Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers von Ø25mm angefragt. Demzufolge wird im nächsten Schritt auf Basis der Gegenüberstellung der favorisierten Varianten für den Durchmesser Ø24mm aus Tabelle 8-3 das Variantenranking gemäß Tabelle 8-4 für den Durchmesser Ø25mm ermittelt. Die LFC-Variante konnte hierbei aus genannten Bauraumgründen nicht berücksichtigt werden.

Die Durchmesservariation hat dabei keinen Einfluss auf die Reihenfolge der Platzierungen und führt nur zu einer geringfügigen Anpassung der FIT-Werte. Dabei bleiben die beiden Varianten ohne Radiallagerelemente (Platz 1: BF = 82,55%; Platz 2: BF = 82,02%) deutlich vor der drittplatzierten Variante (BF = 72,65%). Aus diesem Grund fällt aktuell die Empfehlung auf eine Lösung ohne Radiallagerelemente. Da aber kundenseitig weitere Anfragerunden angekündigt sind, wird in Vorleistung gegangen und die beiden favorisierten Lösungen auf den Plätzen 1 und 2 zusätzlich für die Durchmesser Ø23mm und Ø26mm bewertet. Die Tabelle 8-4 wird damit um vier weitere Durchmesservarianten ergänzt. Hieraus resultiert, dass mit den vier zusätzlichen Varianten die geforderten Verdrehmomente zwischen Ventillocken und Nockenwellenkörper ohne Zusatzmaßnahmen nicht dargestellt werden können.

⁷⁶¹ vgl. Tabelle 8-2 in diesem Kapitel sowie Tabelle 11-16 im Anhang zu Kapitel 8







Nr.	Abf.	Benennung	CAD-Modell	Ranking				PGE - Produktgenerationsentwicklung						Gleichanteil			
				FIT	BF	NF	HPL	Rang	δGV(lmt)	δGV(Con)	δGV	δÜV	δÜV(V≠0)	ÜS/GS	δÜV(V=0)	T	GT
2	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D25		YES	82,55%	FIT	13,41%	★1	1,82%	21,82%	23,64%	76,36%	38,18%	★3,23	38,18%	12	0
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D25		YES	82,02%	FIT	15,45%	★2	0,00%	16,98%	16,98%	83,02%	33,96%	★4,89	49,06%	12	2
1	14	A-Projekt 1 - RBE D25		YES	72,65%	FIT	22,49%	★3	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	35,82%	★2,94	38,81%	16	0
4	14	A-Projekt 1 - RBE D25		YES	68,65%	FIT	24,65%	★4	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	35,82%	★2,35	34,33%	16	0
3	14	A-Projekt 1 - RBE D25		YES	63,18%	FIT	27,23%	★5	6,06%	13,64%	19,70%	80,30%	31,82%	★4,08	48,48%	17	3
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D23		NO	0,00%	-0,20%	14,09%	★6	1,89%	18,87%	20,75%	79,25%	37,74%	★3,82	41,51%	12	0
2	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D23		NO	0,00%	-0,20%	14,76%	★7	3,64%	21,82%	25,45%	74,55%	38,18%	★2,93	36,36%	12	0
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D26		NO	0,00%	-2,63%	17,70%	★8	1,89%	18,87%	20,75%	79,25%	35,85%	★3,82	43,40%	12	1
2	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D26		NO	0,00%	-2,63%	17,92%	★9	3,64%	21,82%	25,45%	74,55%	36,36%	★2,93	38,18%	12	1

Tabelle 8-4: Variantenranking für die Durchmesservariation der favorisierten Varianten aus den Abfragen 14 und 15 für die Kundenvarianten mit und ohne Radiallagerelementen

Fazit zur Anfragerunde 1

Die Ergebnisdarstellung der Variantenbewertung durch die ermittelten Variantenrankings entsprechend Tabelle 8-3 ($\varnothing 24\text{mm}$) und Tabelle 8-4 ($\varnothing 23\text{mm}$, $\varnothing 25\text{mm}$ und $\varnothing 26\text{mm}$) sind derart zu interpretieren, dass die gleitgelagerten Nockenwellenvarianten ohne Radiallagerelemente denen mit Lagerelementen sowie den reibleistungsreduzierten Wälzlagerlösungen vorzuziehen sind. Da der Kunde aber auf ein Angebot für eine reibleistungsreduzierte Variante bestand, wären trotz methodischer Unterstützung die LFC-Kundenvarianten, als auch die internen LFC-Varianten, nicht zu verhindern gewesen, zumal auch unternehmensstrategische Gründe zu diesem Zeitpunkt für das Vorantreiben der LFC-Technologie im Rahmen dieses Kundenprojekts sprachen. Bei den gleitgelagerten Lösungen wurden in der Anfragerunde 1 für die Lösungen mit Gleitlagerringen nur die Kundenvarianten angeboten und keine Konstruktionskapazitäten zur Erstellung von unternehmensinternen Lösungen betrieben. Diese Kapazitäten wurden dazu genutzt, intern getriebene Varianten ohne Radiallagerelemente zu erstellen, für die keine expliziten Kundenvarianten vorlagen. Diese Nockenwellenausführungen wurden aber zum Zeitpunkt der Anfragerunde 1 bereits als die zu favorisierenden Lösungen erkannt. Dies empfehlen auch die methodenbasierten Variantenbewertungen entsprechend Tabelle 8-3 und Tabelle 8-4, da die Lösungen ohne Radiallagerelemente als deutlich geeigneter gegenüber den Varianten mit Radiallagerelementen bewertet werden. Wirft man einen Blick auf die Anfragerunden 2 und 3 so ist zu sehen, dass der Kunde beim Übergang in die Anfragerunde 2 die Nockenwellenvarianten mit Radiallagerelementen nicht weiterverfolgt hatte. Interne Abstimmungen im Rahmen des Entwicklungsteams sowie Diskussionen mit dem Kunden auf Grundlage der Entscheidungsunterstützung zur Variantenauswahl hätten damit mit sehr großer Wahrscheinlichkeit dazu geführt, dass der toolbasierte Aufbau der CAD-Modelle der Kundenvarianten mit Radiallagerelementen die Kundenentscheidung gegen diese Nockenwellenausführungen bereits innerhalb der Anfragerunde 1 herbeigeführt hätte und damit die Detailkonstruktionen zu den drei Kundenvarianten hätten vermieden werden können.

Retrospektiver Methodeneinsatz für Anfragerunde 2

Nach der ersten Anfragerunde werden kundenseitig die Varianten mit Gleitlagerringen und die LFC-Varianten verworfen. Die neue Kundenanfrage im Rahmen der Anfragerunde 2 beinhaltet demzufolge eine gleitgelagerte Variante ohne Radiallagerelemente aber für einen Außendurchmesser von $\varnothing 23\text{mm}$ für den Nockenwellenkörper. Diese Variante ist bereits im Rahmen der Anfragerunde 1 methodenbasiert bewertet worden und erreichte die geforderten Verdrehmomente der Ventilschalen auf dem Nockenwellenkörper nicht. Um beispielsweise die erste, nicht gültige Variante in Tabelle 8-4 (Total = -14,29%; ÜS/GS = 3,82) in den gültigen Bereich anzuhe-

ben, müsste eine Änderung der Wandstärke des Nockenwellenkörpers oder der Einsatz reibleistungssteigernder Maßnahmen für den Presssitz zwischen Ventilknocken und Nockenwellenkörper in Erwägung gezogen werden. Die LFC-Varianten sind ebenfalls methodenbasiert bereits in der Anfragerunde 1 bewertet worden.

Fazit zur Anfragerunde 2

Die Problematik bezüglich der Darstellung der geforderten Verdrehmomente der Ventilknocken bei einem Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers von $\varnothing 23\text{mm}$ führt bei den Varianten 007 und 008 zu entsprechenden Änderungsaktivitäten.⁷⁶² Die im Rahmen der Anfragerunde 1 ermittelten Bewertungsergebnisse zeigen bereits, dass für den Durchmesser von $\varnothing 23\text{mm}$ Zusatzmaßnahmen erforderlich werden, um die erforderlichen Verdrehmomente der Ventilknocken realisieren zu können. Anstelle der Detailkonstruktionen der Kundenvarianten und der internen Varianten wären die variantenspezifischen Kennwerte des Variantenrankings gemäß Tabelle 8-4 in Verbindung mit den korrespondierenden CAD-Variantenmodellen voraussichtlich ausreichend gewesen, um den Kunden davon zu überzeugen, Nockenwellenausführung mit einem Durchmesser von $\varnothing 23\text{mm}$ für den konkreten Anwendungsfall nicht weiter in Betracht zu ziehen.

Retrospektiver Methodeneinsatz für Anfragerunde 3

Nach der Anfragerunde 2 werden die $\varnothing 23\text{-}$ Varianten kundenseitig verworfen. Fortan ist der Durchmesser $\varnothing 26\text{mm}$ laut Kundenaussage festgesetzt und soll keinen weiteren Änderungsaktivitäten unterliegen. Diese $\varnothing 26\text{-}$ Varianten erfüllen jedoch gemäß den Bewertungen aus Anfragerunde 1 die FIT-Bedingungen nicht.⁷⁶³ Deshalb werden die $\varnothing 26\text{-}$ Varianten unter Einbeziehung von zwei möglichen Zusatzmaßnahmen auf Basis des Variantenrankings in Tabelle 8-5 verglichen. Auf dem letzten Platz befindet sich die Ausgangsvariante ohne Zusatzmaßnahmen. Bei der erstplatzierten Variante (A-Projekt 1 – ohne RBE D26 d19; BF = 80,22%) wird ein dickwandigerer Nockenwellenkörper verwendet. Bei der Variante auf Platz 2 (A-Projekt 1 – ohne RBE D26 D21 μ ; BF = 73,78%) werden unter Beibehaltung des Nockenwellenkörpers der Ausgangsvariante reibleistungssteigernde Maßnahmen zur Erhöhung des Haftbeiwertes (μ) zwischen Nockenwellenkörper und Ventilknocken eingesetzt, um das geforderte Mindestverdrehmoment zu erreichen. Dabei wirkt sich die Variation des Nockenwellenkörpers weniger stark auf die FIT-Bewertung aus als die Einbeziehung von Zusatzprozessen zur Reibleistungssteigerung.

⁷⁶² vgl. Tabelle 8-1 auf S. 252

⁷⁶³ vgl. Tabelle 8-4 auf S. 259

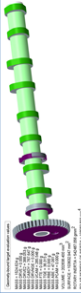

Nr.	Abf.	Benennung	CAD-Modell	Ranking					PGE - Produktgenerationsentwicklung					Gleichanteil				
				FIT	BF	NF	HPL	Total	Rang	δGV(Int)	δGV(Con)	δGV	δÜV	δÜV(V≠0)	Üs/Gs	δÜV(V=0)	T	GT
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D26 d19		YES	80,22%	FIT	16,60%	63,62%	1	1,89%	18,87%	20,75%	79,25%	35,85%	3,82	43,40%	12	1
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D26 d21 µ		YES	73,78%	FIT	21,74%	52,04%	2	1,89%	18,87%	20,75%	79,25%	35,85%	3,82	43,40%	12	1
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D26 d21		NO	0,00%	-2,63%	17,70%	-20,33%	3	1,89%	18,87%	20,75%	79,25%	35,85%	3,82	43,40%	12	1

Tabelle 8-5: Vergleich der Varianten mit einem Außendurchmesser für den Nockenwellenkörper von Ø26mm mit und ohne Zusatzmaßnahmen zur Erreichung der FIT-Bedingung

Die einbezogenen Maßnahmen zur Erreichung der FIT-Bedingung hat mit Bezug auf die Ausgangsvariante keine Änderung des Verhältnisses von Übernahmevariation zu Gestaltvariation ($\ddot{U}S/GS = 3,82$) zur Folge. Dies liegt im Falle der Nockenwellenkörpervariation daran, dass die Variationsanteile des Nockenwellenkörpers der Ø26-Ausgangsvariante und die des variierten, dickwandigeren Nockenwellenkörpers im Vergleich zum jeweiligen Original identisch waren. Im Falle der Reibleistungssteigerung wird der Nocken der Ausgangsvariante durch einen reibleistungsverbesserten Ventilnocken ersetzt. Auch hier ergeben sich unveränderte Variationsanteile gegenüber dem referenzierten Originalventilnocken.

Fazit zur Anfragerunde 3

Durch den Methodeneinsatz für die angefragte Ø26-Kundevariante im Rahmen der abschließenden Anfragerunde 3 zeigt sich, dass die geforderte Ausprägung des Nockenwellenkörpers insbesondere in Verbindung mit den geforderten Verdrehmomenten der Ventilnocken zu einer Nichterfüllung der FIT-Bedingung führt und demzufolge entsprechende Zusatzmaßnahmen erforderlich werden. Die Einbeziehung von Maßnahmen zur Erreichung und Verbesserung der FIT-Bedingung kann mit geringem Aufwand für die Methodenanwendung realisiert und mit anderen Lösungen, wie beispielhaft mit dem ermittelten Variantenranking entsprechend Tabelle 8-5 gezeigt, verglichen werden. Dabei zeigen die variantenspezifischen NEAREST-FIT-Werte an, bei welchen Varianten, die die FIT-Bedingung nicht erfüllen, Variationen der Modellparameter und Produkteigenschaften in Erwägung gezogen werden können. Eine diesbezügliche Entscheidungsunterstützung erfordert zusätzlich die Berücksichtigung des HPL-Wertes, der den Aufwand beschreibt, die 100%-Lösung zu erreichen. Die Detailinformationen um zu erkennen, an welchen Stellgrößen eine Variation sinnvoll sein kann, wird dabei aus den Berechnungstabellen⁷⁶⁴ deutlich.

Der Methodeneinsatz für die Anfragerunde 3 ist entsprechend der vorherigen Anmerkungen dahingehend nutzenstiftend, da mit geringem Aufwand abgeleitete Varianten durch Variation an potentiell geeigneten Stellgrößen, wie Modellparametern und Eigenschaften, verglichen werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die bestehenden Elemente des aktuellen Baukastens auf Grundlage definierter Parameter des Modellparametersatzes⁷⁶⁵ an neue Kundenanfragen angepasst werden. Damit werden oftmals nicht alle angefragten Konstruktionselemente (Bohrungen, Nuten, Fasen, Rundungen, etc.) abgebildet und es muss auf Grundlage der methodenbasiert abgeleiteten Modelle durch den Methodenanwender entschieden werden, in-

⁷⁶⁴ Variantenspezifische Informationen zur Variantenbewertung enthalten die Tabellenblätter T11 (Kurzübersicht) und T12 (Detailübersicht) entsprechend Abbildung 7-4. Die Abbildung 11-20 im Anhang zu Kapitel 7 zeigt hierzu die Kurzübersichten zweier Variante aus dem Nutzfahrzeugbereich

⁷⁶⁵ vgl. Kapitel 11.2.3 im Anhang zu Kapitel 6

wieweit das generierte Variantenranking unabhängig von gegebenenfalls nicht berücksichtigten Designelementen ist.

Zum Zeitpunkt der Anfragerunde 3 hätte die Ausdetaillierung der Kundenvariante 011 auch durch die Methodenunterstützung nicht verhindert werden können, da zu diesem Zeitpunkt in der Angebotsphase nur noch wenige Mitbewerber konkurrierender Zulieferunternehmen verblieben waren und demnach die Aussicht auf eine mögliche Serienbeauftragung durch den Kunden entsprechend hoch erschien.

Fazit des retrospektiven Methodeneinsatzes für Anfrageprojekt A-Projekt 1

Die Differenzierung der im Rahmen des Anfrageprojektes A-Projekt 1 erstellten Nockenvarianten in kundenseitig und unternehmensintern initiierte Varianten zeigt, dass die in der Anfragerunde 1 angefragten Kundenvarianten mit Radiallagerelementen zwar zeichnungs- und modelltechnische in der Varianten 000, 003 und 004 umgesetzt worden sind, jedoch keine weiteren Konstruktionsleistungen hierzu für die Erstellung von überarbeiteten (unternehmensinternen) Lösungsvorschlägen aufgewendet wurden.⁷⁶⁶ Vielmehr wurden dem Kunden die Varianten 001 und 005 ohne Radiallagerelemente angeboten, die zwar nicht explizit angefragt wurden, jedoch zum Zeitpunkt der Anfragerunde 1 zuliefererseitig favorisiert wurden. Diese Ausführungen, bei denen die Nockenwelle ohne Gleitlagerringe direkt auf dem Nockenwellenkörper im Zylinderkopf radial gelagert wird, wird auch methodenbasiert als die zielführende Nockenwellenausführung ermittelt.⁷⁶⁷ In diesem Kontext ist die zweitplatzierte Variante im Variantenranking in Tabelle 8-4 (1-15; A-Projekt 1 – ohne RBE D25; BF = 82,02%) mit zudem dem höchsten, ermittelten Verhältnis von Übernahmevariation zu Gestaltvariation ($\text{ÜS/GS} = 4,89$) die geeignetste Lösung auf Grundlage der methodenbasierten Entscheidungsunterstützung. Aufgrund des geringeren Gestaltvariationsanteils der zweitplatzierten Variante gegenüber der erstplatzierten Variante und nahezu gleicher BEST-FIT-Bewertungen, ist die zweitplatzierte Variante zu favorisieren. Bei der retrospektiven Methodenanwendung für das Anfrageprojekt A-Projekt 1 hat sich dabei gezeigt, dass die Einbeziehung der Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung in die kennwertbasierte Entscheidungsunterstützung für eine fundierte Variantenauswahl als nutzenstiftend zu bewerten ist, gerade bei der Entscheidung zwischen Lösungen, die auf Basis der FIT-Kennwerte nahe beieinander liegen. In der hier beschriebenen retrospektiven Analyse des Anfrageprojektes führt die Entscheidungsunterstützung durch die Berücksichtigung des Verhältnisses von Übernahmevariation zu Gestaltvariation in Verbindung mit den FIT-Bewertungen zu eindeutigen und nachvollziehbaren Variantenempfehlungen.

⁷⁶⁶ vgl. Tabelle 8-1 auf S. 252

⁷⁶⁷ vgl. Tabelle 8-3 auf S. 257

Wie in den Zwischenfazits beschrieben, empfiehlt die Anwendung der Methode für die Anfragerunde 1, dass die Nockenwellenvarianten 000, 003 und 004 mit Radiallager-elementen nicht zielführend für das vorliegende Anforderungsprofil sind und demnach die Detailkonstruktionen der Kundenvarianten hinfällig werden. In der zweiten Anfragerunde trifft dies auf die Ø23-Varianten 007 und 008 zu. Die methodengestützten Entscheidungen gegen die Detailkonstruktionen der fünf zuvor genannten Kundenvarianten ergeben eine realistische Zeiteinsparung im Bereich von 120 Konstruktionsarbeitsstunden.⁷⁶⁸ Diese Abschätzung berücksichtigt die Konstruktionsleistungen für die Neuerstellungs- und Änderungsaktivitäten der Zeichnungen und Modelle der angefragten Kundenvarianten. Dabei wurden für einzelne Kundenvarianten teilweise auch Einzelteil- und Fertigungszeichnungen erstellt, die ebenfalls Änderungen unterlagen.⁷⁶⁹ Diese werden bei der Abschätzung des freiwerdenden zeitlichen Potentials nicht mit berücksichtigt. Demgegenüber steht der zeitliche Aufwand, der für die Methoden-anwendung zu Buche schlägt. In diesem Kontext wurde in Summe für die retrospektive Anwendung der Methode auf das Anfrageprojekt A-Projekt 1 von einem Konstruktionsingenieur rund ein Arbeitstag investiert.

8.2.2 Retrospektive Methoden-anwendung für A-Projekt 16 (NFZ)

Die Datenbasis des Softwareprototyps basiert auf 42 PKW-Nockenwellen.⁷⁷⁰ Aus diesem Grund sollte mit der Anwendung des aktuellen Softwareprototyps auf das Anfrageprojekt A-Projekt 16 aus dem Nutzfahrzeugbereich untersucht werden, wie abgeleitete Varianten für Nutzfahrzeuganwendungen auf Grundlage des aktuellen Baukasteninhalts variantenspezifisch bewertet werden, und welche Schlüsse sich daraus im Hinblick auf die Festlegung geeigneter Schwellenwerte zur Kennzeichnung von Handlungsempfehlungen für die weitere Vorgehensweise zur Variantenauswahl ableiten lassen.

Im Anfrageprojekte A-Projekt 16 wurde von einem Nutzfahrzeughersteller für einen Reihen-6-Zylinder-SOHC-Dieselmotor eine gebaute Nockenwelle als Ersatz für die bisherige, einteilige Ausführung angefragt. Dabei sollten drei unterschiedliche Nockenwellenvarianten für das Angebot berücksichtigt werden. Hierzu zeigt die folgende Tabelle 8-6 die Hauptcharakteristika zu den drei Abfrageszenarien sowie die Ergebnisse der Datenbankabfragen auf Grundlage des Softwareprototyps.⁷⁷¹

⁷⁶⁸ Abschätzung basiert auf Richtwerten zur Kapazitätsplanung des fallgebenden Unternehmens. Der Aufwand für die Datenpflege ins Datenmanagementsystem ist dabei nicht inbegriffen.

⁷⁶⁹ vgl. Abbildung 8-5 auf S. 251

⁷⁷⁰ vgl. Produktanalyse zu gebauten Nockenwelle im Kapitel 6.3

⁷⁷¹ Zur Orientierung an den mit Hilfe der Benutzeroberfläche des Softwareprototyps ausgelösten Aktionen sind die Positionsangabe aus Abbildung 7-2 (S. 232) mit aufgeführt.

vgl. Abbildung 7-1 ▶		D1	G	D1 und G	H1	H2
11	DRVE	26.766	Standard	3	25	4
	ohne RBE		Integral	2	5	1
	CABDY Ø33/Ø25		Modular	1	20	3
12	DRVE2	14.520	Standard	5	50	3
	ohne RBE		Integral	1	5	0
	CABDY Ø33/Ø25		Modular	1	10	0
13	DRVE2	2.586	Standard	9	435	7
	LFC		Integral	1	30	0
	CABDY Ø33/Ø25		Modular	3	105	0

Legende

- CABDY (Camshaft Body)
- Nockenwellenkörper
- RBE (Radial bearing Element)
- Radiallagerelement
- LFC (Low Friction Camshaft)
- Nockenwelle mit Wälzlagern
- DRVE2 (Drive Element 2)
- Antriebselement 2

Tabelle 8-6: Ergebnisse der Datenbankabfragen auf Grundlage des Softwareprototyps für drei Abfrageszenarien bei konstanten Nockenwellenkörperabmessungen

Entsprechend Tabelle 8-6 werden gleitgelagerte Nockenwellenvarianten ohne Radiallagerelemente (RBE) auf Basis des aktuellen Baukasteninhaltes ermittelt. Dabei werden mit der Anfrage 11 Varianten gesucht, die mit einem Antriebsstopfen (DRVE) angetrieben werden, und mit Abfrage 12 solche, die über ein Zahnrad (DRVE2) angetriebene werden.⁷⁷² Die Abfrage 13 leitet hingegen wälzgelagerte LFC-Varianten ab. Die nachfolgende Tabelle 8-7 fasst in einem Variantenranking die Bewertungsergebnisse der Abfrage 11 (Standard = 4; Integral = 1; Modular = 3) und Abfrage 12 (Standard = 3) zusammen. Für die in der Tabelle 8-7 enthaltenen Varianten zur Abfrage 11 wurden dabei die höchsten FIT-Bewertungen ermittelt. Hierunter entspricht die erstplatzierte Lösung (1-11; A-Projekt 16 – DRVE; BF = 81,99%; Total = 67,87%) dem integralen Optimum aus Tabelle 8-6. Eine derartige Nockenwellenausführung wurde auch zum Zeitpunkt der Kundenanfrage favorisiert. Dadurch wird die Aussage aus dem vorhergehenden Kapitel hinsichtlich der guten Funktionsweise der Methode bestärkt.

⁷⁷² Auszugsweise sind für die Abfrage 11 die ein- und ausgeschlossenen Elementtypen sowie die funktions- und anwendungsbezogenen Eigenschaften in Abbildung 11-27 und die relevanten Modellparameter, die aktiven Produkteigenschaften und die Intervallforderungen für die emergenten Bewertungszielgrößen in Abbildung 11-28 im Anhang zu diesem Kapitel dargestellt. Für die Abfragen 12 und 13 wurden entsprechend abgeänderte Datensätze verwendet.

Nr.	Abf.	Benennung	CAD-Modell	Ranking				PGE - Produktgenerationsentwicklung						Gleichanteil					
				FIT	BF	NF	HPL	Total	Rang	ΔGV(int)	ΔGV(Con)	ΔÜV	ΔÜV(V≠0)	ÜS/GS	ΔÜV(V=0)	T	GT		
1	11	A-Projekt 16 - DRVE		YES	81,99%	FIT	14,12%	67,87%	★1	18,84%	39,13%	57,97%	42,03%	42,03%	★0,73	0,00%	14	0	
4	11	A-Projekt 16 - DRVE		YES	80,53%	FIT	16,13%	64,41%	★2	18,06%	37,50%	55,56%	44,44%	44,44%	★0,80	0,00%	15	0	
3	11	A-Projekt 16 - DRVE		YES	80,44%	FIT	16,58%	63,86%	★3	18,06%	37,50%	55,56%	44,44%	44,44%	★0,80	0,00%	15	0	
2	11	A-Projekt 16 - DRVE		YES	78,30%	FIT	16,79%	61,51%	★4	19,12%	39,71%	58,82%	41,18%	41,18%	★0,70	0,00%	15	0	
2	12	A-Projekt 16 - DRVE2		YES	69,19%	FIT	24,42%	44,77%	★5	19,72%	39,44%	59,15%	40,85%	40,85%	★0,69	0,00%	15	0	
1	12	A-Projekt 16 - DRVE2		YES	66,21%	FIT	24,65%	41,55%	★6	20,29%	40,58%	60,87%	39,13%	39,13%	★0,64	0,00%	15	0	
3	12	A-Projekt 16 - DRVE2		NO	0,00%		-5,53%	26,86%	-32,39%	★7	19,72%	39,44%	59,15%	40,85%	40,85%	★0,69	0,00%	15	0

Tabelle 8-7: Variantenranking zu den Abfragen 11 (mit DRVE) und 12 (mit DRVE2)






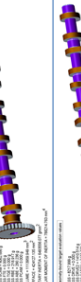

Nr.	Adf.	Benennung	CAD-Modell	FIT	Ranking				PGE - Produktgenerationsentwicklung							Gleichanteil		
					BF	NF	HPL	Total	Rang	δGV(amt)	δGV(Con)	δGV	δÜV	δÜV(V≠0)	Üs/GS	δÜV(V=0)	T	GT
3	13	A-Projekt 16 - LFC DRVE2		YES	44,15%	FIT	34,15%	10,00%	1	21,84%	32,18%	54,02%	45,98%	45,98%	0,85	0,00%	21	0
2	13	A-Projekt 16 - LFC DRVE2		YES	38,40%	FIT	35,31%	3,09%	2	22,73%	31,82%	54,55%	45,45%	45,45%	0,83	0,00%	22	0
7	13	A-Projekt 16 - LFC DRVE2		NO	0,00%	-4,15%	33,12%	-37,27%	3	21,84%	32,18%	54,02%	45,98%	45,98%	0,85	0,00%	21	0
6	13	A-Projekt 16 - LFC DRVE2		NO	0,00%	-4,15%	33,23%	-37,38%	4	21,84%	32,18%	54,02%	45,98%	45,98%	0,85	0,00%	21	0
5	13	A-Projekt 16 - LFC DRVE2		NO	0,00%	-4,15%	33,33%	-37,48%	5	21,84%	32,18%	54,02%	45,98%	45,98%	0,85	0,00%	21	0
4	13	A-Projekt 16 - LFC DRVE2		NO	0,00%	-4,15%	37,01%	-41,16%	6	21,84%	32,18%	54,02%	45,98%	45,98%	0,85	0,00%	21	0
1	13	A-Projekt 16 - LFC DRVE2		NO	0,00%	-4,15%	38,17%	-42,32%	7	21,84%	32,18%	54,02%	45,98%	45,98%	0,85	0,00%	21	0

Tabelle 8-8: Variantenranking zur Abfrage 13 (LFC)

Der Fokus der Betrachtungen liegt an dieser Stelle weniger auf der kennwertbasierten Ergebnisinterpretation zur Auswahl geeigneter Varianten, sondern vielmehr auf der kennwertbasierten Beurteilung, ob der aktuelle Baukasteninhalt für die konkrete Anfrage verwendet werden kann. Hierbei überwiegen bei allen Varianten gemäß der Variantenrankings in Tabelle 8-7 und Tabelle 8-8 die variantenspezifischen Gestaltvariationsanteile gegenüber den Übernahmevariationsanteilen ($0,64 \leq \text{ÜS/GS} \leq 0,85$). Im Vergleich dazu wurden für das PKW-Anfrageprojekt A-Projekt 1 deutlich höherer Verhältnisse ermittelt ($2,35 \leq \text{ÜS/GS} \leq 4,89$).⁷⁷³ Die niedrigen ÜS/GS-Verhältnisse, die zudem im NFZ-Beispiel sehr nahe beieinander liegen, zeigen, dass für alle abgeleiteten Varianten wenig passende Elemente verfügbar sind. Dennoch liegen die ersten vier Lösungen gemäß Tabelle 8-7 hinsichtlich der FIT-Werte im Bereich um 80%. Betrachtet man die TOTAL-Bewertungen⁷⁷⁴ für die ersten vier Varianten in der Tabelle 8-7, so liegen diese im Bereich zwischen 60% und 70%. Vergleicht man hierzu die HPL-Bewertungen⁷⁷⁵ der beiden gültigen LFC-Varianten aus Tabelle 8-8, so liegen diese trotz etwas höherer ÜS/GS-Verhältnisse gegenüber den Gleitlagervarianten aus Tabelle 8-7 deutlich über den HPL-Bewertungen der Gleitlagervarianten. Da zudem die beiden LFC-Varianten deutlich schlechter bezüglich der FIT-Bedingungen bewertet werden (Platz 1: BF = 44,15%; Platz 2: BF = 38,40%), ergeben sich auch entsprechend niedrige TOTAL-Bewertungen (Platz 1: TOTAL = 10,00%; Platz 2: TOTAL = 3,09%).

Auf Basis der implementierten Wissensbasis für den Softwareprototyp können die LFC-Varianten für den Einsatz für die vorliegende Nutzfahrzeuganwendung nicht empfohlen werden. Die Frage stellt sich hierbei, ab welchen Schwellenwerten eine Weiterverfolgung konkreter Varianten nicht mehr in Betracht gezogen werden sollte. Durch die Expertenanalyse von Variantenrankings zu unterschiedlichen Anfrageprojekten wurden auf Grundlage des ÜS/GS-Verhältnisses und der TOTAL-Bewertung vier Fälle mit entsprechenden Schwellenwerten gemäß Tabelle 8-9 vorgeschlagen.

Fall	Stopp	ÜS/GS	TOTAL	Beispiel
1	Ja	< 1	< 50%	3-13 A-Projekt 16 LFC DRVE2 (Tabelle 8-8)
2	Eher ja	< 1	> 50%	1-11 A-Projekt 16 DRVE (Tabelle 8-7)
3	Eher nein	> 1	< 50%	4-14 A-Projekt 1 RBE D25 (Tabelle 8-4)
4	Nein	> 1	> 50%	1-15 A-Projekt 1 RBE D25 (Tabelle 8-4)

Tabelle 8-9: Schwellenwerte auf Grundlage des Verhältnisses von Übernahme- und Gestaltvariationsanteilen (ÜS/GS) in Kombination mit der TOTAL-Bewertung

⁷⁷³ vgl. Kapitel 8.2.1

⁷⁷⁴ vgl. Gl. 6-11 und Gl. 6-12 am Ende von Kapitel 6.4

⁷⁷⁵ Aufwandsabschätzung zur Erreichung der 100%-Lösung (HPL)

Übersteigen die Gestaltvariationsanteile die Übernahmevariationsanteile ($\ddot{U}S/GS < 1$) und liegt zudem die TOTAL-Bewertung unter 50% (Fall 1), dann kann davon ausgegangen werden, dass für derart bewertete Lösungen, wegen der hohen HPL-Werte gepaart mit niedrigen FIT-Bewertungen bei zudem hohen Gestaltvariationsanteilen und damit erhöhtem Risiko, eine Weiterverfolgung der entsprechenden Varianten nicht empfohlen werden kann. Die mit diesen Varianten in Verbindung stehenden Aktivitäten sind demnach zu stoppen. Die Analyse der Variantenrankings auf Grundlage der Firmenexpertise zu gebauten Nockenwellen hat gezeigt, dass sich keine scharfen Grenzwerte definieren lassen. Die Fälle 2 und 3 dienen deshalb der Beschreibung von Varianten im Übergangsbereich zwischen Fall 1 und Fall 4. Variantenrankings, die in diesem Kontext ausschließlich Variantenbewertungen gemäß der Fälle 1 und 2 beinhalten sind demzufolge ein Indiz dafür, dass sich aus dem aktuellen Baukasten für die aktuelle Anfrage keine passenden Varianten ableiten lassen.

Ausschlaggebend war bei der Entscheidung für oder gegen die Weiterverfolgung einer Variante zunächst immer das $\ddot{U}S/GS$ -Verhältnis. Zusätzlich wurde die TOTAL-Bewertung mit in die Beurteilung einbezogen, um neben der BF-Bewertung auch variantenspezifische Aufwände und damit Risiken quantitativ durch die HPL-Bewertung zu berücksichtigen. Zur Beurteilung variantenspezifischer Aufwände, Risiken und Potentiale wurden zusätzlich die Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung herangezogen.⁷⁷⁶ Daraus ergibt sich die Fragestellung, inwieweit die mengenlehrebasierten Variationsanteile ($V = 0$ bzw. $V \neq 0$) zusätzlich durch mathematische Funktionen beschrieben werden können, um die Auswirkungen der Variationen von Parametern und Teilsystemen (auf Kosten, Bauteilmasse, Steifigkeiten, etc.) quantifizieren zu können.⁷⁷⁷ Diese Untersuchungen waren nicht mehr Teil der vorliegenden Arbeit, so dass sich hieraus entsprechende Anknüpfungspunkte für Folgearbeiten ergeben.

8.3 Fazit zur Evaluation des Methodenpotentials

Die Evaluation der Methode im Kontext des fallgebenden Unternehmens (Ziel 3) diene der Überprüfung der Forschungshypothese 3, dass der Einsatz der Methode zur Entscheidungsunterstützung auf Grundlage einer Softwareanwendung die Konzeptentwicklung in der Angebotsphase unterstützen kann. Hierzu wurden Forschungsfragen definiert, die in Anlehnung an die DRM in der Deskriptiven Studie 2 bearbeitet wurden. Im ersten Teil der Deskriptiven Studie 2 wurde das Methodenpotential durch Experten aus der Konstruktion im Rahmen einer Interview-Studie be-

⁷⁷⁶ vgl. Kapitel 6.2, S. 178 ff.

⁷⁷⁷ Diskussion mit Prof. Albers im Rahmen des 6. wissenschaftlichen Gespräches am 15.07.2015

wertet. Durch die Beschreibung der Methode und deren Operationalisierung durch den in dieser Arbeit vorgestellten Anwendungssoftwareprototypen gelang der Transfer der wissenschaftlichen Methode in die industrielle Praxis (FF3.1), da durchgängig durch die Expertenaussagen eine Anwendbarkeit in der Praxis auf Grundlage entsprechender Schulungsaktivitäten bestätigt wurde. Zudem konnte sich auch die Mehrheit der befragten Konstrukteure sehr gut vorstellen, die Methode zur Unterstützung der Variantenauswahl für Folgeprojekte einzusetzen. Hinsichtlich der Risiken und der produktspezifischen Erweiterungen am bestehenden Softwareprototyp gingen die Expertenmeinungen teilweise auseinander. Zum einen wurde das Hauptrisiko darin gesehen, dass durch die ausschließliche Verwendung bereits produzierte Bauteile für die Variantenableitung auf aktuelle Entwicklungstrends nicht reagiert werden kann. Hingegen ist die frühe Einbeziehung von Teilen aus Vorentwicklungsprojekten mitunter unsicherheitsbehaftet, da sich hierfür häufig das Firmen-Know-how erst im Aufbau befindet. Dies resultiert, wie am Beispiel des NFZ-Projektes gezeigt, in geringen, variantenspezifischen ÜS/GS-Verhältnissen. Das Potential für einen Praxiseinsatz wurde aus Sicht der Experten als mittel bis hoch bewertet (FF3.2). Dabei ist aus Sicht der Experten entscheidend, dass die Methodenanwendung in die bestehenden Prozessabläufe im Rahmen der Angebotsphase integriert werden kann und kein Zusatzaufwand für die Konstruktionsmitarbeiter entsteht.

Das aus Expertensicht bestätigte Potential der Methode wurde anschließend im Rahmen des zweiten Teils der Methodenevaluation durch retrospektive Methoden-anwendung für zwei abgeschlossene Anfrageprojekte nachgewiesen (FF3.3). Hierzu wurde am Beispiel eines PKW-Anfrageprojektes gezeigt, dass durch die kennwertbasierten Variantenbewertungen auf Grundlage von FIT-Bedingungen sowie den Variationsanteilen im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung fallspezifisch geeignete Lösungen auf Basis eines bestehenden Baukastens abgeleitet werden können. Dabei deckten sich die Variantenempfehlungen durch die retrospektive Methodenanwendung mit den in den abgeschlossenen Anfrageprojekten favorisierten Lösungen. Durch die retrospektive Methodenanwendung konnte zudem ein zeitliches Potential abgeschätzt werden, indem diejenigen Varianten, die auf Grundlage der Variantenrankings eindeutig als ungeeignet identifiziert wurden, nicht, wie im ursprünglichen Projektverlauf geschehen, im Detail hätten auskonstruiert werden müssen um zu erkennen, dass diese nicht zielführend sind. Für die Ableitung der weiteren Vorgehensweise auf Basis eines vorliegenden Variantenrankings wurden anhand des zweiten Anfrageprojektes aus dem NFZ-Bereich Schwellenwerte vorgeschlagen, bei denen das ÜS/GS-Verhältnis eine zentrale Rolle einnimmt. Auf Basis der Methodenevaluation im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens konnte damit die Gültigkeit der Forschungshypothese 3 nachgewiesen werden. Wie in Abbildung 8-6 dargestellt unterstützt die Methode dabei im iPeM - Integriertes Produktentste-

hungsmodell insbesondere bei den Basisaktivitäten „Validieren und Verifizieren“ und „Wissen managen“ sowie den Kernaktivitäten „Ideen finden“ und „Prinzip und Gestalt modellieren“.⁷⁷⁸

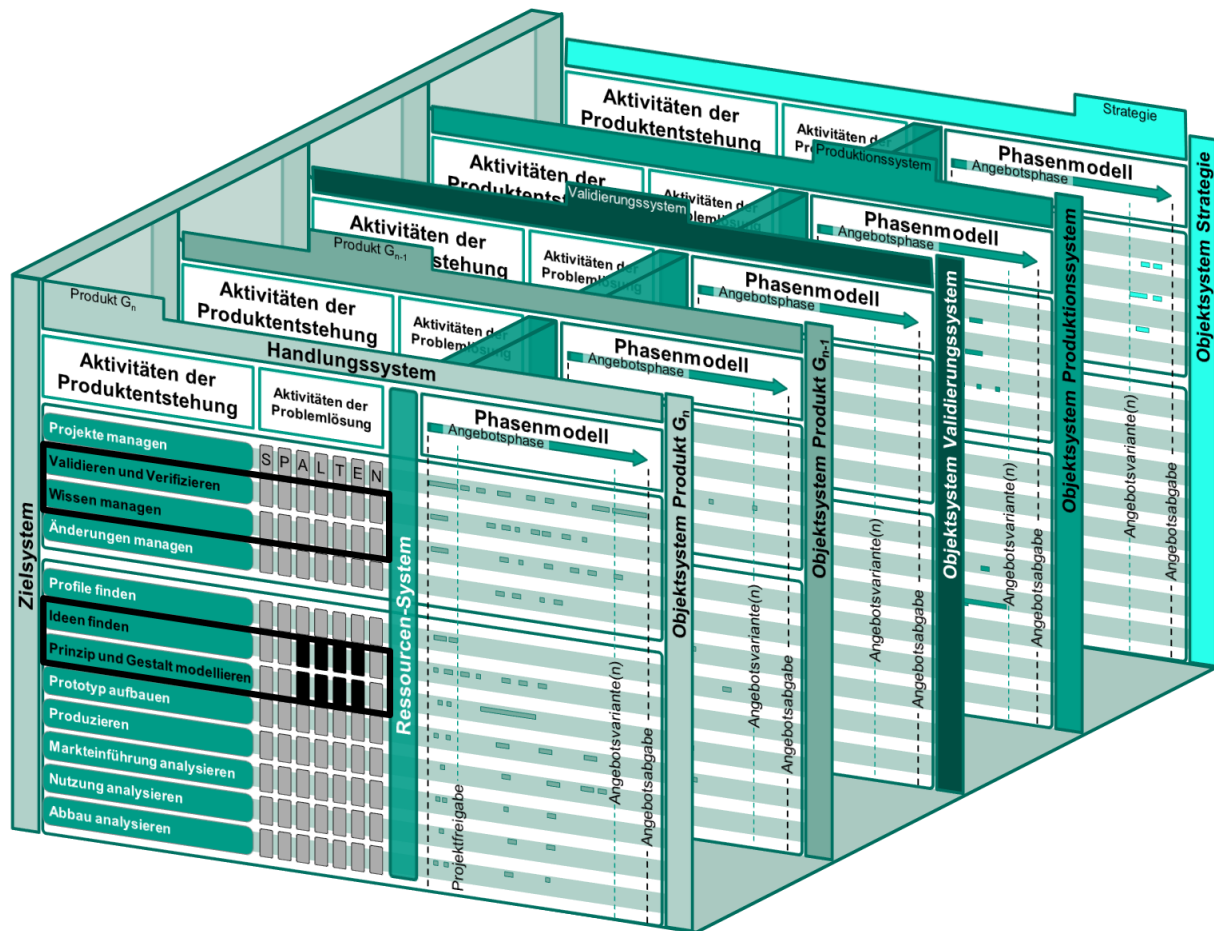


Abbildung 8-6: Unterstützung der Methode zur Variantenauswahl in der Angebotsphase im iPeM - Integriertes Produktentstehungsmodell⁷⁷⁹

Durch die Methode werden Varianten auf Basis bestehender Referenzprodukte im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung abgeleitet und für den konkreten Anfragefall kunden- und anbiertgerecht bewertet und ausgewählt. Hierzu greift die Methode auf bestehendes Wissen im Unternehmen zu. Ferner wird die Wissensbasis stetig um neues, fallspezifisches Wissen erweitert.⁷⁸⁰ Die Methode unterstützt darüber hinaus, zielführende Ideen für die konkrete Kundenanfrage zu finden und deren Prinzip und Gestalt zu modellieren. Dabei ist die Modellierung von Produktentstehungsprozessen im iPeM im Kontext der PGE von entscheidender Bedeutung, indem auf Ergebnisse aus Variantenentwicklungen vorangegangener Entwicklungsgenera-

⁷⁷⁸ vgl. Erläuterungen zur Modellierung eines schematischen Variantenauswahlprozess in Kap. 2.1.4

⁷⁷⁹ vgl. Abbildung 2-22 auf S. 60

⁷⁸⁰ vgl. Variantenentwicklung im erweiterten ZHO-Modell in Kapitel 6.1 und Variantenverständnis im Kontext dieser Arbeit aus Sicht der PGE (S. 64 f.)

tionen (g_{n-m}) durch die multidimensionale Beschreibung auf mehreren Ebenen für das Ableiten und Bewerten fallspezifisch gültiger Varianten referenziert werden kann. Dabei liegt der Fokus der Methode darauf, durch das Ableiten von Varianten auf Grundlage eines bestehenden Baukastens bei der „alternativen Lösungssuche (A)“ und der anschließenden „Lösungsauswahl (L)“ aus einer Menge an gültigen Varianten eines Variantenrankings zu unterstützen. Für die Auswahl spielt die „Tragweitenanalyse (T)“ eine zentrale Rolle. Hierzu werden variantenspezifisch die Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung ermittelt, um aus Sicht der Unternehmensexpertise Aufwand, Risiko und Potential der Varianten zu beschreiben und beim „Entscheiden und Umsetzen (E)“ einer konkreten Varianten berücksichtigen zu können.⁷⁸¹ Für die Entscheidungsunterstützung werden hierbei methodengestützt kontinuierlich die Ist-Zustände der abgeleiteten Varianten mit den im Zielsystem beschriebenen Soll-Zuständen verglichen. In diesem Zusammenhang unterstützt die Methode die Basisaktivität „Validieren und Verifizieren“, die die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess nach ALBERS darstellt.⁷⁸²

⁷⁸¹ vgl. Ausführungen zum Entscheidungsunterstützungssystem (VDSS) in Kapitel 6.4

⁷⁸² vgl. Albers 2010 Hypothese 3

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Ergebnisse dieser Arbeit zunächst zusammengefasst und anhand der Erreichung der Zielsetzung diskutiert. Im Rahmen der Erarbeitung der Ziele ergaben sich Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsaktivitäten, die im anschließenden Ausblick in Form von neuen Forschungsfragen als Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsarbeiten vorgestellt werden.

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode vorgestellt, die Konstrukteure bei der Variantenauswahl in der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase unterstützt. Der Fokus lag dabei auf der Ableitung von produktspezifisch gültigen Varianten auf Grundlage von bestehenden Baukastenelementen, die hiernach kennwertbasiert hinsichtlich der Eignung für eine konkrete Kundenanfrage bewertet wurden.⁷⁸³ Zum einen wurden variantenspezifischen Erfüllungsgrade mit Bezug auf die Kundenanforderungen berechnet. Zur Bestimmung der anbieterseitigen Eignung wurden die variantenspezifischen Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung ermittelt. Dies ermöglichte, insbesondere durch die Differenzierung zwischen Übernahme- und Gestaltvariationsanteilen, eine unternehmensinterne Entscheidungsunterstützung unter Einbeziehung der produktspezifischen Expertise.⁷⁸⁴

Der Bedarf für eine Entscheidungsunterstützung bei der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase resultierte initial aus der teilnehmende Beobachtung des Autors als erfahrener Konstruktionsingenieur für Ventiltriebkomponenten des fallgebenden Zulieferunternehmens. Um in dem hart umkämpften Zulieferermarkt in der Automobilindustrie bestehen zu können, muss, aufgrund des hohen Kosten- und Zeitdruckes bei zunehmend komplexeren Produkten, auf abgeleitete Varianten auf Basis bestehender Lösungen zurückgegriffen werden. Hierbei müssen häufig mehrere Varianten konstruiert werden, um die nötigen Entscheidungsgrundlagen zur Auswahl der zielführenden Variante aus Kunden- und Anbietersicht zu schaffen.⁷⁸⁵ Die Herausforderung bei der Auswahl geeigneter Varianten liegt dabei an dem Konflikt, dass sich emergente Bewertungszielgrößen, wie beispielsweise Masse, Steifigkeiten und auch Kosten, nicht auf Teilsystemebene der Baukastenelemente, sondern erst auf Gesamtsystemebene der abgeleiteten Varianten ergeben. Daneben sind Kennwerte erforderlich, um die zur Herstellung der konkreten Varianten vorhandene Unterneh-

⁷⁸³ vgl. Leitbeispiel in Abbildung 1-5 auf S. 10

⁷⁸⁴ vgl. Kapitel 6.4, S. 222 ff.

⁷⁸⁵ vgl. schematischen Variantenauswahlprozess in der Angebotsphase gemäß Abbildung 1-1 auf S. 3

mensexpertise transparent darzustellen. Grundsätzlich besteht bei allen Konfigurationsproblemen die Schwierigkeit, dass zu kombinierende Elemente meist nicht unabhängig voneinander gewählt werden können, da sie untereinander in vielfältigen Beziehungen stehen.⁷⁸⁶ Aktuell sind zum Bereich des Variantenmanagements von abgeleiteten Varianten Ansätze verfügbar, die bei der bedarfsorientierten Variantengenerierung zur Reduzierung der inneren Vielfalt unterstützen, um z.B. Lagerkapazitäten einzusparen. Über bedingte Kombinatorik werden dann die Elemente des Baukastens zusammengestellt. Gemäß der vorliegenden Anforderungen können zur bestehenden Vorauswahl kombinierbare Elemente hinzugefügt werden, die regelbasiert wiederum einen Einfluss auf die nachfolgenden Kombinationspfade haben.⁷⁸⁷ Daneben sind Produktkonfiguratoren verfügbar die über Schnittstellen zu CAD-Systemen verfügen und auf diese Weise die Baukastenelemente entsprechend der geometrischen Randbedingungen anpassen und das Gesamtergebnis des Konfigurationsprozesses visualisieren können.⁷⁸⁸ Bei der in dieser Arbeit vorgestellten Methode wurde darüber hinaus die CAD-Kopplung in der Hauptintention dazu eingesetzt, geometriegebundene Bewertungszielgrößen zu ermitteln, die erst nach Variation der zu kombinierenden Elemente gemäß der fallspezifischen Randbedingungen mit in die Bewertung einbezogen werden können. Zur Beschreibung der Variantenauswahl wurde das erweiterte ZHO-Modell⁷⁸⁹ eingesetzt, mit dem durch den iterativen Prozesscharakter die wechselseitigen Rückkopplungen von Zielen auf Objekte abgebildet werden können. Die Berücksichtigung der Emergenz für die Variantenbewertung sowie die Bewertung der variantenspezifisch vorhandenen Unternehmensexpertise durch die Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung⁷⁹⁰ bilden dabei die zentralen Unterscheidungsmerkmale zu bestehenden Konfiguratoren.

Aus dem Forschungsbedarf, der sich auf teilnehmende Beobachtungen und der Analyse des Stands der Forschung stützt, wurden drei konkrete Ziele abgeleitet, die, in Anlehnung an die DRM⁷⁹¹, im Anschluss an die Klärung des Forschungsbedarfes im Rahmen von drei Studien mit Hilfe von Forschungsfragen und übergeordneten Hypothesen bearbeiten wurden. Die Abbildung 9-1 zeigt hierzu die Zusammenhänge.

⁷⁸⁶ vgl. Charakterisierung der Komplexität von Konfigurationsproblemen in Kapitel 2.3.2

⁷⁸⁷ Dieses Vorgehen entspricht dem von gängigen Konfiguratoren, die auch Automobilhersteller, Küchenausstatter oder Reiseveranstalter zur kundenindividuellen Zusammenstellung ihrer Produkte einsetzen. Entscheidend ist dabei, dass die Baukastenelemente hierbei bereits in der kombinierbaren Form vorliegen, beispielsweise klassifiziert nach Baugröße und Zusatzfeatures, d.h., die Elemente werden bei einer Größenänderung ausgetauscht und nicht entsprechend der aktuellen Randbedingungen angepasst.

⁷⁸⁸ vgl. Brinkop 2016

⁷⁸⁹ vgl. Kapitel 6.1 – Variantenentwicklung im erweiterten ZHO-Modell

⁷⁹⁰ vgl. Kapitel 6.2 – Variantenentwicklung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung

⁷⁹¹ vgl. Design Research Methodology (DRM) nach Blessing & Chakrabarti 2009

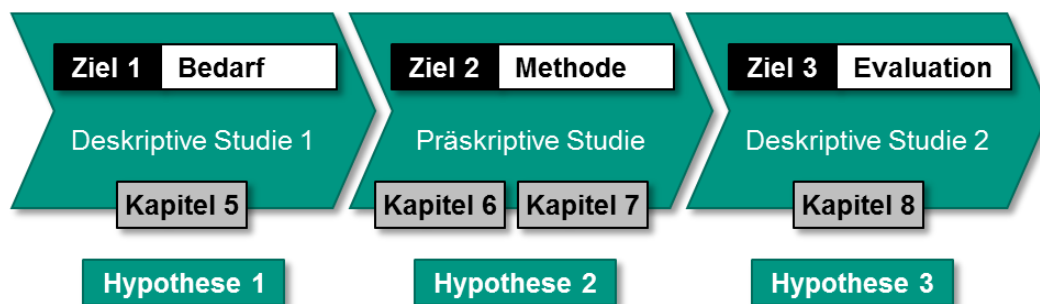


Abbildung 9-1: Einordnung der Ziele in den Kontext des Forschungsdesigns⁷⁹²

Deskriptive Studie 1

Der auf Grundlage teilnehmender Beobachtungen und der Analyse des Stands der Forschung ermittelte Forschungsbedarf wurde im Rahmen der Deskriptiven Studie 1 im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens untersucht. Hierzu wurde die Problem- und Bedarfssituation bei der Variantenentwicklung in der Angebotsphase aus Sicht der industriellen Konstruktionspraxis ermitteln (Ziel 1). Hinter diesem Ziel verbirgt sich die Grundannahme, dass die Effizienz in der Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotserstellungsphase durch eine Reduzierung vermeidbarer und unnötiger Konstruktionsaktivitäten gesteigert werden kann.⁷⁹³ Dieser Annahme lag die folgende Behauptung zugrunde:

Forschungshypothese 1

Im Rahmen der Variantenentwicklung in der Angebotsphase kommt es zur Generierung von vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten.

Die Forschungshypothese 1 bildet die Basis für die vorliegende Arbeit und wurde mit Hilfe von Forschungsfragen im Rahmen einer Fragebogen-Studie in drei Konstruktionsabteilungen und einer Datenanalyse von Anfrage- und Serienprojekten verifiziert.

Durch die Fragebogen-Studie wurde bestätigt, dass es in der Anfragephase im Rahmen der Konzeptentwicklung zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt.⁷⁹⁴ Dies konnte auch durch die Datenanalyse von abgeschlossenen Anfrage- und Serienprojekte bestätigt werden. In diesem Zusammenhang ergab die Analyse von sieben Referenzserienprojekten, dass im Mittel über ein Fünftel des Konstruktionsumfangs im Gesamtprojekt bereits in der Angebotsphase zur Erstellung von kunden- und anbiertgerechten Konstruktionen aufgewendet wird.⁷⁹⁵ Detaillierte Untersuchungen von 15 Anfrageprojekten zeigten ferner, dass hier mitunter die erbrachten

⁷⁹² vgl. Kapitel 4.2 – Forschungsvorgehen

⁷⁹³ vgl. Abbildung 5-7 auf S.148

⁷⁹⁴ vgl. Abbildung 5-4 auf S.144 und Abbildung 5-5 auf S.145

⁷⁹⁵ vgl. Abbildung 5-17 auf S.165

Konstruktionsleistungen sehr hoch waren und damit der Wirtschaftlichkeit dieser Phase eine hohe Bedeutung zukommt.⁷⁹⁶ Die Auswertung der abgegebenen Antworten nach Produktgruppen und demzufolge nach struktureller Produktkomplexität ergab einen Zusammenhang mit der Einschätzung hinsichtlich des Auftretens an vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten, den Anforderungen an die Dokumentation der vorhandenen Datenstände sowie dem Unterstützungsbedarf. Demnach hatten Konstrukteure für Nockenwellensystembaugruppen (Gruppe 2) und Zylinderkopfhauensysteme (Gruppe 3) den höheren Bedarf an Unterstützung.⁷⁹⁷

Neben der Bestätigung der Gültigkeit der Forschungshypothese 1 aus Sicht der drei Konstruktionsabteilungen des fallgebenden Unternehmens, war ein weiteres, zentrales Ergebnis aus der Fragebogen-Studie die Bedarfsäußerung, zu einem frühen Zeitpunkt in der Angebotsphase bestehende Lösungen bezüglich deren Eignung für neue Kundenanfragen hin bewerten zu können und zwar noch bevor mit der eigentlichen Konstruktionstätigkeit begonnen werden muss. Hierzu gab es nach Aussage der Konstrukteure bislang keine ausreichende, methodische Unterstützung.

Präskriptive Studie

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse wurde im Rahmen der Präskriptiven Studie die Methode zur Variantenauswahl mit dem erweiterten ZHO-Modell beschrieben und die Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung für die Entscheidungsunterstützung integriert (Ziel 2). Zur Anwendung und Verifikation der Methode am konkreten Industriebeispiel wurde eine prototypische Softwareanwendung aufgebaut zur Ableitung und Bewertung von Varianten auf Basis eines bestehenden Baukastens. Hierzu mussten die existierenden Baukastenelemente in geeigneter Weise beschrieben werden, um sie fallspezifisch für neue Kundenanfragen und damit für neue Zielsysteme variieren und kombinieren zu können. Übergeordnet galt es deshalb die nachfolgende, zentrale Behauptung zu überprüfen:

Forschungshypothese 2

Durch die Beschreibung der Baukastenelemente als korrespondierende Paare aus Objekt und Objektbeschreibung ist es möglich, für neue Kundenanfragen geeignete Elementkombinationen zu finden.

Zur Überprüfung der Forschungshypothese 2 wurde die Beschreibung der Variantenentwicklung im Kontext des erweiterten ZHO-Modells und im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung zunächst analysiert. Hierbei zeigte sich, dass das erweiterte ZHO-Modell einerseits durch den iterativen Prozesscharakter die für die

⁷⁹⁶ vgl. Abbildung 5-18 auf S.167

⁷⁹⁷ vgl. Abbildung 5-11 auf S.155

Variantauswahl entscheidenden bidirektionalen Abhängigkeiten von Zielen und Objekten beschreiben kann. Darüber hinaus können die Elemente des Baukastens als korrespondierende Paare bestehend aus Objekt und Objektbeschreibung im ZHO-Modell abgebildet werden. Dies bildet die Grundvoraussetzung für die Variantenableitung und Variantenbewertung, da durch die Vergleiche der variantenspezifischen Objektbeschreibungen (Ist-Zustände) auf Element- und Systemebene mit den Zielvorgaben im Zielsystem (Soll-Zustand) die fallspezifischen Eignungen der abgeleiteten Varianten ermittelt werden können. Zur Einbeziehung der Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung zur Entscheidungsunterstützung wurden die Bedeutungen von Prinzip-, Gestalt- und Übernahmevariation aus Sicht der industriellen Zuliefererpraxis beschrieben. Dafür wurde das bisherige mathematische Basismodell erweitert durch die Unterscheidung in innere Gestaltvariation GS(Int) und Gestaltvariation am Konnektor GS(Con) und durch die Untergliederung in Übernahmevariation $\ddot{U}S(V \neq 0)$ und nicht variierte Übernahmeanteile $\ddot{U}S(V = 0)$.

Nachdem die Grundlagen zur Beschreibung der Variantenentwicklung im Kontext des erweiterten ZHO-Modells und der PGE - Produktgenerationsentwicklung erarbeitet waren, wurden diese auf das Leitbeispiel dieser Arbeit im Rahmen einer detaillierten Produktanalyse übertragen.⁷⁹⁸ Hierzu wurden Arbeitspakete definiert, die sich an den Forschungsfragen zur Forschungshypothese 2 orientieren.⁷⁹⁹ Der Fokus der Arbeitsinhalte lag dabei darin, wie am konkreten Anwendungsbeispiel die Elemente des Baukastens beschrieben werden müssen, um diese fallspezifisch zu kunden- und anbietergerechten Varianten neu kombinieren und bewerten zu können. Dazu wurden die zu kombinierenden Elemente im Hinblick auf eine spätere, prototypische Operationalisierung der Methode durch eine Softwareanwendung in Klassen eingeteilt. Jede Elementklasse besteht wiederum aus mehreren Elementtypen mit unterschiedlichen funktions- und anwendungsbezogenen Produkteigenschaften.⁸⁰⁰ Über Dateninformationssätze (DIS) werden die Elementtypen an bestehende CAD-Modelle geknüpft. Zur geometrischen Anpassung der CAD-Modelle wurde ein Modellparametersatz (MPS) definiert. Diese Parameter wurden hiernach im Kontext der PGE in Parameter klassifiziert, deren Variation gegenüber der ursprünglichen Generation aus Sicht des fallgebenden Zulieferunternehmens eine Variation der Gestalt oder einer Übernahmevariation bedeuten. Für das Gesamtverständnis zur Beschreibung der Baukastenelemente wurden hiernach die Zusammenhänge zwischen den zuvor erläuterten Beschreibungsbausteinen (TYP, DIS, MPS) mit den Anforderungen und den emergen-

⁷⁹⁸ Leitbeispiel sind gebaute Nockenwellensysteme gemäß Abbildung 1-5 auf S.10

⁷⁹⁹ vgl. Abbildung 6-9 auf S.187

⁸⁰⁰ vgl. Tabelle 6-3 auf S.189

ten Bewertungszielgrößen geklärt.⁸⁰¹ Das hieraus erarbeitete Verständnis bildete die Grundlage für die Ermittlung der emergenten Bewertungszielgrößen.⁸⁰² Die folgende Abbildung 9-2 fasst hierzu die zentralen Ergebnisse aus der Präskriptiven Studie zusammen.

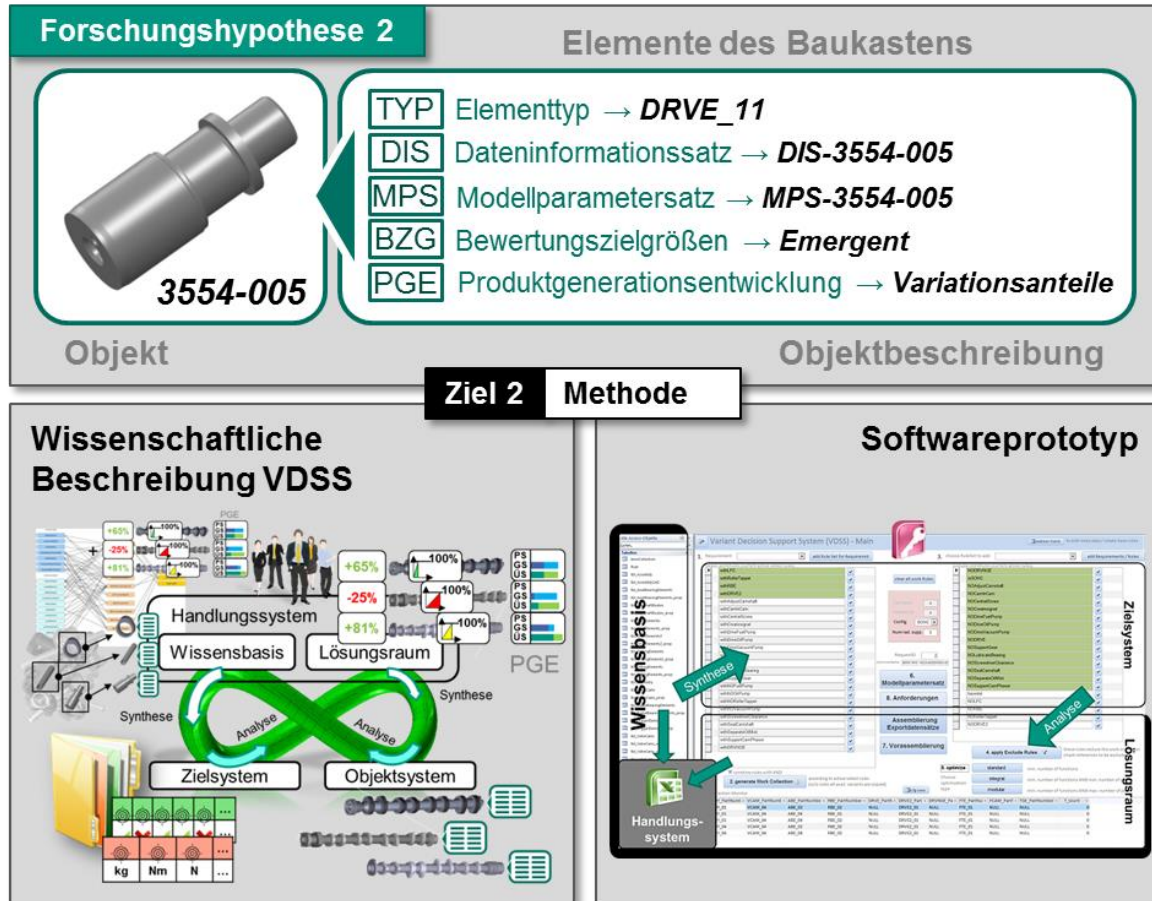


Abbildung 9-2: Zentrale Ergebnisse aus der Präskriptiven Studie

Grundvoraussetzung zur Erarbeitung von Ziel 2 war die durch die Forschungshypothese 2 adressierte Beschreibung der Baukastenelemente als korrespondierende Paare aus Objekt und Objektbeschreibung. Diese wurde in ein methodisches Gesamtverständnis zur Entscheidungsunterstützung für die Variantenauswahl auf Basis des erweiterten ZHO-Modells integriert.⁸⁰³ Das hieraus resultierenden Entscheidungsunterstützungssystem (VDSS)⁸⁰⁴ wurde im Rahmen einer prototypischen Softwareanwendung operationalisiert. Die Erstellung des Anwendungsprototyps verlief begleitend zur Produktanalyse, um die methodenbasierten Ergebnisse an konkreten Praxisbeispielen nach jeder Entwicklungsstufe auf Grundlage des produktspezifi-

⁸⁰¹ vgl. Abbildung 6-20 auf S. 215

⁸⁰² vgl. Kapitel 6.3.5

⁸⁰³ vgl. Kapitel 6.4

⁸⁰⁴ Entscheidungsunterstützungssystem: (engl.) Variant Decision Support System (VDSS)

schen Know-hows überprüfen zu können. Hierdurch wurde das Entscheidungsunterstützungssystem mit Hilfe des Softwareprototyps verifiziert, und die Gültigkeit der Forschungshypothese 2 nachgewiesen, da es mit dem Verständnis der Baukastenelemente als korrespondierende Paare bestehend aus Objekt und Objektbeschreibung möglich ist, für neue Kundenanfragen, die mit neuen Zielsystemen beschrieben werden, geeignete Elementkombinationen zu finden.

Deskriptive Studie 2

Im Rahmen der Deskriptiven Studie 2 wurde das Methodenpotential auf Grundlage des Softwareprototyps analysiert, um die Methode im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens zu evaluieren (Ziel 3). Hierzu wurde die nachfolgende Forschungshypothese 3 aufgestellt, die mit Hilfe von Forschungsfragen im Rahmen der Methodenevaluation überprüft wurde:

Forschungshypothese 3

Der Einsatz der Methode zur Variantenauswahl auf Grundlage einer Softwareanwendung unterstützt die Konzeptentwicklung in der Angebotsphase.

Zur Evaluation der Methode wurden einerseits mit Mitarbeitern einer Konstruktionsgruppe für Nockenwellensysteme semistrukturierte Interviews durchgeführt, um das Methodenpotential von Experten aus der Konstruktion zu bewerten. Hierzu wurde die prototypische Softwareanwendung den Interviewteilnehmern vorgestellt. Neben der Anwendung wurden auch die methodischen Hintergründe erläutert und diskutiert, um das Verständnis für den angedachten Nutzen und den Anwendungsbereich der Methode zu schaffen. Aus Sicht der Experten wurde die Anwendbarkeit der Methode in der Angebotsphase bestätigt. Darüber hinaus konnte sich auch die Mehrheit der Konstrukteure konkret einen Einsatz für die Variantenauswahl im Rahmen von Folgeprojekten vorstellen. In diesem Zusammenhang wurden auch die Risiken diskutiert, die beim Einsatz der Methode aus Sicht der Experten zu berücksichtigen sind. Hauptdiskussionpunkte hierzu waren einerseits die ausschließliche Verwendung von bereits serienprobierten Teilen sowie auf der anderen Seite die frühe Einbindung von Vorentwicklungsteilen in den Baukasten. Das Potential für einen Praxiseinsatz wurde abschließend aus Expertensicht als mittel bis hoch bewertet. Dabei ist für die Gewährleistung der Nutzbarkeit der Methodenanwendung aus Sicht der Experten entscheidend, dass die Methode in die bestehenden Prozessabläufe in der Angebotserstellungsphase integriert werden kann und keine Zusatzaufwände für die Konstruktionsmitarbeiter durch die Methodenanwendung entstehen.

Die Ergebnisse aus den Interviews wurden anschließend im Rahmen des zweiten Teils der Methodenevaluation durch retrospektive Methodenanwendung anhand von zwei abgeschlossenen Anfrageprojekten im Kontext des fallgebenden Zulieferunter-

nehmens nachgewiesen. Für die retrospektive Anwendung der Methode auf das erste Anfrageprojekt aus dem PKW-Bereich wurde gezeigt, dass mit Hilfe der kennwertbasierten Variantenbewertungen auf Basis von FIT-Bedingungen sowie den Variationsanteilen im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung, geeignete Lösungen aus einem bestehenden Baukasten gefunden werden können. Zur Realisierung einer vergleichenden Ergebnisdarstellung der gültigen Varianten, wurden diese absteigend, nach dem Grad der Überdeckung mit den Zielvorgaben, sortiert.⁸⁰⁵ Dabei deckten sich die Variantenempfehlungen aus den im Rahmen der retrospektiven Methodenanwendung erzeugten Variantenrankings mit den favorisierten Lösungen des ursprünglichen Projektverlaufs. Durch die retrospektive Methodenanwendung am Beispiel des PKW-Projektes ergab sich zudem ein realistisches Zeitpotential von rund 120 Konstruktionsarbeitsstunden, die für die Ausdetaillierung von Varianten aufgewendet wurden, die auf Basis der Variantenrankings eindeutig als ungeeignet identifiziert wurden. Das NFZ-Projekt diente der Untersuchung von Schwellenwerten, die auf Basis eines vorliegenden Variantenrankings Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise anzeigen. Ausschlaggebend bei der Entscheidung für oder gegen die Weiterverfolgung einer Variante war hierbei das Verhältnis aus Übernahme- und Gestaltvariation (ÜS/GS). Durch Einbeziehung der TOTAL-Bewertung, konnten durch die Analyse mehrerer Variantenrankings entsprechende Schwellenwerte definiert.⁸⁰⁶

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Interview-Studie sowie der retrospektiven Methodenanwendung zur Evaluation der Methode im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens (Ziel 3) wurde gezeigt, dass der Methodeneinsatz auf Basis einer Softwareanwendung die Variantenauswahl im Rahmen der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase unterstützen kann und damit aus Sicht des fallgebenden Unternehmens die Forschungshypothese 3 Gültigkeit hat. Bei der Erarbeitung der Ziele ergaben sich hieraus neue Fragen, die als Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsaktivitäten im abschließenden Kapitel dieser Arbeit diskutiert werden.

9.2 Ausblick

Aus dem Gesamtkontext der Arbeit ergeben sich aus Sicht des Autors drei Hauptanknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten. Zum einen wurden die Ziele der Arbeit im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens für Motorkomponenten verfolgt und die Methode zur Entscheidungsunterstützung anhand eines konkreten Leitbeispiels aus dem Unternehmensportfolio erarbeitet. Daher ergeben sich Ansatzpunkte für neue Forschungsaktivitäten aus der (1) Variation des Methodenkontexts.

⁸⁰⁵ vgl. beispielsweise das in Tabelle 8-3 auf S. 257 gezeigte Variantenranking

⁸⁰⁶ vgl. Tabelle 8-9 auf S. 269

Daran anknüpfend beschränkt sich in diesem Zusammenhang die Suche nach geeigneten Referenzprodukten auf die im Unternehmen verfügbaren Lösungen. Hieraus ergeben sich Ansatzpunkte hinsichtlich der (2) Weiterentwicklung der methodischen Suche nach geeigneten Referenzprodukten. Ferner liefern die Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung einen entscheidenden Beitrag für die Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl aus einer Menge an gültigen, abgeleiteten Varianten auf Basis eines Baukastens aus bestehenden Lösungen. Hierzu gibt es Überlegungen bezüglich der (3) Weiterentwicklung des mathematischen Grundmodells der PGE, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Variationsarten quantitativ beschreiben zu können.

Variation des Methodenkontext

Der Bedarf für die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Variantenauswahl im Rahmen der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase wurde im Kontext des fallgebenden Zulieferunternehmens festgestellt. Die Bedarfssituation wurde, neben teilnehmender Beobachtung des Autors als erfahrener Konstrukteur für Nockenwellensysteme, durch eine Fragebogen-Studie bestätigt, die in drei Konstruktionsabteilungen des Unternehmens durchgeführt wurde. Diese Konstruktionsabteilungen setzen sich jeweils mit unterschiedlichen Produkten auseinander. Die produktgruppenspezifische Auswertung der Fragebögen ergab hierbei, dass die Methode in der Konzeptentwicklung in der Angebotsphase zur Variantenauswahl für Kolbensysteme, Nockenwellensysteme und Zylinderkopfhaubensysteme angewendet werden kann. Hieraus leiten sich folgende, übergeordnete Fragen ab:

- FF4** Wie stellt sich das Methodenpotential in anderen Unternehmen mit anderen technischen Produkten dar?
- FF5** Kann die Methode zur Auswahl von Dienstleistungen eingesetzt werden?
- FF6** Wie lässt sich die Methode auf mechatronische Systeme übertragen?
- FF7** Für welche weiteren Phasen der Produktentstehung mit anderen Anforderungen an die Mechanismen zur Realisierung einer fundierten Entscheidungsunterstützung ist ein Einsatz der Methode denkbar?

Weiterentwicklung der Methode

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode können aus einer Menge an unternehmensintern verfügbaren Referenzprodukten auf Grundlage der Variationsanteile der PGE - Produktgenerationsentwicklung fallspezifisch geeignete Referenzprodukte identifiziert werden, z.B. Ventilknocken, die in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung geforderte Verdrehmomente sicher übertragen können. Hieraus ergibt sich das Potential hinsichtlich einer Weiterentwicklung der methodischen Suche nach geeigneten

Referenzprodukten um herauszufinden, wie Ventillnocken und andere Komponenten auf der Nockenwelle beispielsweise auch höhere Verdrehmomente ertragen können, indem zusätzlich zur vorhandenen Firmenexpertise weiterer Möglichkeiten innerhalb und auch außerhalb der eigenen Branche mit in die Betrachtung einbezogen werden. Wie in der Abbildung 9-3 angedeutet eignet sich möglicherweise der Einsatz von Mustern um zu erkennen, aus welchen anderen Bereichen fallspezifisch geeignete Referenzprodukte hervorgehen können.



Abbildung 9-3: Weiterentwicklung der methodischen Suche nach Referenzprodukten

Hieraus ergibt sich die nachfolgende Forschungsfrage mit Bezug auf die Weiterentwicklung der methodischen Suche nach geeigneten Referenzprodukten:

- FF8** Wie können bei der Suche nach fallspezifisch geeigneten Referenzprodukten zusätzlich zur vorhandenen Firmenexpertise und damit den unternehmensintern verfügbaren Lösungen weitere Möglichkeiten innerhalb und auch außerhalb der eigenen Branche mit einbezogen werden?

Variation des mathematischen Grundmodells der PGE

Das mathematische Grundmodell wurde entsprechend der Belange der Variantenentwicklung im Rahmen dieser Arbeit erweitert.⁸⁰⁷ Hiernach wurden die zur geometrischen Anpassung der bestehenden Elemente des Baukastens relevanten Parameter auf Basis des erweiterten Modells in die unterschiedlichen Variationsanteile klassifiziert. Für die Variation und Neukombination für neue Kundenzielsysteme wurden auf Elementebene die Variationsanteile mengenmäßig erfasst und auf Systemebene aggregiert. Die Verhältnisse der Variationsanteile geben dabei aus Sicht der Produktexpertise des betrachteten Unternehmens Aufschluss über Aufwand, Potential und Risiko der abgeleiteten Varianten. Bei der in dieser Arbeit vorgestellten Methode wurden zum quantitativen Vergleich der abgeleiteten Varianten geometriegebundene Produkteigenschaften (Masse, Oberflächen, Volumina, Rotationsmomente, Steifigkeiten, etc.) auf Basis von fallspezifisch variierten und neu kombinierten CAD-Modellen ermittelt. Durch das Verständnis der wechselseitigen Beziehungen zwi-

⁸⁰⁷ vgl. Kapitel 6.2

schen Anforderungen, festen Eigenschaften und Merkmalen sowie den emergenten Produkteigenschaften konnten variantenspezifische Bewertungszielgrößen (Kostenfaktoren, Drehmomente, etc.) quantifiziert werden.⁸⁰⁸ Die ermittelten Werte wurden anschließend hinsichtlich der Erfüllung der Kundenzielvorgaben analysiert und in variantenspezifische FIT-Bewertungen für vergleichende Zwecke überführt. Die in dieser Methode eingesetzten Kennwerte zur Entscheidungsunterstützung sind demnach zum einen die FIT-Bewertungen, die den Erfüllungsgrad mit dem Kundenzielelement quantifizieren, und zum anderen, die Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung, die, auf Grundlage der vorhandenen, produktspezifischen Firmenexpertise, die anbieterseitige Eignung der abgeleiteten Varianten beschreiben. Bislang gibt es jedoch keine direkte Kopplung zwischen den FIT-Bewertungen und den Variationsarten, d.h., dass sich die durch die Variation und Neukombination von bestehenden Lösungen emergierenden Bewertungszielgrößen nicht auf konkrete Übernahme- oder Gestaltvariationen des Modellparametersatzes zurückführen lassen. Es gibt demzufolge derzeit beispielsweise kein Maß für die kosten- oder aufwandsseitigen Auswirkungen von ermittelten Gleichanteilen. Hierzu genügt es nicht mehr, die Variationsanteile zu zählen. Vielmehr sind hierfür die Auswirkungen von variierten Parametern auf emergente Bewertungszielgrößen im Kontext des Gesamtsystems analytisch zu beschreiben. Am Beispiel des Kosteneinflusses werden für jeden Parameter entsprechende Kostenfunktionen zu hinterlegen sein, die, im Falle dessen Variation, die kostenseitigen Auswirkungen im Gesamtsystem zahlenmäßig bestimmen können. In weiterführenden Forschungsarbeiten wird in diesem Zusammenhang die nachfolgende Fragestellung zu klären sein:

- FF9** Lässt sich die PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS analytisch auf Grundlage eines mathematischen Modells beschreiben, um die Auswirkungen der Variationsanteile beim Übergang auf die neue Generation quantitativ im Kontext des Gesamtsystems berechnen zu können?

⁸⁰⁸ vgl. Abbildung 6-20 auf S. 215 und Abbildung 6-22 auf S. 219

10 Literaturverzeichnis

Abulawi 2012

ABULAWI, J.: *Ansatz zur Beherrschung der Komplexität von vernetzten 3DCAD-Modellen*. Hamburg, Helmut Schmidt Universität der Bundeswehr, Dissertation, 2012

acatech 2012

ACATECH ; ALBERS ; DENKENA & MATTHIESEN (Hrsg.): *Faszination Konstruktion – Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel (acatech STUDIE)* : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012

Albers 2010

ALBERS, A.: *Five Hypotheses and a Meta Model of Engineering Design Processes*. In: *8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE*. Ancona, Italy, 2010

Albers 2011

ALBERS, A.: *Der Entwickler im Zentrum des Systems der Produktentstehung: Integriertes Produktentstehungsmodell & X-in-the-Loop-Framework*. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*, 23. und 24. November 2011.

Albers, Behrendt, Klingler & Matros 2016

ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; KLINGLER, S. & MATROS, K.: *Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess*. In: LINDEMANN (Hrsg.) *Handbuch Produktentwicklung*. München : Carl Hanser Verlag, 2016 – ISBN 978-3-446-44518-5, S. 541–569

Albers & Braun 2011 a

ALBERS, A. & BRAUN, A.: *Der Prozess der Produktentstehung*. In: HENNING & MOELLER (Hrsg.) *Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München : Hanser, 2011, S. 5–30

Albers & Braun 2011 b

ALBERS, A. & BRAUN, A.: *A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes*. In: *International Journal of Product Development*. Bd. 15, Nr. 1/2/3, 2011, S. 6–25

Albers, Braun & Muschik 2010

ALBERS, A. ; BRAUN, A. & MUSCHIK, S.: *Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs in der Produktentstehung*. In: *Tag des Systems Engineering*, 2010

Albers, Burkardt, Meboldt & Saak 2005

ALBERS, A. ; BURKARDT, N. ; MEBOLDT, M. & SAAK, M.: *SPALTEN problem solving methodology in the product development*. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED'05*. Melbourne, August 15-18, 2005

Albers, Bursac & Rapp 2016

ALBERS, A. ; BURSAC, N. & RAPP, S.: *PGE - Product Generation Engineering- Case Study of the Dual Mass Flywheel*. In: *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2016*. Dubrovnik - Croatia, May 16 - 19, 2016, S. 791–800

Albers, Bursac & Scherer 2014

ALBERS, A. ; BURSAC, N. & SCHERER, H.: *Modelbased Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung*. In: *Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung Wi-GeP.*. Ausgabe 1. Frühjahrstagung in Enschede, 2014, S. 20–21

Albers, Bursac, Urbanec, Lüdcke & Rachenkova 2014

ALBERS, A. ; BURSAC, N. ; URBANEC, J. ; LÜDCKE, R. & RACHENKOVA, G.: *Knowledge Management in Product Generation Development – an empirical study*. In: KRAUSE ; PAETZOLD & WARTZACK (Hrsg.) *Proceedings of the 25th Symposium Design for X*. Bamberg, 7. und 8. Oktober, 2014, S. 13–24

Albers, Bursac & Wintergerst 2015 a

ALBERS, A. ; BURSAC, N. & WINTERGERST, E.: *Product Generation Development – Importance and Challenges from a Design Research Perspective*. In: *Proceedings of INASE Conferences 2015*, 2015 – ISBN 9781618042, S. 16–21

Albers, Bursac & Wintergerst 2015 b

ALBERS, A. ; BURSAC, N. & WINTERGERST, E.: *Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive*. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*. Stuttgart, 2015

Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

ALBERS, A. ; EBEL, B. & LOHMEYER, Q.: *System of objectives in complex product development*. In: *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE*. Karlsruhe, 2012

Albers, Gladysz, Kniel, Aschoff & Meyer 2016

ALBERS, A. ; GLADYSZ, B. ; KNIEL, J. ; ASCHOFF, M. & MEYER, A.: *Integration von Versuchsergebnissen in C&C²-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems*. In: *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*. 6.10. - 7.10.2016 in Rostock, 2016

Albers, Klingler & Ebel 2013

ALBERS, A. ; KLINGLER, S. & EBEL, B.: *Modeling Systems of Objectives in Engineering Design Practice*. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED 2013*, 2013

Albers & Lohmeyer 2012

ALBERS, A. & LOHMEYER, Q.: *Advanced Systems Engineering – Towards a Model-Based and Human-Centered Methodology*. In: HORVÁTH ; RUSÁK & BEHRENDT (Hrsg.) *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE*. Karlsruhe, 2012

Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

ALBERS, A. ; LOHMEYER, Q. & EBEL, B.: *Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects*. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED'11*. Bd. Vol.2. Copenhagen, Denmark, 2011, S. 256–265

Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger 2015

ALBERS, A. ; MATROS, K. ; BEHRENDT, M. & JETZINGER, H.: *Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess*. In: SPRINGER-VDI-VERLAG GMBH & CO.KG (Hrsg.) *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (2015), Nr. 06/2015, S. 74–81

Albers, Maul & Bursac 2013

ALBERS, A. ; MAUL, L. & BURSAC, N.: *Internal Innovation Communities from a User's Perspective: How to Foster Motivation for Participation*. In: ABRAMOVICI & STARK (Hrsg.) *Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference*. Bd. 5. Lecture Notes in Production Engineering : Springer, 2013 – ISBN 978-3-642-30816-1, S. 525–534

Albers & Meboldt 2007

ALBERS, A. & MEBOLDT, M.: *IPEMM – Integrated Product Development Process Management Model Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving*. In: *16th International Conference on Engineering Design ICED'07*. Paris, France, No. 537, 2007

Albers, Rapp, Birk & Bursac 2017

ALBERS, A. ; RAPP, S. ; BIRK, C. & BURSAC, N.: *Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*. Stuttgart, 2017

Albers, Reiß, Bursac & Richter 2016

ALBERS, A. ; REIß, N. ; BURSAC, N. & RICHTER, T.: *iPeM – integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering*. In: *Proceedings of the CIRP 26th Design Conference Innovative Product Creation*, 2016

Albers, Reiß, Bursac, Urbanec & Lüdcke 2014

ALBERS, A. ; REIß, N. ; BURSAC, N. ; URBANEC, J. & LÜDCKE, R. ; LAAKSO, M. & EKMAN, K. (Hrsg.): *Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application*. In: *Proceedings of NordDesign 2014 Conference*, 2014, S. 550–559.

Albers & Sadowski 2014

ALBERS, A. & SADOWSKI, E.: *The Contact and Channel Approach (C&C²-A) – relating a system's physical structure to its functionality*. In: CHAKRABARTI & BLESSING (Hrsg.) *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* : Springer, 2014, S. 151–171

Albers, Scherer, Bursac & Rachenkova 2015

ALBERS, A. ; SCHERER, H. ; BURSAC, N. & RACHENKOVA, G.: *Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies*. In: *Proceedings of the CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation*, 2015

Albers, Walch & Bursac 2016

ALBERS, A. ; WALCH, M. & BURSAC, N.: Entscheidungsunterstützung durch die Variationsanteile der Produktgenerationsentwicklung. In: SPRINGER-VDI-VERLAG GMBH & CO.KG (Hrsg.) *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (2016), Nr. 07/2016

Albers, Walch & Lohmeyer 2012

ALBERS, A. ; WALCH, M. & LOHMEYER, Q.: *Zielsystemorientiertes Variantenmanagement einbaufertiger Systembaugruppen*. In: KRAUSE ; PAETZOLD & WARTZACK (Hrsg.) *23. Symposium Design for X*. Bamberg, 2012, S. 187–198

Baumgart 2005

BAUMGART, I. M.: *Modularisierung von Produkten im Anlagenbau*, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2005

Becker 2005

BECKER, H.: *Auf Crashkurs - Automobilindustrie im globalen Veränderungswettbewerb. 2., aktualisierte Auflage*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005

Bertalanffy 1949

BERTALANFFY, L. VON: *Zu einer allgemeinen Systemlehre*. In: *Biologia Generalis*. Bd. 195, 1949, S. 114–129 (Nachdruck in Bleicher, K. (1972) *Organisation als System*. Gabler, Wiesbaden, S. 29–46)

Bertalanffy 1969

BERTALANFFY, L. VON: *General System Theory – Foundations, Development, Applications* : Revised Edition. George Braziller Inc, 1969 – ISBN 978-0-8076-0453-3

Blees 2011

BLEES, C.: *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. Hamburg-Harburg, Technische Universität, Dissertation, 2011

Blessing & Chakrabarti 2009

BLESSING, L. T. M. & CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Dordrecht ; Heidelberg [u.a.] : Springer-Verlag, 2009 – ISBN 978-1-84882-586-4

Blumöhr, Münch & Ukalovic 2011

BLUMÖHR, U. ; MÜNCH, M. & UKALOVIC, M.: *Variantenkonfiguration mit SAP. 2., aktualisierte und erw. Aufl.* Bonn : Galileo Press, 2011 – ISBN 978-3-8362-1681-4

Borowski 1961

BOROWSKI, K.-H.: *Das Baukastensystem in der Technik*. Hannover, Technische Hochschule, Dissertation, 1961

Braess, Breitling, Ehlers, Grawunder, Hackenberg, Liskowsky & Widmann 2013

BRAESS, H.-H. ; BREITLING, T. ; EHLERS, C. ; GRAWUNDER, N. ; HACKENBERG, U. ; LISKOWSKY, V. & WIDMANN, U.: *Produktentstehungsprozess*. In: BRAESS & SEIFFERT (Hrsg.) *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, ATZ/MTZ-Fachbuch. 7., aktual. Aufl.* Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013 – ISBN 3-658-01690-6

Braun 2013

BRAUN, A.: *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung - Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 72, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2013

Brich, Winter & Achleitner 2014

BRICH, S. ; WINTER, E. & ACHLEITNER, A.-K.: *C - F, Gabler-Wirtschaftslexikon*. Bd. 2. Wiesbaden : Springer Gabler, 2014

Brinkop 1999

BRINKOP, A.: *Variantenkonstruktion durch Auswertung der Abhängigkeiten zwischen den Konstruktionsbauteilen*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 1999

Brinkop 2016

BRINKOP, A.: *Marktführer Produktkonfiguration*. Oberschlettenbach : Brinkop Consulting, 2016

Brosius 2013

BROSIUS, F.: *SPSS 21. 1. Aufl.* Heidelberg : mitp, 2013 – ISBN 978-3-8266-9454-7

Bursac 2016

BURSAC, N.: *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 93, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2016

Cooper 1994

COOPER, R. G.: *Perspective: Third-Generation New Product Processes*. In: *Journal of Product Innovation Management*. Bd. 11, 1994, S. 3–14

Daenzer & Huber 1994

DAENZER, W. F. & HUBER, F.: *Systems Engineering: Methoden und Praxis*. 8. verbesserte. Aufl. Zürich : Verlag Industrielle Organisation, 1994

Danjou, Lupa & Köhler 2008

DANJOU, S. ; LUPA, N. & KÖHLER, P.: *Approach for Automated Product Modeling Using Knowledge Based Design Features*. In: *Computer-Aided Design & Applications*, 5, 2008, S. 622–629

Deubzer & Lindemann 2009

DEUBZER, F. & LINDEMANN, U.: *Networked product modelling – use and interaction of product models and methods during analysis and synthesis*. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design ICED'09*. Stanford, California, USA, 24 - 27 August, 2009

DIN 199-1 2002

DIN 199-1: *Deutsches Institut für Normung e.V.: Technische Produktdokumentation - CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Teil 1: Begriffe*. DIN 199-2 : 2002-03. Beuth Verlag. Berlin, 2002

DIN 2330 1993

DIN 2330: *Deutsches Institut für Normung e.V.: Begriffe und Benennungen - Allgemeine Grundsätze*. DIN 2330: 1993-12. Beuth Verlag. Berlin, 1993

DIN ISO 10007 2004

DIN ISO 10007: *Deutsches Institut für Normung e.V.: Qualitätsmanagement Leitfadens für Konfigurationsmanagement*. DIN ISO 10007 : 2004-12. Beuth Verlag. Berlin, 2004

Dinkelbach & Kleine 1996

DINKELBACH, W. & KLEINE, A.: *Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre: mit 26 Tabellen*. Berlin ; Heidelberg [u.a.] : Springer, 1996 – ISBN 978-3-540-61569-9

Dörner 1998

DÖRNER, D.: *Die Logik des Misslingens: strategisches Denken in komplexen Situationen*. Reinbek bei Hamburg : Rowohlt, 1998 – ISBN 978-3-499-19314-9

Dörner 2002

DÖRNER, D.: *Die Logik des Gelingens*. In: *Brandeins 07/02. Schwerpunkt: Entscheidung*, 2002, S. 108–112

Ebel 2015

EBEL, B.: *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 85, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2015

Eckert, Alink & Albers 2010

ECKERT, C. M. ; ALINK, T. & ALBERS, A.: *Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction*. In: *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2010*. Dubrovnik - Croatia, May 17 - 20, 2010

Ehrlenspiel 2003

EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 2., überarb. Aufl. München, Wien : Hanser, 2003 – ISBN 978-3-446-22119-2

Ehrlenspiel 2009

EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4. Aufl. München : Hanser, 2009 – ISBN 978-3-446-42013-7

Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl 2014

EHRENSPIEL, K. ; KIEWERT, A. ; LINDEMANN, U. & MÖRTL, M.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2014 – ISBN 978-3-642-41959-1

Eigner & Stelzer 2009

EIGNER, M. & STELZER, R.: *Product Lifecycle Management: Ein Leitfadens für Product Development und Life Cycle Management*. 2., neu bearbeitete. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009 – ISBN 978-3-540-68401-5

Eisenführ, Weber & Langer 2010

EISENFÜHR, F. ; WEBER, M. & LANGER, T.: *Rationales Entscheiden*. 5., überarb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010 – ISBN 978-3-642-02848-9

Engel 2008

ENGEL: *Credit portfolio risk : modelling, estimation and backtesting*, Universität Mannheim, Dissertation, 2008

Espejo, Schuhmann, Schwaninger & Bilello 1996

ESPEJO, R. ; SCHUHMAN, W. ; SCHWANINGER, M. & BILELLO, U. ; ESPEJO (Hrsg.): *Organizational transformation and learning : a cybernetic approach to management* : Chichester [u.a.] : Wiley, 1996 – ISBN 978-0-471-96182-6

Feldhusen & Gebhardt 2008

FELDHUSEN, J. & GEBHARDT, B.: *Product Lifecycle Management für die Praxis. Ein Leitfadens zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008 – ISBN 978-3-540-34008-9

Feldhusen, Nagarajah & Schubert 2010

FELDHUSEN, J. ; NAGARAJAH, A. & SCHUBERT, S.: *A data mining method for selecting the suitable existing product variant as a development base for a new order*. In: *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2010*. Dubrovnik - Croatia, May 17 - 20, 2010

Firchau, Franke, Huch & Menge 2002

FIRCHAU, N. L. ; FRANKE, H.-J. ; HUCH, B. & MENGE, M.: *Variantenmanagement: Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen erfolgreich beherrschen*. In: FRANKE ; HESSELBACH ; HUCH & FIRCHAU (Hrsg.) *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung*. München : Hanser Verlag, 2002, S. 1–25

Franke 1998

FRANKE, H.-J.: *Produkt-Variantenvielfalt - Ursachen und Methoden zu ihrer Bewältigung*. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.) *Effektive Entwicklung und Auftragsabwicklung variantenreicher Produkte. Tagung Würzburg 7. und 8. Oktober*. Bd. VDI-Berichte 1434. Düsseldorf : VDI Verlag, 1998 – ISBN 3-18-091434-3, S. 1–14

Gäfigen 1974

GÄFIGEN, G.: *Theorie der wirtschaftlichen Entscheidung: Untersuchungen zur Logik und Bedeutung des rationalen Handelns*. 3. Aufl. Tübingen : Mohr, 1974 – ISBN 978-3-16-336012-9

Gausemeier, Lanza & Lindemann 2012

GAUSEMEIER, J. ; LANZA, G. & LINDEMANN, U.: *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. München : Hanser Verlag, 2012

Girmscheid 2015

GIRMSCHIED, G.: *Angebots- und Ausführungsmanagement-prozessorientiert: Erfolgsorientierte Unternehmensführung / von Gerhard Girmscheid*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2015 – ISBN 978-3-642-55291-5

Gluchowski, Gabriel & Dittmar 2008

GLUCHOWSKI, P. ; GABRIEL, R. & DITTMAR, C.: *Management Support Systeme und Business Intelligence: computergestützte Informationssysteme für Fach- und Führungskräfte*. 2., vollst. überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008 – ISBN 978-3-540-23543-9

Grasmann 2000

GRASMANN, M.: *Produktkonfiguration auf Basis von Engineering-Data-Management-Systemen : eine Methode zum Aufbau und zur Pflege der Wissensbasis von Konfigurationssystemen und deren Einsatz in Verkaufsprozessen*. Paderborn, Universität Paderborn. Heinz Nixdorf Institut, Dissertation, 2000

Hall 1963

HALL, A. D.: *A methodology for systems engineering* : Princeton, N.J. [u.a.] : Van Nostrand, 1963

Henderson & Clark 1990

HENDERSON, R. & CLARK, K.: *Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms*. In: *Administrative science quarterly*, 1990, S. 9–30

Herlyn 2012

HERLYN, W.: *PPS im Automobilbau - Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten*. München : Carl Hanser Verlag, 2012 – ISBN 978-3-446-41370-2

Heylighen 1999

HEYLIGHEN, F.: The growth of structural and functional complexity during evolution. In: *The evolution of complexity* (1999), S. 17–44

Höhne & Schneider 1998

HÖHNE, G. & SCHNEIDER, H.: *Produktkonfiguration und Kostenprognose in frühen Entwurfsphasen*. In: *Effektive Entwicklung und Auftragsabwicklung variantenreicher Produkte. Tagung Würzburg 7. und 8. Oktober*. Bd. VDI Berichte 1434. Düsseldorf : VDI Verlag, 1998, S. 197–212

Homburg & Daum 1997

HOMBURG, C. & DAUM, D.: *Wege aus der Komplexitätsfalle*. In: *ZWF*. Nr. 7-8, 1997, S. 333–335

Hubka 1984

HUBKA, V.: *Theorie technischer Systeme: Grundlagen e. wiss. Konstruktionslehre*. 2., völlig neubearb. u. erw. Aufl. Berlin ; Heidelberg [u.a.] : Springer, 1984 – ISBN 978-0-387-12953-2

Hubka 2002

HUBKA, V.: *Specialized design sciences - questions for the future*. In: *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2002*. Dubrovnik - Croatia, May 14 - 17, 2002, S. 163–168

Hubka & Eder 1992

HUBKA, V. & EDER, W. E.: *Einführung in die Konstruktionswissenschaft: Übersicht, Modell, Anleitungen*. 1. Aufl. Berlin ; Heidelberg [u.a.] : Springer, 1992 – ISBN 978-3-540-54832-4

Jahrke 1987

JAHRKE, M.: *Kopplung qualitativer und quantitativer Theorien in der Entscheidungsunterstützung.*, *Technische Berichte der Fakultät für Mathematik und Informatik. Technical Report 8716*. Universität Passau, 1987

Jandeleit, Zirkel, Strohmeier & Vajna 2000

JANDELEIT, M. ; ZIRKEL, M. ; STROHMEIER, K. & VAJNA, S.: *Optimierung der Apparatekonstruktion durch integrierte Rechnerunterstützung*. In: VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.) *Produkte entwickeln im realen Umfeld - Was bringen neue Werkzeuge in 3D-CAD/CAM, EDM/PDM und Virtualisierung? Tagung München 9. und 10. November*. Bd. VDI-Berichte 1569. Düsseldorf : VDI Verlag, 2000 – ISBN 3-18-091569-2, S. 99–113

Jeschke 1997

JESCHKE, A.: *Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion*. Institut für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelementem (Hrsg.) Bericht Nr. 52, TU Braunschweig, Dissertation, 1997

Jonas & Krause 2011

JONAS, H. & KRAUSE, D.: *Strategic planning for modular product families*. In: *ICED11*. 15 - 18 August 2011, Technical University of Denmark, 2011

Jörg 2005

JÖRG, M.: *Ein Beitrag zur ganzheitlichen Erfassung und Integration von Produkthanforderungen mit Hilfe linguistischer Methoden*, Forschungsberichte aus dem Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2005

Kersten 1999

KERSTEN, W.: *Wirksames Variantenmanagement durch Einbindung in den Controlling- und Führungsprozess im Unternehmen*. In: *Plattformkonzepte auch für Kleinserien und Anlagen? Tagung Stuttgart 12. und 13. Oktober*. Bd. VDI-Berichte 1510. Düsseldorf : VDI Verlag, 1999 – ISBN 3-18-091510-2

Kipp, Bleeß & Krause 2010

KIPP, T. ; BLEES, C. & KRAUSE, D.: *Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. In: *Beiträge zum 21. DfX-Symposium*. Hamburg : TuTech Verlag, 2010

Kläger 1993

KLÄGER, R.: *Modellierung von Produktanforderungen als Basis für Problemlösungsprozesse in intelligenten Konstruktionssystemen*, 1993 – ISBN 3-86111-622-7

Klingler 2017

KLINGLER, S.: *Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 101, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2017

Koller 1994

KOLLER, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. 3., völlig neubearb. und erw. Aufl. Berlin ; Heidelberg [u.a.] : Springer, 1994 – ISBN 978-3-540-57928-1

Krusche 2000

KRUSCHE, T.: *Strukturierung von Anforderungen für eine effiziente und effektive Produktentwicklung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2000

Laux, Gillenkirch & Schenk-Mathes 2014

LAUX, H. ; GILLENKIRCH, R. M. & SCHENK-MATHES, H. Y.: *Entscheidungstheorie*. 9., vollst. überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Gabler, 2014 – ISBN 978-3-642-55258-8

Lindemann 2009

LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte : Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., . Aufl. Dordrecht : Springer, 2009 – ISBN 978-3-642-01422-2

Lindemann & Maurer 2006

LINDEMANN, U. & MAURER, M. S.: *Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte*. In: LINDEMANN ; REICHWALD & ZAEH (Hrsg.) *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006 – ISBN 978-3-540-25506-2

Lindemann & Reichwald 2006

LINDEMANN, U. & REICHWALD, R. ; ZAEH (Hrsg.): *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006 – ISBN 978-3-540-25506-2

Lingnau 1994

LINGNAU, V.: *Variantenmanagement: Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie*. Bd. 58, Betriebswirtschaftliche Studien. Berlin : Erich Schmidt, 1994 – ISBN 3-503-03619-9

Link & Hildebrand 1993

LINK, J. & HILDEBRAND, H.: *Database Marketing und Computer Aided Selling*. München : Vahlen, 1993

Lohmeyer 2013

LOHMEYER, Q.: *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 59, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2013

Lutz 2012

LUTZ, C.: *Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte: Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme in die Konstruktion*. München : Dr. Hut, 2012 – ISBN 978-3-8439-0299-1

Machau, Zhou & Lang 2005

MACHAU, N. ; ZHOU, H. & LANG, R.: *Verfahren zur Konfigurierung eines Produktes oder einer Produktkombination auf einem PC*. EP 1 251 444 B1. Patentinhaber Firma FESTO AG & Co. Patenterteilung des Europäischen Patentamtes 12.10.2005.

MAHLE 2013

MAHLE GMBH (Hrsg.): *Ventiltrieb: Systeme und Komponenten*. 1. Aufl. Wiesbaden : Springer Fachmedien GmbH, 2013 – ISBN 978-3-8348-2499-8

Mantwill 2014

MANTWILL, F.: *Es muss uns gelingen!* In: SPRINGER-VDI-VERLAG GMBH & CO.KG (Hrsg.) *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (2014), Nr. 02/2014

Marxen 2014

MARXEN, L.: *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 74, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2014

Matthiesen 2002

MATTHIESEN, S.: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2002

Maurer 2007

MAURER, M. S.: *Structural awareness in complex product design*. Dr. Hut Verlag München. ISBN: 978-3-89963-632-1, Technische Universität München, Dissertation, 2007

Meboldt 2008

MEBOLDT, M.: *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung : als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 29, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), 2008

Mechler 1994

MECHLER: *Lernfähige, rechnergestützte Entscheidungsunterstützungssysteme*, Universität Mannheim, Dissertation, 1994

Menk 2007

MENK, K. B.: Produktkonfiguration – auch sinnvoll für den Mittelstand? (2007), Nr. 11/12, S. 19–21

Mertens, Borkowski & Geis 1990

MERTENS, P. ; BORKOWSKI, V. & GEIS, W.: *Status der Einführung von Expertensystemen in die Praxis*. In: BEHRENDT (Hrsg.) *Angewandte Wissensverarbeitung*. München, 1990, S. 311–329

Muschik 2011

MUSCHIK, S.: *Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering. Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung*. Karlsruhe, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2011

Nagarajah 2013

NAGARAJAH, A.: *Methodisches Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung*. In: FELDHUSEN & GROTE (Hrsg.) *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2013 – ISBN 978-3-642-29568-3, S. 319–341

Negele 1998

NEGELE, H.: *Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung*, Technische Universität München, Dissertation, 1998

Oliver Wyman & VDA 2012

OLIVER WYMAN & VDA: *FAST 2025 – Massiver Wandel in der automobilen Wertschöpfungsstruktur, Gemeinsame Presseinformation von Oliver Wyman und VDA, 13. November 2012, www.oliverwyman.de*. Berlin/ München, 2012

Otte, Otte & Kaiser 2004

OTTE, R. ; OTTE, V. & KAISER, V.: *Data Mining für die industrielle Praxis*. München ; Wien : Hanser, 2004

Pahl & Beitz 1993

PAHL, G. & BEITZ, W.: *Konstruktionslehre : Methoden und Anwendung*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest : Springer, 1993 – ISBN 978-3-540-56194-1

Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007

PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. & GROTE, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 7. Auflage. Aufl. Berlin : Springer, 2007 – ISBN 978-3-540-34060-7

Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2013

PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. & GROTE, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstrue: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin; Heidelberg : Springer Vieweg, 2013 – ISBN 978-3-642-29568-3

Patzak 1982

PATZAK, G.: *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme : Grundlagen, Methoden, Techniken / G. Patzak*. Berlin [u.a.] : Springer-Verlag, 1982 – ISBN 3-540-11783-0

Ponn & Lindemann 2011

PONN, J. C. & LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte : Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungslosungen*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011 – ISBN 978-3-642-20580-4

Pulm 2004

PULM, U.: *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*, Technische Universität München, Dissertation, 2004

Rapp 1999

RAPP, T.: *Produktstrukturierung*, Universität St. Gallen, Dissertation, 1999

Rehfeldt 2013

REHFELDT, M. D.: *Koordination der Auftragsabwicklung: Verwendung von unscharfen Informationen*. Gabler Edition Wissenschaft : Springer-Verlag, 2013 – ISBN 3-663-08655-0

Reichwald, Moser, Schlichter, Stegmann & Leckner 2006

REICHWALD, R. ; MOSER, K. ; SCHLICHTER, J. ; STEGMANN, R. & LECKNER, T.: *Der Interaktions- und Kaufprozess für individualisierte Produkte*. In: LINDEMANN ; REICHWALD & ZAEH (Hrsg.) *Individualisierte Produkte — Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 117–127

Renner 2007

RENNER, I.: *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*, Technische Universität München, Dissertation, 2007

Riesener 2015

RIESENER, M.: *Ähnlichkeitsbasierte Produktkonfiguration im Maschinenbau*. Aachen, RWTH, Dissertation, 2015

Rockart & DeLong 1988

ROCKART, J. F. & DELONG, D. W.: *Executive Support Systems - The Emergence of Top Management Computer Use*. Homewood (Ill.), 1988

Ropohl 1975

ROPOHL, G.: *Einleitung in die Systemtechnik*. In: ROPOHL (Hrsg.) *Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1975, S. 1–77

Ropohl 2009

ROPOHL, G.: *Allgemeine Technologie : Eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarb. Aufl. München : 2. Aufl. ersch. im Hanser-Verl., 2009 – ISBN 978-3-86644-374-7

Saak 2007

SAAK, M.: *Entwicklung eines Konzeptes und eines Prototypen für ein rechnergestütztes Werkzeug zum effizienten Einsatz der Problemlösungsmethodik „SPALTEN“*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 23, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2007

Scheer 2006

SCHAEER, C.: *Kundenorientierter Produktkonfigurator : Erweiterung des Produktkonfigurator-Konzeptes zur Vermeidung kundeninitiiertter Prozessabbrüche bei Präferenzlosigkeit und Sonderwünschen in der Produktspezifikation*. Institut für Wirtschaftsinformatik. Logos-Verlag, Berlin, Universität Mainz, Dissertation, 2006

Schmalenbach 2013

SCHMALENBACH, H.: *Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 68, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2013

Schömann 2012

SCHÖMANN, S. O. ; RINGLSTETTER (Hrsg.): *Grundlagen der Automobilindustrie mit Fokus auf die Rolle der Produktentwicklung - Managementkonzepte vor dem Hintergrund gewandelter Herausforderungen*, Schriften zur Unternehmensentwicklung. 1. Aufl. Wiesbaden : Springer Fachmedien GmbH, 2012

Schönsleben 2011

SCHÖNSLEBEN, P.: *Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*. 6., bearbeitete und erweiterte. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2011 – ISBN 978-3-642-20381-7

Schubert, Nagarajah & Feldhusen 2011

SCHUBERT, S. ; NAGARAJAH, A. & FELDHUSEN, J.: *An approach for more efficient variant design processes*. In: *ICED11*. 15 - 18 August 2011, Technical University of Denmark, 2011

Schuh 1989

SCHUH, G.: *Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten: ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten*, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1989

Schuh 2005

SCHUH, G.: *Produktkomplexität managen: Strategien, Methoden, Tools*. 2., überarb. und erw. Aufl. München, Wien : Hanser, 2005 – ISBN 978-3-446-40043-6

Schulte 1995

SCHULTE, C.: *Komplexitätsmanagement*. In: CORSTEN (Hrsg.) *Handbuch der Unternehmensführung* : Gabler, 1995, S. 757–765

Schumpeter 1939

SCHUMPETER, J.: *Theorie der Wirtschaftlichen Entwicklung*. Leipzig : Duncker & Humblot, 1939

Sedchaicharn 2010

SEDCHAICHARN, K.: *Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 45, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2010

Simon 1994

SIMON, H. A.: *Die Wissenschaften vom Künstlichen*. 2. Aufl. Wien ; New York : Springer, 1994 – ISBN 978-3-211-82629-4

Spur & Krause 1997

SPUR, G. & KRAUSE, F.-L.: *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. München, Wien : Hanser, 1997 – ISBN 978-3-446-19176-1

Stachowiak 1973

STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien [u.a.] : Springer, 1973 – ISBN 978-3-211-81106-1

Stechert 2010

STECHERT, C.: *Modellierung komplexer Anforderungen*. Bericht Nr. 75, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2010

Suh 2001

SUH, N. P.: *Axiomatic design: advances and applications*. New York : Oxford University Press, 2001 – ISBN 0-19-513466-4

Vajna, Bley, Hehenberger, Weber & Zeman 2009

VAJNA, S. ; BLEY, H. ; HEHENBERGER, P. ; WEBER, C. & ZEMAN, K.: *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. 2., völlig neu bearbeitete. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009 – ISBN 978-3-540-36039-1

VDI 2206 2004

VDI 2206: *Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Richtlinie VDI 2206*. Beuth Verlag, 2004

VDI 2219 2002

VDI 2219: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung. Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. Richtlinie VDI 2219*. Beuth Verlag, 2002

VDI 2221 1993

VDI 2221: *Verein Deutscher Ingenieure: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Richtlinie VDI 2221*. Beuth Verlag, 1993

VDI 1976

VDI, (HRSG.): *Elektronische Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung und -steuerung VI. Begriffszusammenhänge, Begriffsdefinitionen*. Bd. VDI Taschenbuch T 77. Düsseldorf : VDI Verlag, 1976

Walch & Albers 2014

WALCH, M. & ALBERS, A.: *Entscheidungsunterstützung bei der kunden- und anbiertgerechten Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotsdefinition in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion*. In: *Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess*. 12. *Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014*. 16. und 17. Oktober in Bayreuth, 2014

Weber 2012

WEBER, C.: *Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz*. In: KRAUSE ; PAETZOLD & WARTZACK (Hrsg.) 23. *Symposium Design for X*. Bamberg, 2012, S. 25–62

Wenzelmann, Plass & Gausemeier 2014

WENZELMANN, C. ; PLASS, C. & GAUSEMEIER, J.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen* : Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014 – ISBN 978-3-446-43842-2

Werner 1992

WERNER, L.: *Entscheidungsunterstützungssysteme : ein problem- und benutzerorientiertes Management-Instrument, Schriftenreihe Handeln und Entscheiden in komplexen ökonomischen Situationen*. Heidelberg : Physica-Verl., 1992 – ISBN 978-3-7908-0637-3

Wintergerst 2015

WINTERGERST, E.: *Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 86, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2015

Wynn 2007

WYNN, D. C.: *Model-Based Approaches to Support Process Improvement in Complex Product Development*. UK, University of Cambridge, Dissertation, 2007

Wynn, Eckert & Clarkson 2007

WYNN, D. C. ; ECKERT, C. M. & CLARKSON, P. J.: *Modelling Iterations in Engineering Design*. In: *16th International Conference on Engineering Design ICED'07*. Paris, France, No. 561, 2007

Zangemeister 1976

ZANGEMEISTER, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik* : Wittemann, 1976

Zingel 2013

ZINGEL, C.: *Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips*. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 70, ISSN: 1615-8113, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2013

Zschocke 1995

ZSCHOCKE, D.: *Modellbildung in der Ökonomie: Modell - Information - Sprache*. München : Vahlen, 1995 – ISBN 978-3-8006-1962-7

11 Anhang

11.1 Anhang zu Kapitel 5

11.1.1 Fragen zur Fragebogen-Studie

Zur Durchführung der quantitativen Mitarbeiterbefragung mit qualitativen Anteilen (Mai bis September 2014) wurden nachfolgende drei Fragebögen erstellt, die in Papierform ausgegeben wurden.

- **Basisfragebogen V1.3** für Produktgruppe 2 (Nockenwellensysteme)
- **Fragebogen V1.31** wurde von Produktgruppe 1 (Kolbensysteme) bearbeitet: Umfang des Fragenblocks zur technischen Unterstützung reduziert sowie Reihenfolge der Blöcke aktualisiert, so dass der Bogen mit Fragen zum Tätigkeitsumfeld endet.
- **Fragebogen V1.32** wurde von Produktgruppe 3 (Zylinderkopfhaubensysteme) bearbeitet: Reihenfolge entsprechend V1.31 und Umfang des Fragenblocks zur technischen Unterstützung entsprechend des Basisfragebogens V1.3.

Die Zuordnungen der Fragen zu den entsprechenden Fragebögen und Produktgruppen sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen.

	V1.3	V.131	V1.32	Fragebogen Produktgruppe
Block	1	4	4	Fragen zum Tätigkeitsumfeld Abschließende Fragen zur Konstruktionstätigkeit
Frage	1	10	14	Mit welchen Produkten habe Sie in Ihrer Tätigkeit als Konstrukteur zu tun?
Frage	2	11	15	Wie viele Jahre Berufserfahrung haben Sie als Konstrukteur?
Frage	3	12	16	Was charakterisiert die Produkte, mit denen Sie zu tun haben?
Frage	4	13	17	Wie schätzen Sie die Anteile der Projekt- und Konstruktionstypen im Rahmen Ihrer Tätigkeit ein?

Tabelle 11-1: Zuordnung der Fragen zu den Fragebögen und den Produktgruppen (Teil 1/4)

	V1.3	V.131	V1.32	Fragebogen
	2	1	3	Produktgruppe
Block	2	1	1	Vermeidbare (unnötige) Konstruktionsaktivitäten in der Angebotsphase
Frage	5	1	1	Wie gut trifft die nachfolgende Aussage zu?
Frage	6	2	2	Welche der nachfolgenden Faktoren führen verstärkt zu vermeidbaren (unnötigen) Konstruktionsaktivitäten (Änderungen, Varianten) während der Angebotsphase und erhöhen demnach die Unsicherheit bei der Festlegung der kunden- und anbietersgerechten Konstruktion?
Frage	7	3	3	Gibt es einen Einfluss des Zeitdrucks und der Komplexität der Konstruktionsaufgabe auf den Umfang an unnötigen Konstruktionsaktivitäten bei der Designfestlegung?
Frage	8	4	4	Zu welchem Zeitpunkt in der Designfestlegung bzw. bei welchem Reifegrad der Konstruktion wird häufig eine Änderungsentscheidung gefällt, d.h., welche Reifegrade reichen aus, um eine Änderungsentscheidung treffen zu können?
Frage	9	5	5	Von wem gehen Änderungen aus?
Block	3	3	3	Charakteristika unnötiger (vermeidbarer) Konstruktionsaktivitäten
Frage	10	7	11	Was sind Ihrer Meinung nach Merkmale von unnötigen (vermeidbaren und damit nicht zielführenden) Konstruktionsaktivitäten?
Frage	11	8	12	Wie treffen die nachfolgenden Aussagen Ihrer Meinung nach zu?
Frage	12	9	13	Wie lassen sich Ihrer Meinung nach unnötige Konstruktionsaktivitäten beschreiben und was könnte vielleicht ein geeigneter Kennwert sein um diese rückwirkend erkennen zu können?

Tabelle 11-2: Zuordnung der Fragen zu den Fragebögen und den Produktgruppen (Teil 2/4)

	V1.3	V.131	V1.32	Fragebogen
	2	1	3	Produktgruppe
Block	4	2	2	Technische Unterstützung zur Reduzierung unnötiger Konstruktionsaktivitäten
Frage	13	6	6	Zur Steigerung der Effizienz und der Qualität der Variantenauswahl im Rahmen der Anpassungs- und Variantenkonstruktion wäre eine unterstützendes Werkzeug, mit dessen Hilfe die Unsicherheit bei der Lösungsauswahl reduziert werden kann, um unnötige Iterationen im Sinne von redundanten bzw. häufig wiederkehrenden Konstruktionstätigkeiten zu minimieren, hilfreich.
Frage	14	-	7	Fänden Sie es sinnvoll ein Werkzeug zu haben, das gemäß vorheriger Beschreibung auf Grundlage von Benutzereingaben konstruktiven Lösungen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten anpasst, zu neuen Varianten kombiniert und auf deren Deckungsgrad mit den Kundenanforderungen hin bewertet?
Frage	15	-	8	Wie schätzen Sie das Potential eines solchen Werkzeuges im Hinblick auf die Entscheidungsfindung im Rahmen der Anpassungs- und Variantenkonstruktion ein?
Frage	16	-	9	Könnten Sie sich vorstellen, ein solches Werkzeug für die Entscheidungsunterstützung in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion einzusetzen?
Frage	17	-	10	Wodurch zeichnet sich die Realisierung einer zukünftigen Anwendung aus?

Tabelle 11-3: Zuordnung der Fragen zu den Fragebögen und den Produktgruppen (Teil 3/4)

	V1.3	V.131	V1.32	Fragebogen
	2	1	3	Produktgruppe
Block	4	4	4	Technische Unterstützung Abschließende Fragen zur Konstruktionstätigkeit
	18	14	18	Hier ist Raum für Kritik und alles das, was Sie vielleicht vermisst haben oder sonst noch zur vorgeschlagenen toolbasierten Entscheidungsunterstützung oder auch allgemein zur Umfrage oder Umfrageinhalten gerne noch loswerden möchten.
	19	15	19	Freiwillige Angaben

Tabelle 11-4: Zuordnung der Fragen zu den Fragebögen und den Produktgruppen (Teil 4/4)

11.1.2 Basisfragebogen

Umfrage zu vermeidbaren bzw. unnötigen Konstruktionsaktivitäten in der Angebotserstellungsphase bei der kunden- und anbietersgerechten Designfestlegung

Sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

im Rahmen meiner berufsbegleitenden Promotion in Kooperation mit dem IPEK Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) untersuche ich, wie man uns als Konstrukteure bei der situationsgerechten Variantenauswahl, basierend auf existierenden Lösungen, effizient unterstützen kann. Hierbei liegt das Interesse darin, wie sich bestehende Konstruktionen aus vorangegangener Entwicklungsprojekte an neue Kundenanfragen anpassen lassen, um dem Kunden innerhalb der geforderten Zeiträume kunden- und anbietersgerechte Varianten präsentieren zu können.

Die Designfestlegung ist dabei ein sehr unsicherheitsbehafteter Prozess da er durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird. Die Unsicherheit bei der Festlegung der passenden Lösung führt deshalb häufig dazu, dass mehrere, anfänglich in Frage kommende Varianten konstruiert werden, um sich mit zunehmendem Reifegrad bei der Detaillierung der favorisierten Varianten mit hinreichender Sicherheit auf eine Lösung letztlich festlegen zu können.

Ziel der Umfrage ist es, die Sicht der Konstruktionsmitarbeiter im Hinblick auf unnötige bzw. vermeidbare Designaktivitäten im Rahmen der Anpassungs- und Varianten-

tenkonstruktionen zu erfassen, um daraus Schlüsse im Hinblick auf die Bedarfssituation und die Effizienzsteigerungspotentiale zu ziehen.

Hauptfragestellung: Gibt es in den Konstruktionsabteilungen aus Sicht der Mitarbeiter Aktivitäten die hätten vermieden werden können und was charakterisiert diese Aktivitäten.

Zielgruppe: Konstrukteure die mit Konstruktionen zu tun haben, die sich durch Konstruktionselemente auszeichnen die untereinander in vernetzten Beziehungen und Abhängigkeiten stehen, beispielsweise Einzelteile in Baugruppen oder Designfeatures in Einzelteilen.

Konstruktionstätigkeit und zeitliche Eingrenzung: Anpassungs- und Variantenkonstruktion in der Angebotserstellungsphase auf Basis bestehende Lösungen.

Durchführung und Struktur der Umfrage: Die Mitarbeiterbefragung ist in 4 Blöcke untergliedert und umfasst 19 Hauptfragen mit Unterfragen. Der zeitliche Aufwand zur Bearbeitung beträgt ca. 35 Minuten. Bitte die ausgefüllten Bögen per Hauspost zurückschicken.

Begriffserläuterungen

- (1) **Varianten- und Anpassungskonstruktion:** Bestehende Lösungen werden für neue Kundenanfragen als Vorlagen herangezogen und angepasst, um damit neue Varianten für neue Kunden abzuleiten.
- (2) **Angebotsphase (in der Varianten- und Anpassungskonstruktion):** Zeitraum von der Bekanntgabe der Angebotsanfrage bis zur Angebotsabgabe beim Kunden.
- (3) **Anbietergerechtes Design:** Design ist ein MAHLE-Design und demnach mit den vorhandenen Ressourcen realisierbar
- (4) **Interne Variantenvielfalt:** Varianten die intern (nötiger oder unnötiger Weise) konstruiert werden bis die Lösung gefunden ist, die der Kunde und wir als MAHLE haben möchten.
- (5) **Konstruktionsaktivitäten:** Hierunter werden in diesem Zusammenhang hauptsächlich Änderungen (Versionierung) und die Variantenerstellung mit entsprechender Datenpflege und Dokumentation verstanden.
- (6) **Einzelteil und Baugruppe:** Die Abgrenzung zwischen Einzelteil und Baugruppe orientiert sich an der CAD-Struktur und nicht am verkaufsfertigen Zustand. Eine Nockenwelle die aus gefügten Einzelteilen gebaut wurde, wird als Baugruppe verstanden, auch wenn das Produkt dem Kunden als ein Teil verkauft wird und sich nicht zerstörungsfrei in seine Einzelbestandteile zerlegen lässt.

Konstruktionstyp	0 %	< 10 %	10 - 25 %	26 - 50 %	51 - 75 %	> 75 %
Neukonstruktion						
Anpassungs- und Variantenkonstruktion auf Basis bestehender Vorarbeiten						

BLOCK 2: Vermeidbare (unnötige) Konstruktionsaktivitäten in der Angebotsphase

(5) *Wie gut trifft die nachfolgende Aussage zu?*

In der Angebotsphase kommt es bei der kunden- und anbietergerechten Designfestlegung ...	Stimme völlig zu	Stimme eher zu	Stimme eher weniger zu	Stimme nicht zu	Keine Angabe	Bemerkung
... zu vermeidbaren bzw. unnötigen Konstruktionsaktivitäten.						

(6) *Welche der nachfolgenden Faktoren führen verstärkt zu vermeidbaren (unnötigen) Konstruktionsaktivitäten (Änderungen, Varianten) während der Angebotsphase und erhöhen demnach die Unsicherheit bei der Festlegung der kunden- und anbietergerechten Konstruktion?*

Zielkonflikte und Unsicherheiten bei der Konstruktionsfestlegung basieren auf ...	Stimme völlig zu	Stimme eher zu	Stimme eher weniger zu	Stimme nicht zu	Keine Angabe	Bemerkung
... vagen bzw. unscharfen Zielvorstellungen auf Kundenseite.						
... vagen bzw. unscharfen internen Zielvorstellungen der involvierten Abteilungen.						
... internen Interessenskonflikten innerhalb des Projektteams.						
... verfrühtem Konstruktionsbeginn trotz vagem Informationsstand.						
Ergänzung						
Ergänzung						

Vermeidbare Konstruktionsaktivitäten basieren auf dem Informationsaustausch durch ...

	<i>Stimme völlig zu</i>	<i>Stimme eher zu</i>	<i>Stimme eher weniger zu</i>	<i>Stimme nicht zu</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
... kundenseitig unvollständigen Informationsumfang						
... qualitativ ungenügende Kundendaten.						
... tragen Informationsaustausch zum Kunden.						
... tragen internen Informationsfluss.						
... intransparente Ablage von verwendbaren Vorarbeiten.						
Ergänzung						
Ergänzung						

Unnötige Änderungen und Varianten basieren auf voreiligem Konstruktionsbeginn infolge von Zeitdruck durch ...

	<i>Stimme völlig zu</i>	<i>Stimme eher zu</i>	<i>Stimme eher weniger zu</i>	<i>Stimme nicht zu</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
... enge Zeitvorgaben des Kunden.						
... internen Zeitbedarf von Eingang der Kundenanfrage bis zur Freigabe der Konstruktionsaufgabe.						
... hohe Komplexität der Konstruktionsaufgabe.						
... hohe Auslastung durch vorliegende Auftragslage.						
Ergänzung						
Ergänzung						

Änderungen werden durch die Projektorganisation verursacht bei ...

	<i>Stimme völlig zu</i>	<i>Stimme eher zu</i>	<i>Stimme eher weniger zu</i>	<i>Stimme nicht zu</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
...						
... abteilungsübergreifenden Projekten.						
... geschäftsbereichsübergreifenden Projekten.						
... global ausgerichteten Projekten.						
Ergänzung						
Ergänzung						

Vermeidbarer Mehraufwand durch verwendete Referenzdaten, ...	<i>Stimme völlig zu</i>	<i>Stimme eher zu</i>	<i>Stimme eher weniger zu</i>	<i>Stimme nicht zu</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
... bei denen aufgrund der Dokumentation zu Konstruktionsbeginn nicht erkennbar war, dass diese nur bedingt als Vorlage geeignet sind.						
... die strukturell komplex sind.						
... die komplex sind infolge stetiger Erweiterung und Anpassung.						
Ergänzung						
Ergänzung						

(7) *Gibt es einen Einfluss des Zeitdrucks und der Komplexität der Konstruktionsaufgabe auf den Umfang an unnötigen Konstruktionsaktivitäten bei der Designfestlegung?*

Wie beurteilen Sie nachfolgende Zusammenhänge?	<i>stark</i>	<i>mittel</i>	<i>gering</i>	<i>keinen</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
Zeitdruck und Unsicherheit bei der Lösungsfestlegung						
Komplexität der Konstruktionsaufgabe und Unsicherheit bei der Lösungsfestlegung						
Konstruktionsumfang bis zur Lösungsfestlegung und Unsicherheit bei der Lösungsfestlegung						

(8) *Zu welchem Zeitpunkt in der Designfestlegung bzw. bei welchem Reifegrad der Konstruktion wird häufig eine Änderungsentscheidung gefällt, d.h., welche Reifegrade reichen aus, um eine Änderungsentscheidung treffen zu können?*

Änderungsentscheidung auf Grundlage ...	<i>häufig</i>	<i>gelegentlich</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
... einer Gesamtsystementwurfszeichnung						
... Entwurfszeichnungssatz						
... 3D Entwürfen						
... Preisfragezeichnungen						
... einer verkaufsfertigen Detailzeichnung						
... Ausdetaillierter Zeichnungssatz						
... Gleichteilstrategie						
Ergänzung						
Ergänzung						

(9) Von wem gehen Änderungen aus?

Änderungsaufträge durch ...	<i>häufig</i>	<i>gelegentlich</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
Konstruktion selbst						
Projektleitung						
Kunde						
Prozesstechnik						
Einkauf						
Werk						
Prototypenbau						
Ergänzung						
Ergänzung						

BLOCK 3: Charakteristika unnötiger (vermeidbarer) Konstruktionsaktivitäten

(10) Was sind Ihrer Meinung nach Merkmale von unnötigen (vermeidbaren und damit nicht zielführenden) Konstruktionsaktivitäten?

Unnötige Konstruktionsaktivitäten ...	<i>Trifft völlig zu</i>	<i>Trifft eher zu</i>	<i>Trifft eher weniger zu</i>	<i>Trifft nicht zu</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
... sind redundante Konstruktionsumfänge, die gemacht werden, obwohl es bereits geeignete Vorarbeiten dazu gibt.						
... sind Vor- und Zurückänderungen.						
... sind Arbeiten, die zum Zeitpunkt nicht relevant waren und durch eine unzureichende Dokumentation auch für spätere Wiederverwendung nicht genutzt werden können.						
... sind solche, aus denen keinerlei Erkenntnisse für Folgeaktivitäten gewonnen werden können.						
Ergänzung						
Ergänzung						

(11) *Wie treffen die nachfolgenden Aussagen Ihrer Meinung nach zu?*

Nötig oder unnötig?	Trifft völlig zu	Trifft eher zu	Trifft eher weniger zu	Trifft nicht zu	Keine Angabe	Bemerkung
Konstruktionsaktivitäten, die zum Zeitpunkt der Designfestlegung nicht zielführend für den Auftrag waren sind nicht grundsätzlich unnötig.						
Wenn Änderungen aufeinander aufbauen (verknüpft sind) und die letzte nötig war, dann waren auch die Vorgängerändern nötig.						
Ergänzung						
Ergänzung						

(12) *Wie lassen sich Ihrer Meinung nach unnötige Konstruktionsaktivitäten beschreiben und was könnte vielleicht ein geeigneter Kennwert sein um diese rückwirkend erkennen zu können?*

BLOCK 4: Technische Unterstützung zur Reduzierung unnötiger Konstruktionsaktivitäten

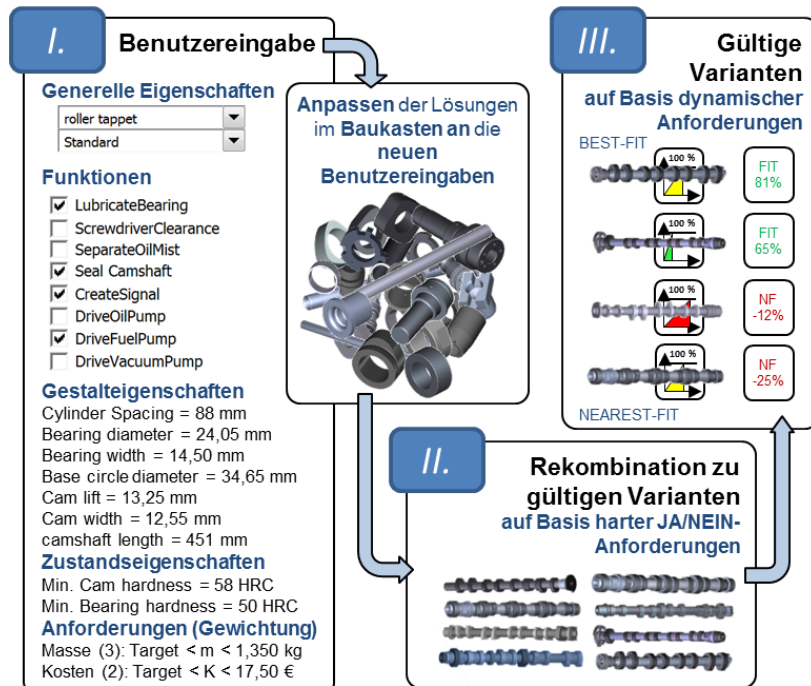
(13) *Zur Steigerung der Effizienz und der Qualität der Variantenauswahl im Rahmen der Anpassungs- und Variantenkonstruktion wäre eine unterstützendes Werkzeug, mit dessen Hilfe die Unsicherheit bei der Lösungsauswahl reduziert werden kann, um unnötige Iterationen im Sinne von redundanten bzw. häufig wiederkehrenden Konstruktionstätigkeiten zu minimieren, hilfreich.*

Ja	Eher ja	Eher nein	Nein	Keine Angabe	Bemerkung

Nachfolgend wird exemplarisch am Beispiel gebauter Nockenwellen ein grundsätzlicher Aufbau eines solchen Werkzeuges beschrieben.

WICHTIGE BEMERKUNG: *Der im Beispiel gezeigte Baukasten kann anstatt Einzelkomponenten, die zu Baugruppen kombiniert werden, auch einzelne Designfeatures enthalten die zu unterschiedlichen Bauteilvarianten kombiniert werden können.*

- I. Benutzereingabe der generellen und funktionalen Produkteigenschaften, der Gestalt- und Zustandseigenschaften sowie der Kundenanforderungen mit Gewichtung.
- II. Ermittlung der passenden Varianten die die geforderten harten Produkteigenschaften (z.B. geforderte Funktion ist vorhanden oder nicht) erfüllen.
- III. Weitere Einschränkung auf diejenigen Varianten, die die dynamischen Anforderungen (z.B. die Masse), die sich erst durch die Anpassung der bestehenden Lösungen an die aktuellen Benutzereingaben ergebenden, erfüllen.



Entscheidungsunterstützung durch Ermittlung der folgenden Kennwerte:

FIT: Welche auf Basis existierender Lösungen abgeleiteten Varianten passen?

BEST-FIT: Die in Frage kommenden Varianten erfüllen die Anforderungen wie gut?

NEAREST-FIT: Wie weit liegen diejenigen Varianten, die die FIT-Bedingung auf Basis der weichen Anforderungen nicht mehr erfüllen, daneben?

100%-Bedingung: Wie hoch ist der Aufwand, die 100% zu erreichen?

(14) Fänden Sie es sinnvoll ein Werkzeug zu haben, das gemäß vorheriger Beschreibung auf Grundlage von Benutzereingaben konstruktiven Lösungen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten anpasst, zu neuen Varianten kombiniert und auf deren Deckungsgrad mit den Kundenanforderungen hin bewertet?

Ja	Eher ja	Eher nein	Nein	Keine Angabe	Bemerkung

(15) *Wie schätzen Sie das Potential eines solchen Werkzeuges im Hinblick auf die Entscheidungsfindung im Rahmen der Anpassungs- und Variantenkonstruktion ein?*

Ein solches Werkzeug kann ...	<i>Trifft völlig zu</i>	<i>Trifft eher zu</i>	<i>Trifft eher weniger zu</i>	<i>Trifft nicht zu</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>
... den Auswahlprozess beschleunigen.						
... redundante und häufig wiederkehrende Arbeit reduzieren, da toolbasiert aufgezeigt was Vorarbeiten bereits existiert und wie sich diese kombinieren lassen.						
... die Entscheidungssicherheit erhöhen, da die Entscheidung immer die Gesamtheit der gültigen Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt.						
... die Entscheidungsqualität erhöhen, da das in Konstruktionen abgeschlossener Entwicklungsprojekte gespeicherte Wissen toolbasiert für neue Kundenanfragen einsetzbar wird.						
... bietet über die ermittelten Kennwerte (FIT, BEST- und NEAREST-FIT) die Möglichkeit Entwicklungslücken und -potentiale zu erkennen.						
... Wettbewerbsvorteile ermöglichen durch eine schnelle Rückmeldung zum Kunden.						
... die interne Kommunikation verbessern.						
Ergänzung						
Ergänzung						

(16) *Könnten Sie sich vorstellen, ein solches Werkzeug für die Entscheidungsunterstützung in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion einzusetzen?*

<i>Ja</i>	<i>Eher ja</i>	<i>Eher nein</i>	<i>Nein</i>	<i>Keine Angabe</i>	<i>Bemerkung</i>

(17) *Fragen zur Realisierung einer zukünftigen Anwendung?*

Die Anwendung ...	<i>Trifft völlig zu</i>	<i>Trifft eher zu</i>	<i>Trifft eher weniger zu</i>	<i>Trifft nicht zu</i>	<i>Keine An- gabe</i>	<i>Bemer- kung</i>
... sollte vollautomatisiert von Benutzereingabe und Bewertungsergebnis ablaufen.						
... kann auch teilautomatisiert sein mit Haltepunkten z.B. an Programmschnittstellen.						
... sollte einen transparenten Programmablauf aufweisen um die Bewertungsergebnisse nachvollziehen zu können.						
... kann mich bei der Designfestlegung unterstützen, die Entscheidung selbst treffe aber ich.						
Ergänzung						
Ergänzung						

(18) *Hier ist Raum für Kritik und alles das, was Sie vielleicht vermisst haben oder sonst noch zur vorgeschlagenen toolbasierten Entscheidungsunterstützung oder auch allgemein zur Umfrage oder Umfrageinhalten gerne noch loswerden möchten.*

(19) *Freiwillige Angaben*

Name	
Abteilung	

----- Ende der Mitarbeiterbefragung -----

Vielen Dank für die Unterstützung.

Markus Walch

11.1.3 Weitere Ergebnisse der Fragebogen-Studie (alle Gruppen)

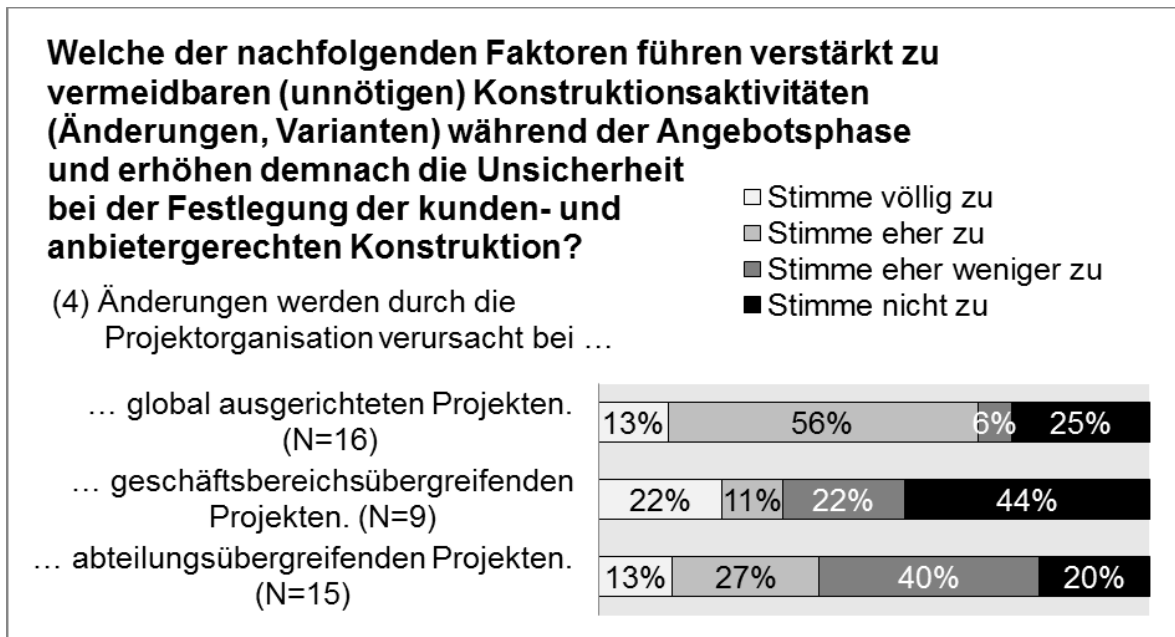


Abbildung 11-1: Unnötige Konstruktionsaktivitäten verursacht durch die Projektorganisation

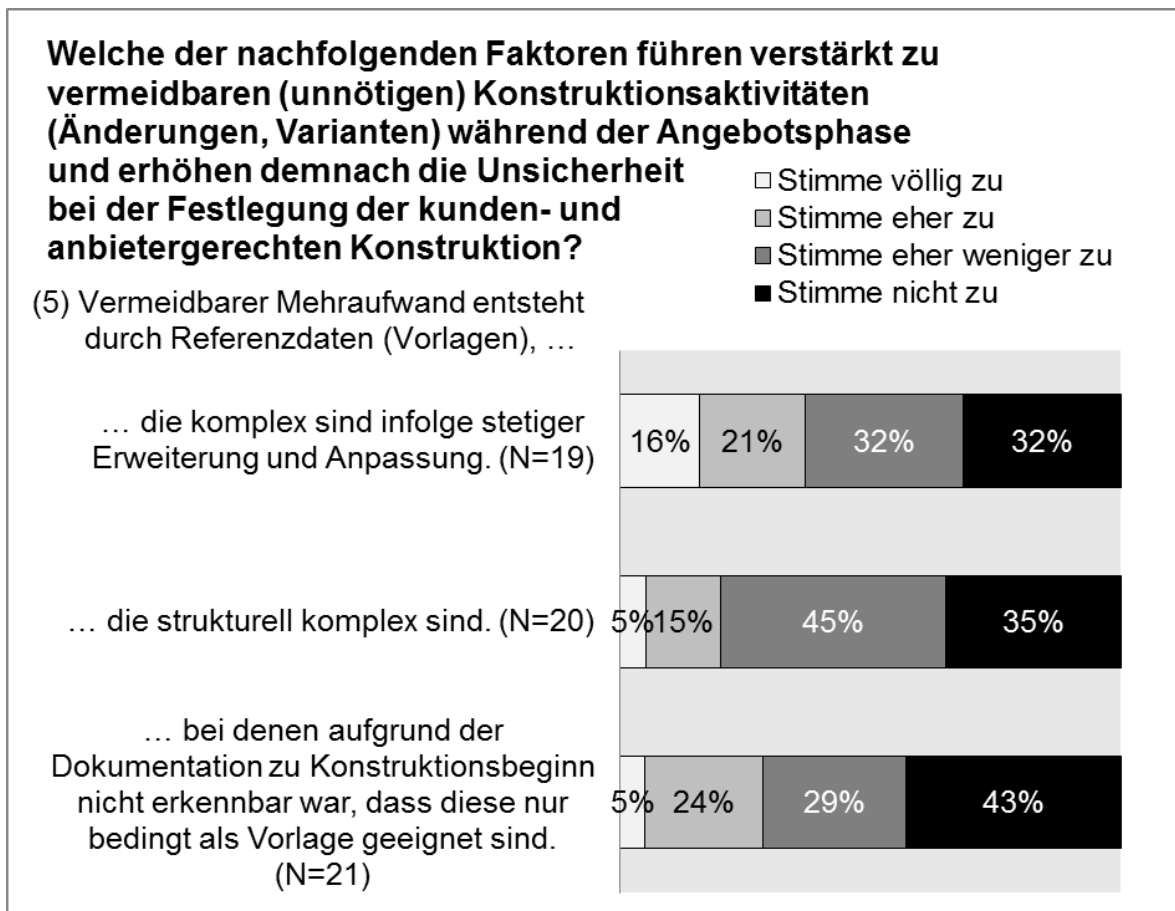


Abbildung 11-2: Unnötige Konstruktionsaktivitäten verursacht durch Referenzdaten

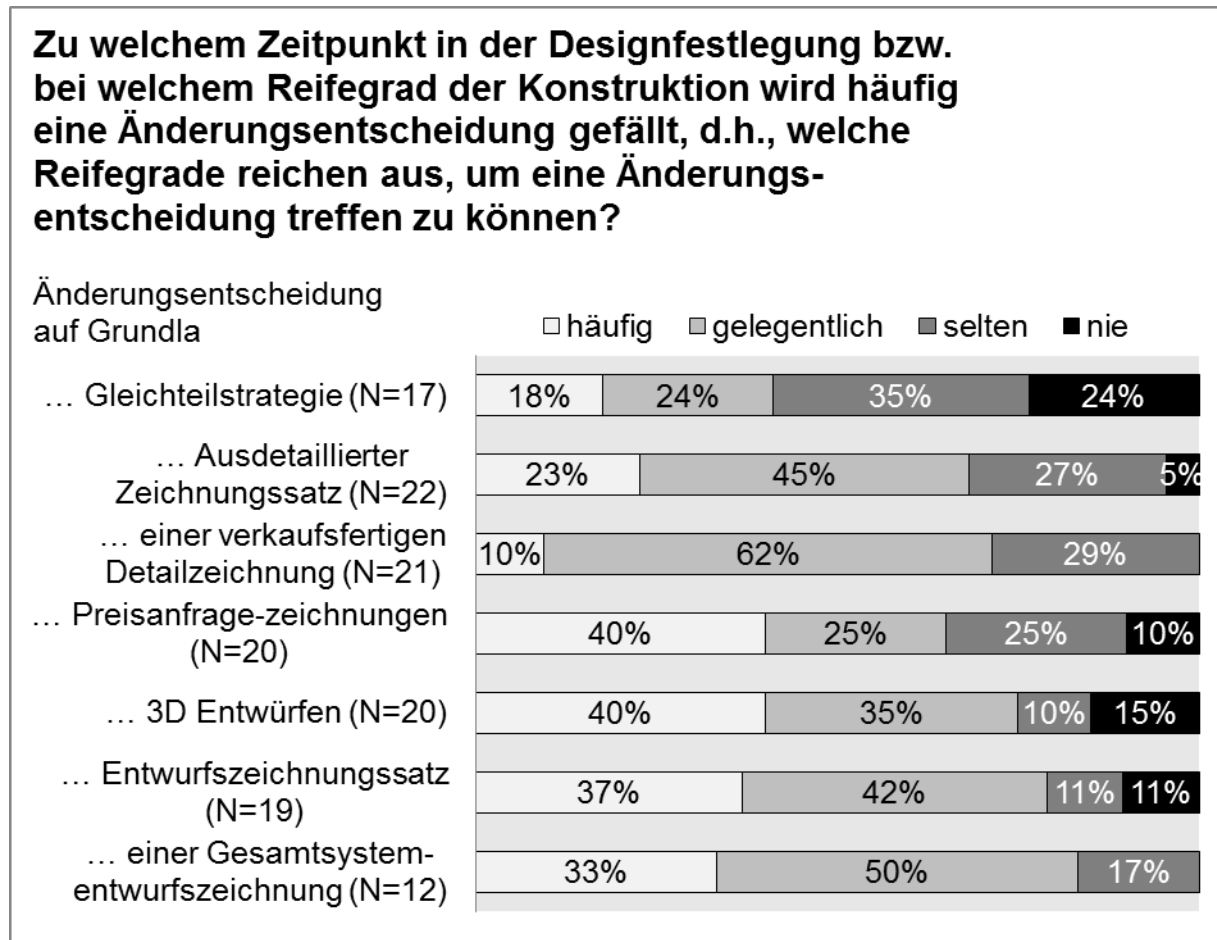


Abbildung 11-3: Grundlagen für Änderungsentscheidungen

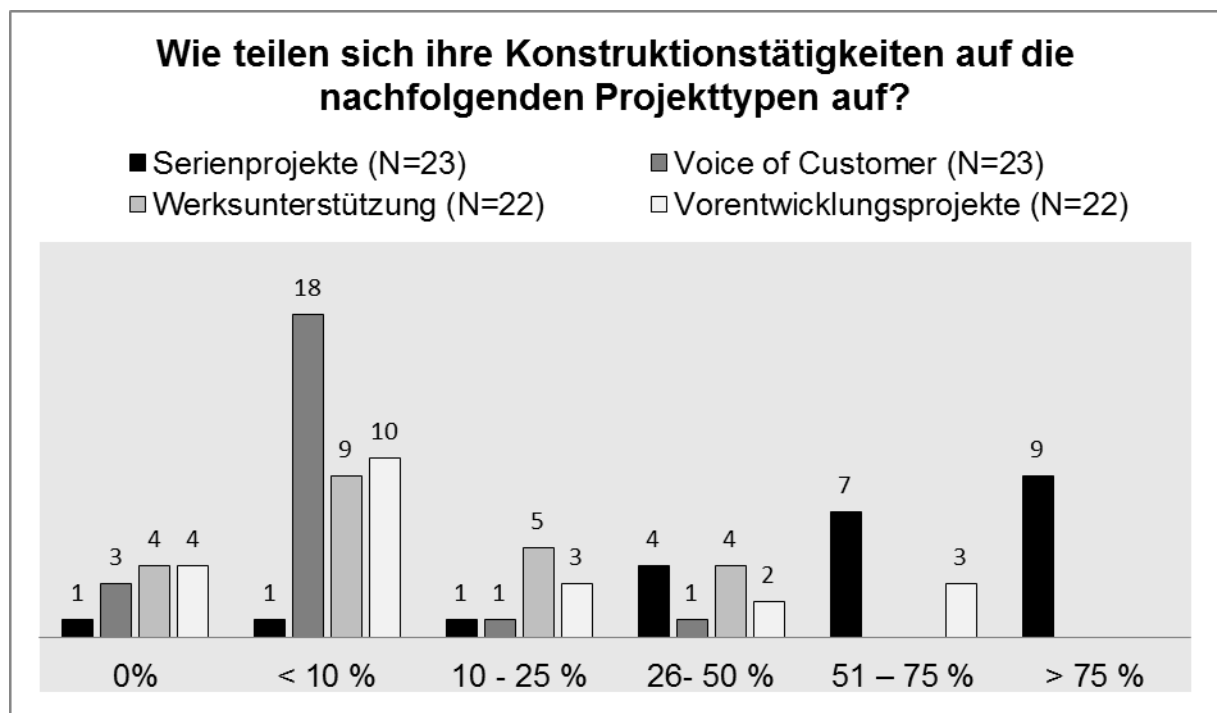


Abbildung 11-4: Verteilung der Konstruktionstätigkeiten auf Projekttypen

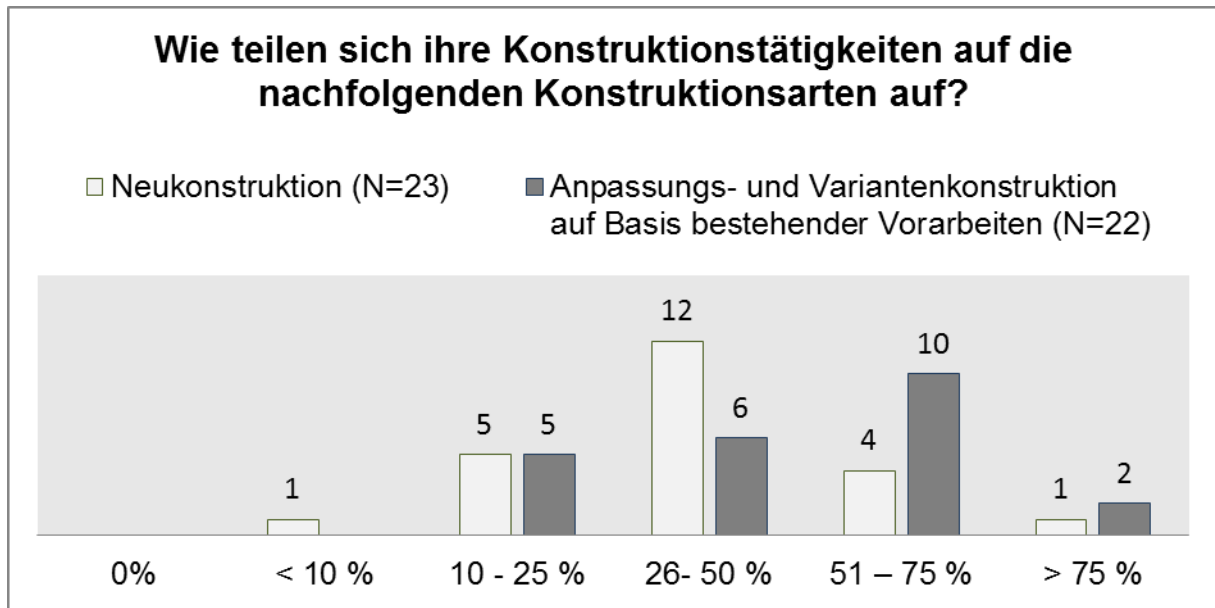


Abbildung 11-5: Verteilung der Konstruktionstätigkeiten auf Konstruktionsarten

Häufigkeit der Einschätzung "JA, ich führe in der Angebotsphase vermeidbare Aktivitäten aus" in Abhängigkeit des Projekttyps

Anteil der Arbeitszeit

Projekttyp	Anteil der Arbeitszeit	
	≤ 50%	> 50%
Serienprojekte	86% (N=7)	81% (N=16)
Voice of Customer	83% (N=23)	0% (N=0)
Werksunterstützung	91% (N=11)	0% (N=0)
Vorentwicklungsprojekte	84% (N=19)	100% (N=3)

Abbildung 11-6: Häufigkeit der Teilnehmerbewertung "Ja und eher ja" auf die Frage, ob es in der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt, in Abhängigkeit des Projekttyps

Häufigkeit der Einschätzung "JA, ich führe in der Angebotsphase vermeidbare Aktivitäten aus" in Abhängigkeit der Konstruktionsart

		Anteil der Arbeitszeit	
		≤ 50%	> 50%
Konstruktionsart	Varianten- und Anpassungskonstruktion	82% (N=11)	83% (N=12)
	Neukonstruktion	78% (N=18)	100% (N=5)

Abbildung 11-7: Häufigkeit der Teilnehmerbewertung "Ja und eher ja" auf die Frage, ob es in der Angebotsphase zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten kommt, in Abhängigkeit der Konstruktionsart

Häufigkeit der Einschätzung "JA, ich wünsche mir Unterstützung bei der Variantenauswahl in der Angebotsphase" in Abhängigkeit des Projekttyps

		Anteil der Arbeitszeit	
		≤ 50%	> 50%
Projekttyp	Serienprojekte	83% (N=6)	64% (N=14)
	Voice of Customer	70% (N=20)	0% (N=0)
	Werksunterstützung	80% (N=10)	0% (N=0)
	Vorentwicklungsprojekte	71% (N=17)	100% (N=2)

Abbildung 11-8: Häufigkeit der Teilnehmerbewertung "Ja und eher ja" auf die Frage, ob Sie bei der Variantenauswahl in der Anfragephase Unterstützung bedürfen, in Abhängigkeit des Projekttyps

Häufigkeit der Einschätzung "JA, ich wünsche mir Unterstützung bei der Variantenauswahl in der Angebotsphase" in Abhängigkeit des Projekttyps

		Anteil der Arbeitszeit	
		≤ 50%	> 50%
Konstruktionsart	Varianten- und Anpassungskonstruktion	75% (N=8)	67% (N=12)
	Neukonstruktion	69% (N=16)	75% (N=4)

Abbildung 11-9: Häufigkeit der Teilnehmerbewertung "Ja und eher ja" auf die Frage, ob Sie bei der Variantenauswahl in der Anfragephase Unterstützung bedürfen, in Abhängigkeit der Konstruktionsart

11.1.4 Anmerkungen und Freitextantworten

Teilnehmer / Gruppe ⁸⁰⁹	Anmerkungen und Freitextantworten zu Frage 12 ⁸¹⁰ des Basisfragebogens
2 / 2	<ul style="list-style-type: none"> - Abstimmung interner Fertigungsprozesse. - Wie finde ich die Vorarbeiten? - Unzureichende Dokumentation! - Verweis auf ähnliche Lösungen möglich?
3 / 2	<ul style="list-style-type: none"> - Abstimmung interner Fertigungsprozesse. - Zu wenig direkte Kommunikation zwischen Konstruktion und Kunde (zu lange Kommunikationskette). - Unvollständige Kundenanfragen, fehlende Kommunikation mit dem Kunden. <p data-bbox="371 770 488 801">Frage 12</p> <ul style="list-style-type: none"> - Varianten, die der Kunde nicht benötigt, nicht angefragt hat und kein Preiseinsparungspotential bringen. - Varianten, die nicht herstellbar sind. - Fehlende, interne Beurteilung von Varianten, aber Erstellung kompletter Zeichnungssätze. - Unklare Prozesse, Prozessumstellungen und damit verbundene Erstellung von Zeichnungssätzen. - Mehrere Zeichnungssätze und Handlingsaufwand durch global unterschiedliche Maschinenparks.
4 / 2	<ul style="list-style-type: none"> - Interner Zeitbedarf aufgrund vieler Schnittstellen hoch. <p data-bbox="371 1272 488 1303">Frage 12</p> <ul style="list-style-type: none"> - Geringe Fertigungstiefe. - Unnötige Aktivitäten proportional zu den Info-Schnittstellen - Kennwert für unnötige Konstruktionsaktivitäten ist meiner Meinung nach proportional zu den Info-Schnittstellen (im Vertrieb vor allem zum Zulieferer + Kunde).
3 / 1	<ul style="list-style-type: none"> - Unnötige Iterationen durch zu hohen Detaillierungsgrad der Zeichnungen für die Kostenkalkulation. - Änderungen durch Berechnung. <p data-bbox="371 1648 488 1680">Frage 12</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anzahl Konstruktionsvarianten bezogen auf die wirklich gefertigten Varianten.

Tabelle 11-5: Anmerkungen und Freitextantworten aus der Fragebogen-Studie (Teil 1/2)

⁸⁰⁹ Kolbenkonstruktion = 1, Nockenwellenkonstruktion = 2 und Zylinderkopfhaubenkonstruktion = 3

⁸¹⁰ Frage 12: Wie lassen sich Ihrer Meinung nach unnötige Konstruktionsaktivitäten beschreiben und was könnte vielleicht ein geeigneter Kennwert sein um diese rückwirkend erkennen zu können?

Teilnehmer / Gruppe ⁸¹¹	Anmerkungen und Freitextantworten zu Frage 12 ⁸¹² des Basisfragebogens
5 / 1	<ul style="list-style-type: none"> - Änderungen durch FE-Berechnung. Frage 12 <ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der unnötigen Varianten ist auch abhängig von der Anzahl an kundenseitig geforderten Varianten. - Anzahl der Varianten, die weder berechnet noch als Prototyp ausgeführt wurden (je mehr desto schlechter).
7 / 1	<ul style="list-style-type: none"> - Vermeidbare Aktivitäten durch Kalkulation. - Falsche Weitergabe von Kundenanforderungen an die Konstruktion durch andere Abteilungen. - Sich ändernde Standards erfordern teilweise Änderungen an Entwürfen. - Technische Unterstützung kann auch hinderlich sein, wenn dann Abweichungen vom Standard ewig Zeit kosten. - Wechselnde Standards erfordern Nachbesserungen an Vorarbeiten. Frage 12 <ul style="list-style-type: none"> - Man lernt immer was, zur Not wie es nicht geht. - Alles, was nicht direkt Einfluss auf das Produkt hat, sollte hinterfragt werden (Formalisten, Prozesse, z.T. Verwaltung).
9 / 1	Frage 12 <ul style="list-style-type: none"> - Hätte die Maßnahme auch in einer Version umgesetzt werden können?
11 / 1	Verwaltungsaufwand halte ich nicht immer für notwendig.
3 / 3	Ausdetaillierte Konstruktion (Radien, Entformungen, etc.) nur ausführen, wenn für die Umsetzbarkeitsprüfung relevant. Frage 12 <ul style="list-style-type: none"> - Nur der Kundenanforderung nachgehen und aufwändige, vom Kunden nicht gewollte Konzepte und Lösungen vermeiden.
4 / 3	Weiß nicht, ob überhaupt so ein Werkzeug für Zylinderkopfhauben technisch möglich ist, da sehr komplex.

Tabelle 11-6: Anmerkungen und Freitextantworten aus der Fragebogen-Studie (Teil 2/2)

⁸¹¹ Kolbenkonstruktion = 1, Nockenwellenkonstruktion = 2 und Zylinderkopfhaubenkonstruktion = 3

⁸¹² Frage 12: Wie lassen sich Ihrer Meinung nach unnötige Konstruktionsaktivitäten beschreiben und was könnte vielleicht ein geeigneter Kennwert sein um diese rückwirkend erkennen zu können?

11.1.5 Zielkriterien zur Bewertung der Methodeneignung

1) Häufig wiederkehrende, auftragsbezogene Produkthanforderungen

- [1] Es ist denkbar, dass völlig neue, unerwartete Bauteilanforderungen gefordert werden.
- [2] Gefordert werden weitestgehend ähnliche Bauteilanforderungen.
- [3] Bauteilanforderungen sind meist eine Untermenge eines gleichbleibenden Anforderungskatalogs.
- [4] Überwiegend gleiche Bauteilanforderungen von Auftrag zu Auftrag.

2) Hoher Anteil an Anträgen auf Basis von Kundenzeichnungen

- [1] Anfrage beinhaltet nur ein Minimum an Anforderungen.
- [2] Vorgaben der Bauraumanforderungen aber keine Vorgaben bzgl. der konkreten Produktrealisierung.
- [3] Kundenseitige Konzeptskizzen mit entsprechenden Randbedingungen.
- [4] Entwurfszeichnungen mit Lastenheftrohfassung.
- [5] Ausdetaillierte Kundenzeichnungen mit Lastenheft.

3) Hoher Anteil an Anpassungs- und Variantenkonstruktion auf Basis bestehender Produkte

- [1] < 25%
- [2] 25 - 50%
- [3] 51 - 75%
- [4] > 75%

4) Varianten lassen sich gut auf Basis eines Baukastens ableiten

- [1] Varianten können nicht auf Basis eines Baukastens abgeleitet werden.
- [2] Es ist grundsätzlich denkbar, aber wenig sinnvoll, einen produktspezifischen Baukasten abzuleiten.
- [3] Es ist denkbar, einen produktspezifischen Baukasten zu definieren.
- [4] Die Realisierbarkeit eines produktspezifischen Baukastens auf Bauteilebene ist gegeben.

5) Gute Standardisierbarkeit der bestehenden Konstruktionen

- [1] Bestehende Konstruktionen lassen sich nicht standardisieren.
- [2] Es lassen sich grundsätzlich Standardelemente definieren.

[3] Es lassen sich grundsätzlich Standardklassen bzw. -typen definieren.

[4] Es können Kompatibilitätsregeln für Bauteile und Produkteigenschaften festlegen werden.

6) Hohe Anzahl an kombinierbaren Einzelteilen

[1] Keine Kombinationsmöglichkeiten

[2] Roh- und Fertigteile

[3] 3 – 10

[4] > 10

7) Hohe Anzahl an funktionsrelevanten Produkteigenschaften

[1] Anzahl überschaubar.

[2] Anzahl führt dazu, dass die Beziehungen und Abhängigkeiten schwierig zu überblicken sind.

[3] Hohe Komplexität durch eine Vielzahl an abhängigen und vernetzter Produkteigenschaften.

8) Gute Parametrisierbarkeit zur Ermittlung geometriegebundener Produktanforderungen

[1] Hoher Anteil relevanter Geometriefeatures, die sich schlecht parametrisieren lassen.

[2] Relevante Geometriefeatures sind gut parametrisierbar.

9) Teile und Produkteigenschaften überwiegend nicht unabhängig voneinander kombinierbar

[1] Nein, da ein hoher Modularitätsgrad vorliegt.

[2] Ja, da Teile und Eigenschaften durch vernetzte Beziehungen nur bedingt modular austauschbar sind.

10) Relevante Bewertungszielgrößen lassen sich erst auf Basis der fertigen Konstruktion ermitteln

[1] Bewertungszielgrößen des späteren Produktes lassen sich bereits durch angepasste Einzelteile bewerten.

[2] Bewertungszielgrößen ergeben sich erst nach Anpassung der Einzelteile auf Baugruppenebene.

11.1.6 Tabellenblatt zur Bewertung der Methodeneignung

Bewertung der produktspezifischen Methodeneignung

Produkt:	
Name (Abteilung):	
Datum:	

Anwendbarkeit	sehr gut	gut	prinzipiell ja	weniger	nicht
Wertebereich	> 90%	90% - 80%	79% - 60%	59% - 45%	<45%
Methodeneinsatz	empfohlen	empfohlen	diskutabel	nicht empfohlen	nicht empfohlen

Produkt und korrespondierende Anfragen charakterisieren sich durch ...

80%	Bitte zutreffende Ausprägung auswählen
K1 ... häufig wiederkehrende, auftragsbezogene Produktanforderungen.	Bauteilanforderungen sind meist eine Untermenge eines gleichbleibenden Anforderungskatalogs.
K2 ... hoher Anteil an Anfragen auf Basis von Kundenzeichnungen.	Kundenseitige Konzeptskizzen mit entsprechenden Randbedingungen.
K3 ... hoher Anteil an Anpassungs- und Variantenkonstruktion auf Basis bestehender Produkte.	25 - 50%
K4 ... Varianten lassen sich gut auf Basis eines Baukastens ableiten.	Es ist denkbar, einen produktspezifischen Baukasten zu definieren.
K5 ... gute Standardisierbarkeit der bestehenden Konstruktionen.	Es können Kompatibilitätsregeln für Bauteile und Produkteigenschaften festgelegt werden.
K6 ... hohe Anzahl an kombinierbaren Einzelteilen.	3 - 10
... hohe Anzahl an funktionsrelevanten Produkteigenschaften.	Anzahl führt dazu, dass die Beziehungen und Abhängigkeiten schwierig zu überblicken sind.
... gute Parametrisierbarkeit zur Ermittlung geometriegebundener Produktanforderungen.	Relevante Geometriefeatures sind gut parametrisierbar.
... Teile und Produkteigenschaften überwiegend nicht unabhängig voneinander kombinierbar.	Ja, da Teile und Eigenschaften durch vernetzte Beziehungen nur bedingt modular austauschbar sind.
... relevante Bewertungszielgrößen lassen sich erst auf Basis der fertigen Konstruktion ermitteln.	Bewertungszielgrößen ergeben sich erst nach Anpassung der Einzelteile auf Baugruppenebene.

Abbildung 11-10: Tabellenblatt zur Bewertung der produktspezifischen Methodeneignung

11.1.7 Bewertungsergebnis zur Methodeneignung

Neben der Bewertung der produktspezifischen Methodeneignung durch den Autor als Vertreter aus der Produktgruppe 2 (Nockenwellen) wurden durch drei Vertreter aus der Produktgruppe 1 (Kolben) die produktspezifische Methodeneignung bewertet. Dabei resultierte eine durchschnittliche Eignung von 71,9% für den Kolbenbereich verglichen 94,6% für den Nockenwellenkonstruktionsbereich.

Kriterium	Nockenwellen	Kolben	Kolben	Kolben
K1	3	2	2	3
K2	5	2	2	3
K3	4	2	1	2
K4	4	2	3	2
K5	4	2	4	2
K6	4	2	3	2
K7	2	2	3	1
K8	2	2	2	2
K9	2	2	2	2
K10	2	2	2	2
Ergebnis	94,6%	64,0%	78,7%	73,1%

Tabelle 11-7: Bewertungsergebnis zur Methodeneignung (N=4)

11.1.8 Weitere Ergebnisse der Fragebogen-Studie (Gruppe 2 und 3)

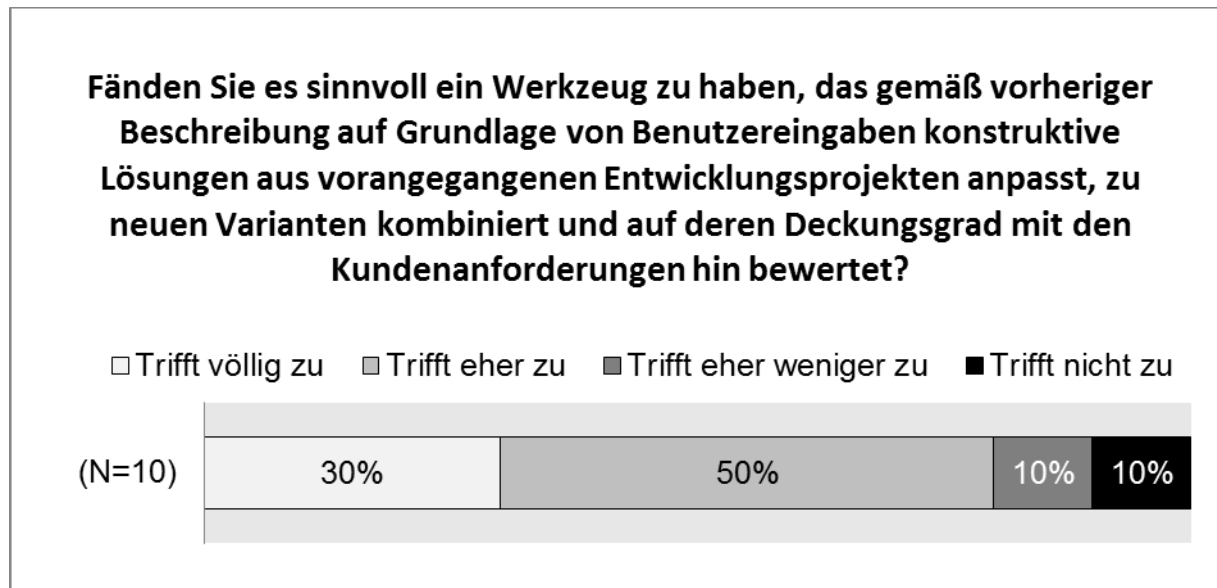


Abbildung 11-11: Bewertung der Praxistauglichkeit eines zukünftigen Werkzeuges auf Grundlage der Methodenskizze gemäß Block 4 des Basisfragebogens

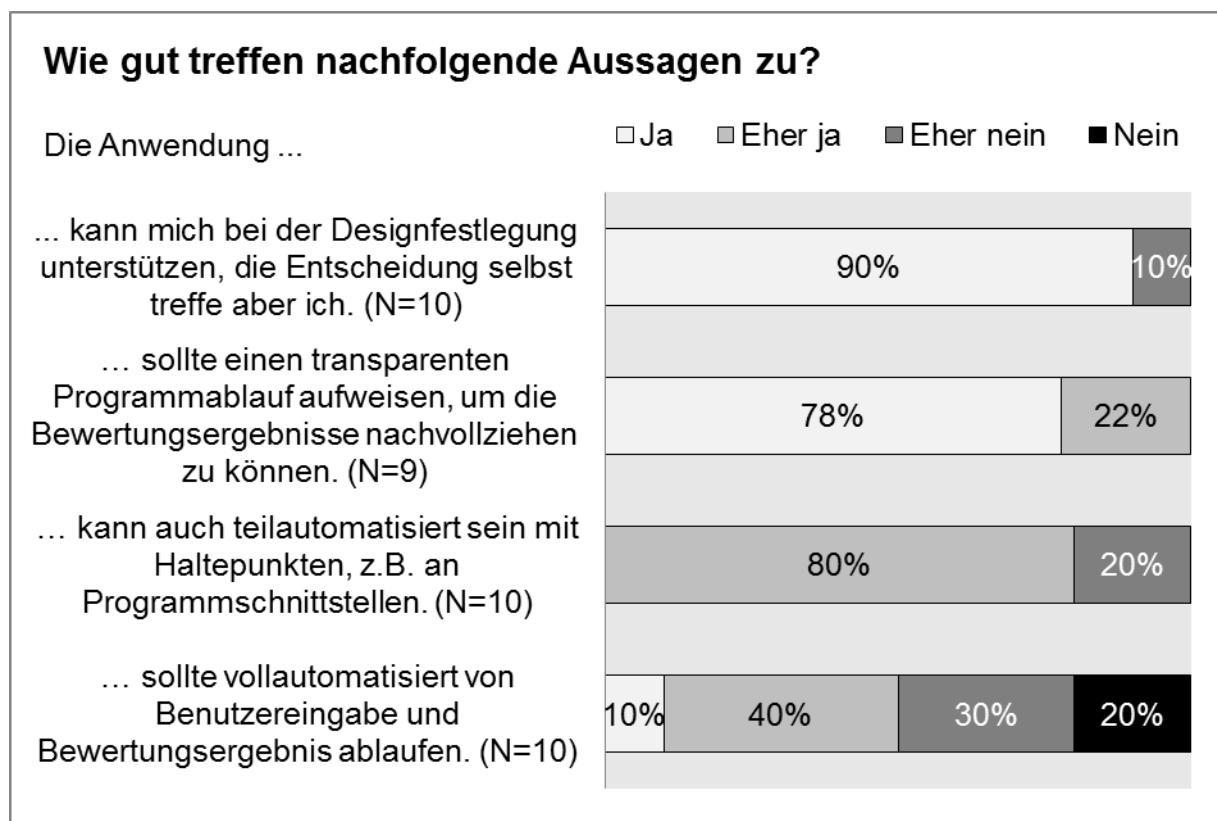


Abbildung 11-12: Bewertungsergebnis zur Ausgestaltung der in Block 4 des Basisfragebogens skizzierten Methode im Rahmen eines entsprechenden Werkzeuges



Abbildung 11-13: Bewertungsergebnis zur Potentialabschätzung eines zukünftigen Werkzeuges zur Entscheidungsunterstützung in der Anpassungs- und Variantenkonstruktion (Produktgruppen 2 und 3)

11.2 Anhang zu Kapitel 6

11.2.1 Zusammenhänge von Variationsarten und Variationstypen

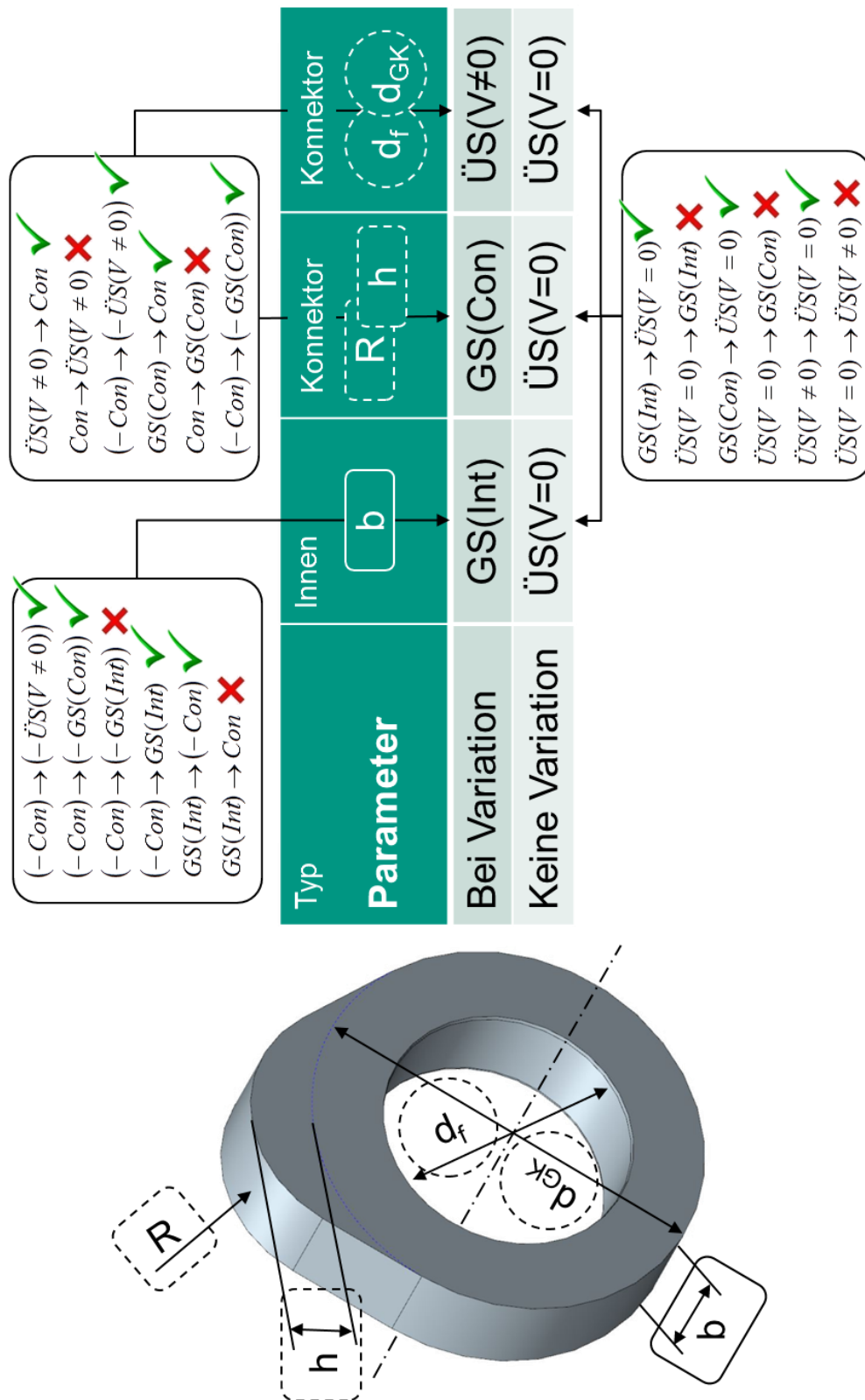


Abbildung 11-14: Zusammenhänge zwischen Variationstypen und Variationsarten am Beispiel der Parameter eines Ventilnockens

11.2.2 Beziehungen zwischen Elementklassen und Eigenschaften

Elementklassen ► Produkteigenschaften ▼		Elementklassen									
		Nockenwellenkörper (CABDY)	Ventilnocken (VCAM)	Antriebsselemente (DRVE)	Abtriebsselemente 2 (DRVE2)	Ausrichtelemente (DRVNGE)	Pumpennocken (FTE)	Radiallagerelemente (PCAM)	Axiallagerelemente (RBE)	Signalgeberelemente (ABE)	TGE
		MUSST									
Nebenfunktionen	Nockenwelle ausrichten	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	Lagerung mit Schmieröl versorgen	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
	Schrauberfreigänge bereitstellen	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
	Ölnebel abscheiden	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Nockenwelle verschließen	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Signal erzeugen	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
	Ölpumpe antreiben	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Kraftstoffpumpe antreiben	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	Vakuumpumpe antreiben	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Antriebsselement aufnehmen	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Nockenwellenversteller aufnehmen	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Zentralschraube aufnehmen	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Anwendungen	Wälzgelagerte Nockenwelle	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
	MAHLE-CamInCam®	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
	Rollen- oder Gleitabgriff	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 11-8: Beziehungen zwischen Elementklassen, Nebenfunktionen und anwendungsbezogenen Produkteigenschaften

11.2.3 Geometrieparametrisierung der CAD-Daten

Parameter	Variablen ⁸¹³	Beschreibung
Zylinderabstand	SPACING	Diese Maß steuert neben dem Zylinderabstand auch den Lager- und Nockenabstand.
Antriebselementlänge	DRVE_LENGTH	Auskraglänge des Antriebselements, d.h., Abstand zwischen antriebsseitigem Nockenwellenende und Beginn Nockenwellenkörper.
Ventilnockenwinkel Zylinder 1	ANGLE_PRESET	Offset zwischen Winkelreferenz der Nockenwelle und Nockenwinkel Zylinder 1.
Ventilnockenposition 1	VCAM_1_1	Axiale Position Nocken 1 zu Zylinder 1 bezogen auf antriebsseitiges Nockenwellenende.
Ventilnockenposition 2	VCAM_1_2	Axiale Position Nocken zu 2 Zylinder 1 bezogen auf antriebsseitiges Nockenwellenende.
Ventilnockengrundkreisdurchmesser	VCAM_BASE_CIRCLE	Grundkreisdurchmesser der Ventilnocken
Ventilnockenbreite	VCAM_WIDTH	Breite der Ventilnocken
Ventilnockenhub	VCAM_LIFT	Nockenhub der Ventilnocken bezogen auf den Grundkreisdurchmesser.
Nockenspitzenradius	VCAM_TOP_RADIUS	Der Spitzenradius bildet zusammen mit dem Ventilnockenhub in vereinfachter Form die Ventilnockenkontur im Hubbereich ab.
Axiallagerposition	DIST_ABE	Axiale Position des Axiallagerelementes und/ oder der Axiallagermitte bezogen auf das antriebsseitige Nockenwellenende.
Äquidistante Radiallagerpositionen	DIST_RBE	Radiale Position der äquidistanten (entsprechend Zylinderabstand) Radiallagerelemente und/ oder Radiallagermitten bezogen auf das antriebsseitige Wellenende.
Variable Radiallagerposition 1	DIST_RBE_X1	Variable, unabhängig vom Zylinderabstand steuerbare Position des Radiallagerelementes und/ oder der Radiallagermitte 1.
Variable Radiallagerposition 2	DIST_RBE_X2	Variable, unabhängig vom Zylinderabstand steuerbare Position des Radiallagerelementes und/ oder der Radiallagermitte 2.

Tabelle 11-9: CAD-Parameter zur Anpassung der Geometrie (Teil 1/4)

⁸¹³ Eingesetzte Variablenbenennung im Rahmen des Softwareprototyps

Parameter	Variablen	Beschreibung
Position Antriebselement 2	DIST_DRVE2	Axialposition des Antriebselements 2 bezogen auf das antriebsseitige Wellenende.
Kopfkreisdurchmesser	DRVE2_TIP_DIAMETER	Kopfkreisdurchmesser Antriebselementes 2 (Kettenrad, Riemen- oder Zahnrad).
Fügesitzbreite	DRVE2_SEAT_WIDTH	Fügesitzbreite entspricht der Funktionsbreite des Elementes, z.B. der Zahnbreite.
Fügesitzdurchmesser	DRVE2_SEAT_DIAMETER	Fügesitzdurchmesser des Antriebselements 2 bildet ein Wirkflächenpaar mit dem Wellenkörper oder einem Antriebselement.
Fußkreisdurchmesser	DRVE2_ROOT_DIAMETER	Fußkreisdurchmesser Antriebselement 2 (Kettenrad, Riemen- oder Zahnrad)
Signalgeberelementposition	DIST_TGE	Axiale Position der Signalgebermitte bezogen auf das antriebsseitige Wellenende.
Signalkantendurchmesser	TGE_SIGNAL_DIAMETER	Funktionsdurchmesser der Signalkanten am Signalgeberelement.
Signalgebergrundkreisdurchmesser	TGE_ROOT_DIAMETER	Grundkreisdurchmesser des Signalgeberelementes
Signalgeberbreite	TGE_WIDTH	Signalgeberbreite entspricht der funktionalen Signalkantenlänge.
Pumpennockenposition	DIST_PCAM	Axiale Position der Pumpennockenmitte bezogen auf antriebsseitiges Wellenende.
Pumpennockenbreite	PCAM_WIDTH	Breite des Pumpennockens
Pumpennockenhub	PCAM_LIFT	Nockenhub des Pumpennockens bezogen auf den Grundkreisdurchmesser.
Pumpennockenspitzenradius	PCAM_TOP_RADIUS	Der Spitzenradius bildet zusammen mit dem Pumpennockenhub in vereinfachter Form die Pumpennockenkontur im Hubbereich ab.
Pumpennockengrundkreisdurchmesser	PCAM_BASE_CIRCLE	Grundkreisdurchmesser des Pumpennockens
Nockenwellenkörperdurchmesser	CABDY_DIAMETER	Funktionaler Außendurchmesser des Nockenwellenkörpers, der mit dem Radiallagerdurchmesser identisch sein kann, beispielsweise wenn kein Radiallagerelement auf den Nockenwellenkörper gefügt wird.

Tabelle 11-10: CAD-Parameter zur Anpassung der Geometrie (Teil 2/4)

Parameter	Variablen	Beschreibung
Radiallagerdurchmesser	RADIAL_BEARING_DIAMETER	Radialer Durchmesser der Radiallagerstellen auf den unterschiedlichen Elementen.
Radiallagerbreite	RADIAL_BEARING_WIDTH	Funktionale Breite der Radiallagerstellen auf den unterschiedlichen Elementen.
Axiallagerdurchmesser	AXIAL_BEARING_DIAMETER	Der Axiallagerdurchmesser kann mit dem Radiallagerdurchmesser übereinstimmen oder abweichend ausgeführt sein.
Axiallagerbreite	AXIAL_BEARING_WIDTH	Funktionsbreite des Axiallagers
Ausrichtelementposition	DIST_FTE	Axiale Position der Mitte des Ausricht- und Montageelementes bezogen auf das antriebsseitige Wellenende.
Werkzeugbreite	SPANNER_HEIGHT	Funktionsbreite des Werkzeuges zur Ausrichtung der Nockenwelle während der Montage, beispielsweise eines Maulschlüssels.
Abtriebselementlänge	DRVNGE_LENGTH	Auskräglänge des Antriebselements, d.h., Abstand zwischen abtriebsseitigem Ende des Nockenwellenkörpers und dem abtriebsseitigen Nockenwellenende.
Nockenwellenkörperlänge	CABDY_LENGTH	Länge des Nockenwellenkörpers ist der direkte Abstand zwischen an- und abtriebsseitigen Nockenwellenkörperenden.
Wandstärke	CABDY_WALLTHICK	Wandstärke des Nockenwellenkörpers
Schrauberfreiganganzahl	CABDY_PASS_COUNT	Anzahl an Schrauberfreigängen bezogen auf den Nockenwellenkörper.
Schrauberfreigangposition	CABDY_PASS_DIST	Position des ersten Schrauberfreiganges bezogen auf das antriebsseitige Nockenwellenkörperende.
Schrauberfreigangdurchmesser	CABDY_PASS_DIA	Durchmesser der Schrauberfreigänge, die an An- und Abtriebselementen oder am Nockenwellenkörper vorgesehen werden können.
Schrauberfreigangtiefe	CABDY_PASS_DIST2	Tiefe der Schrauberfreigänge ist der Abstand von der Außenmantelfläche des Nockenwellenkörpers bis zur Nockenwellendrehachse.

Tabelle 11-11: CAD-Parameter zur Anpassung der Geometrie (Teil 3/4)

Blow-By-Einlassposition	CABDY_ BLOW_BY_HOLE	Abstand der Blow-By-Einlassöffnungen von der Öffnungsmittlebene bis zum antriebsseitigen Nockenwellenkörperende .
Drallerzeugerposition	CABDY_ BLOW_BY_SWIRL	Abstand zwischen der Mittelebene der Blow-By-Einlassöffnungen und dem Drallerzeuger.
Passtiftposition	CABDY_ DIST_CIC_PIN_HOLE	Abstand zwischen Ventalnockenmitte und Passtift zur Fixierung der beweglichen Ventalnocken an der CIC-Innenwelle.

Tabelle 11-12: CAD-Parameter zur Anpassung der Geometrie (Teil 4/4)

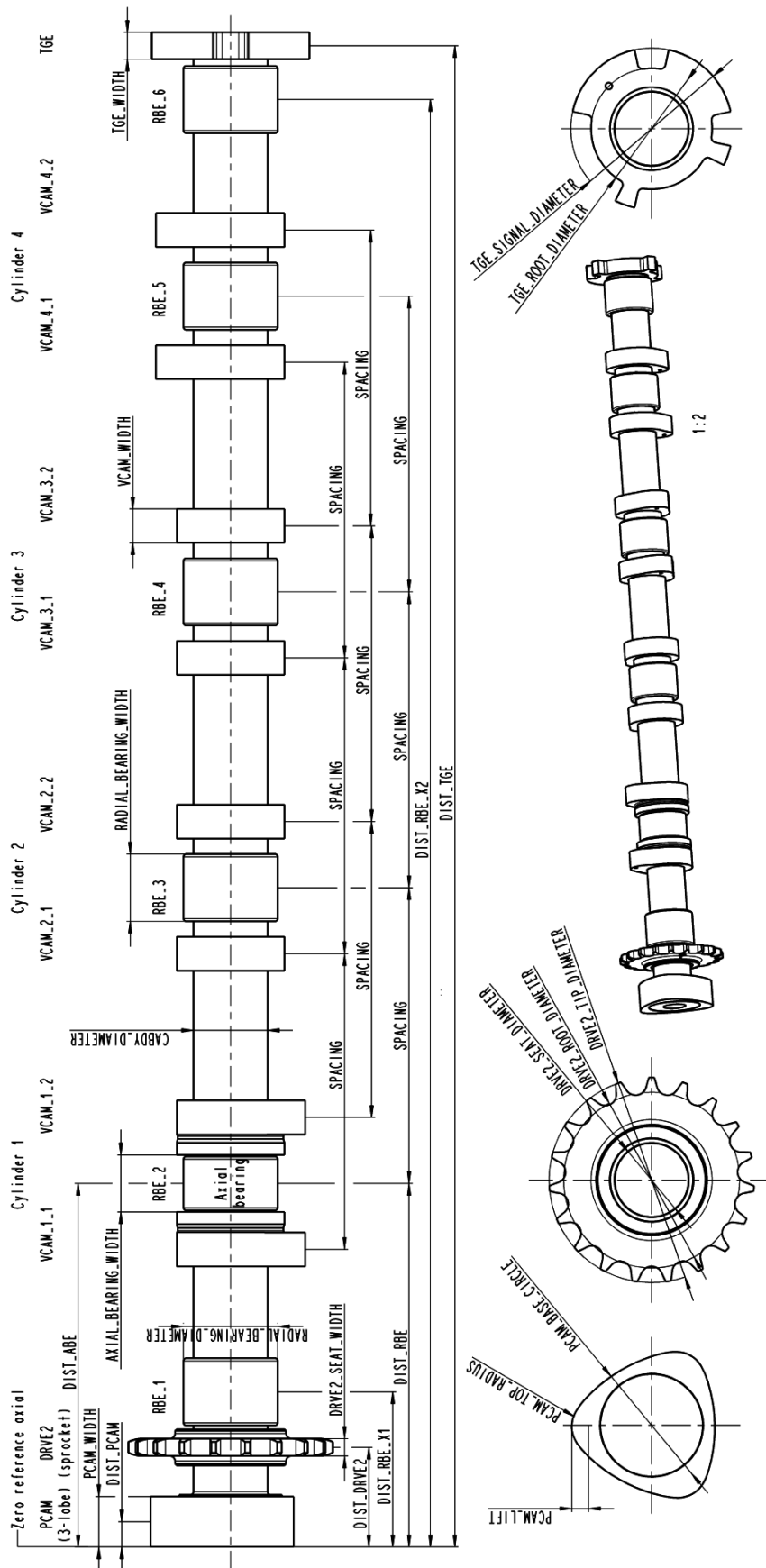


Abbildung 11-15: Ausgewählte CAD-Parameter am Beispiel einer wälzgelagerten Nockenwelle (Nockenwellentyp 4)

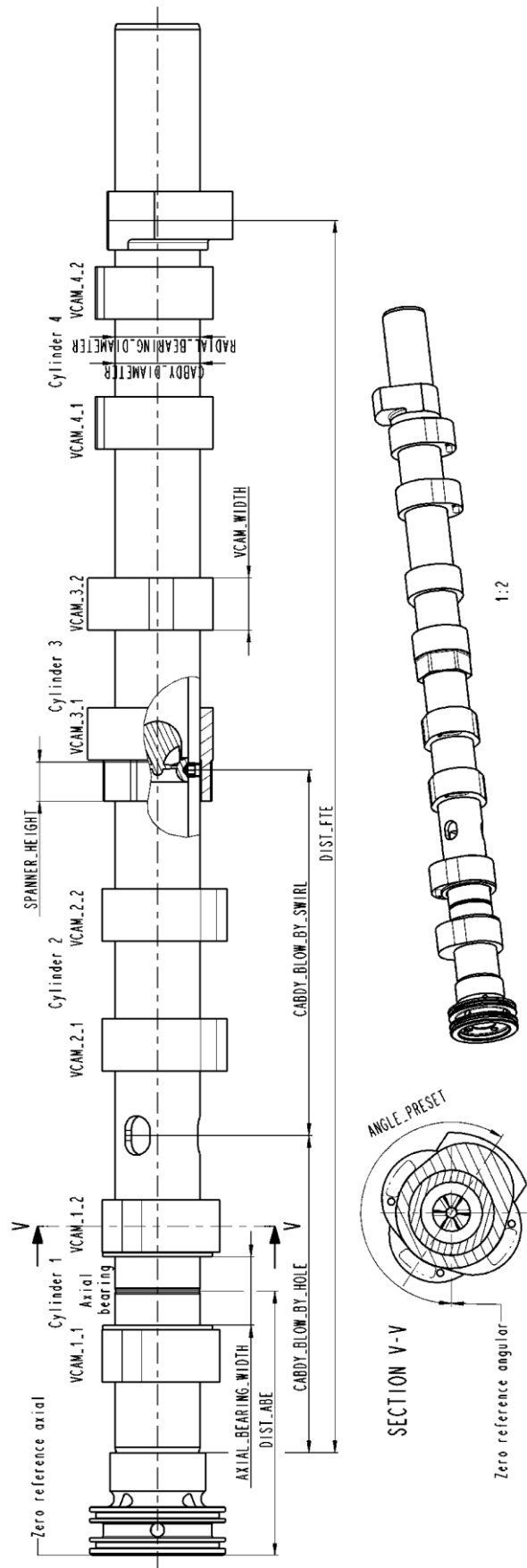


Abbildung 11-16: Ausgewählte CAD-Parameter am Beispiel einer gebauten Nockenwelle mit integrierter Ölnebelabscheidung (Nockenwellentyp 2)

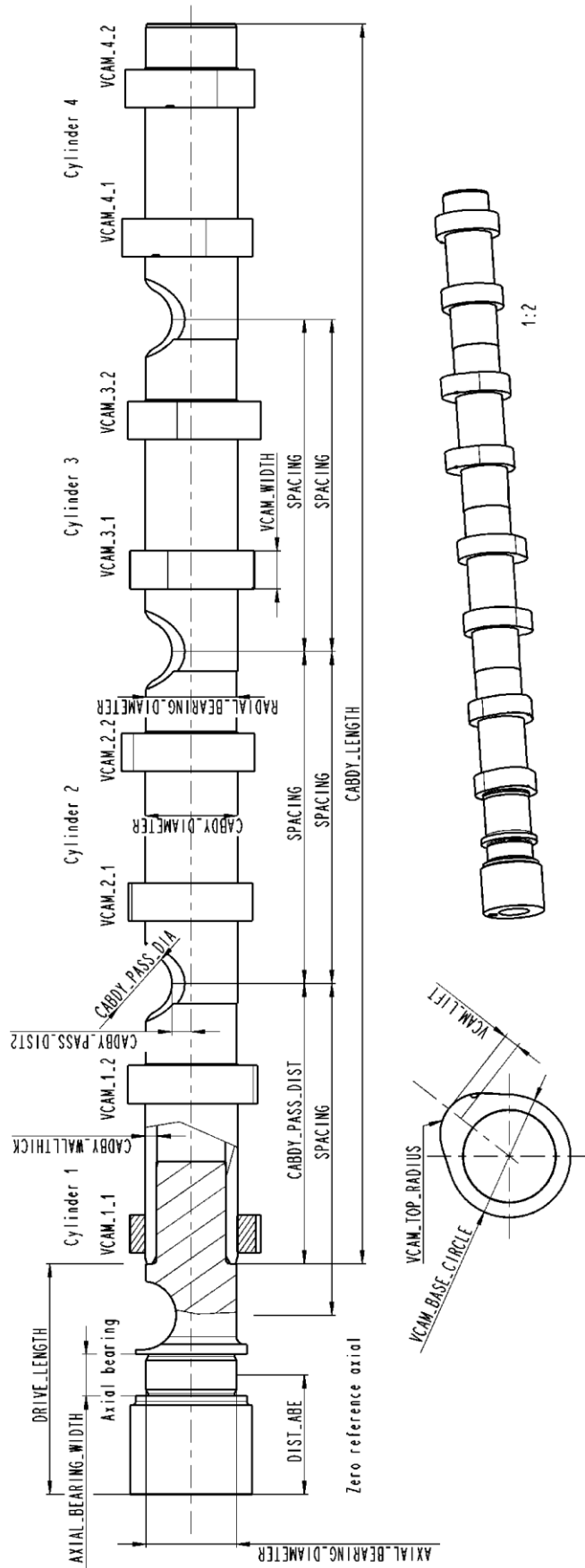


Abbildung 11-17: Ausgewählte CAD-Parameter am Beispiel einer gebauten Nockenwelle mit Schrauberfreigängen (Nockenwellentyp 1)

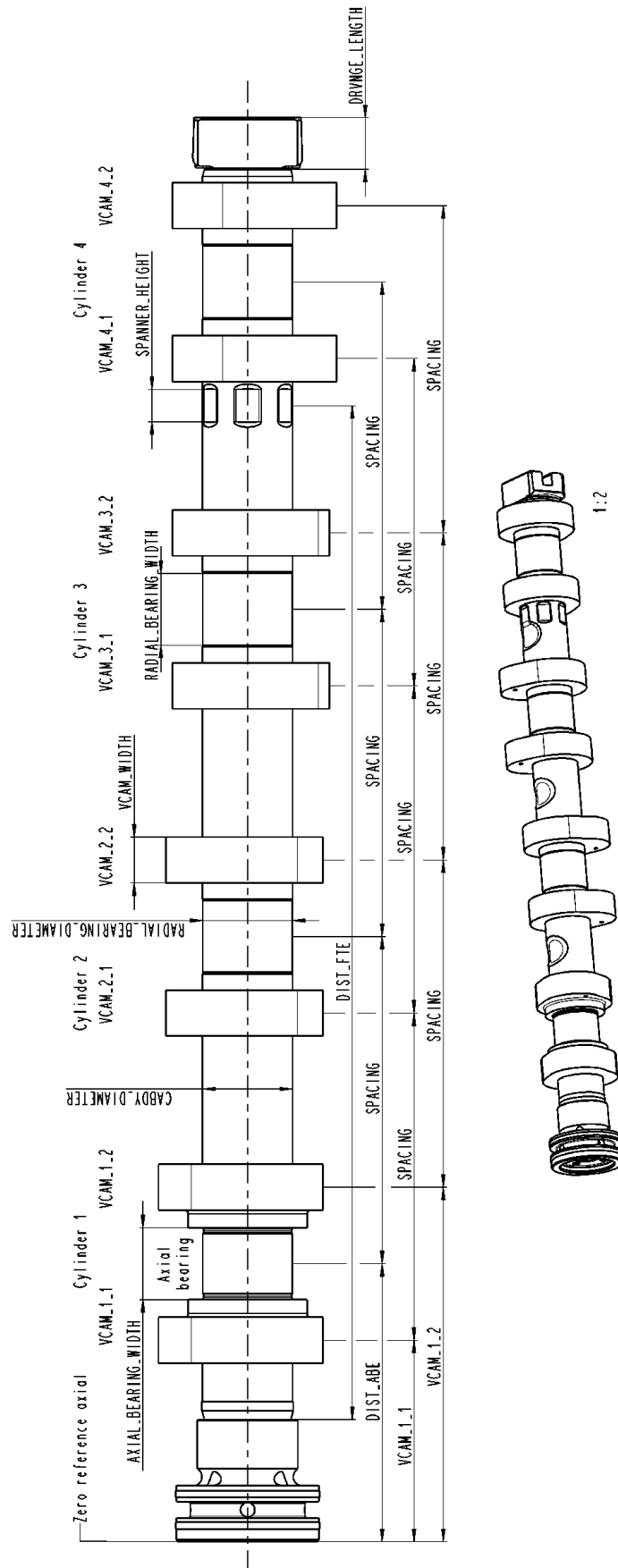


Abbildung 11-18: Ausgewählte CAD-Parameter am Beispiel einer gebauten Nockenwelle mit Schrauberfreigängen und Abtriebselement (Nockenwellentyp 1)

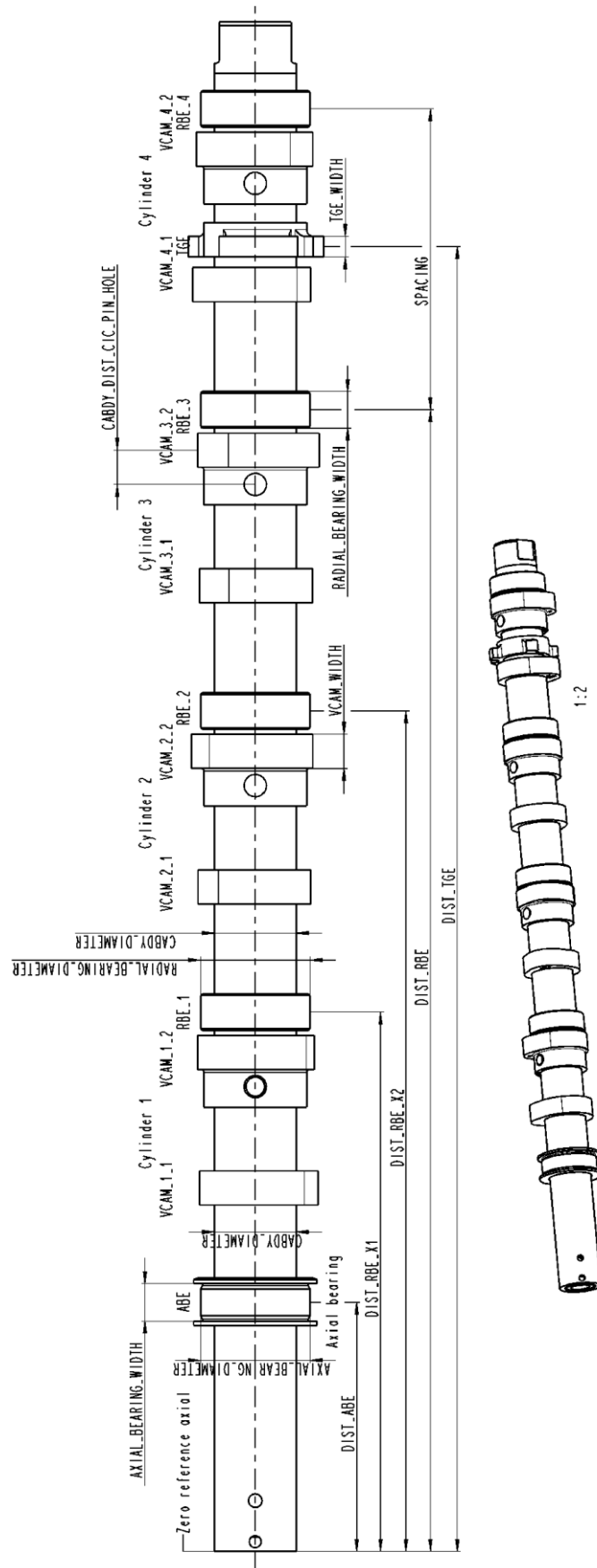


Abbildung 11-19: Ausgewählte CAD-Parameter am Beispiel einer MAHLE-CamInCam®-Nockenwelle (Nockenwellentyp 3)

11.3 Anhang zu Kapitel 7

11.3.1 Auszug aus der Kurzübersicht (T11)

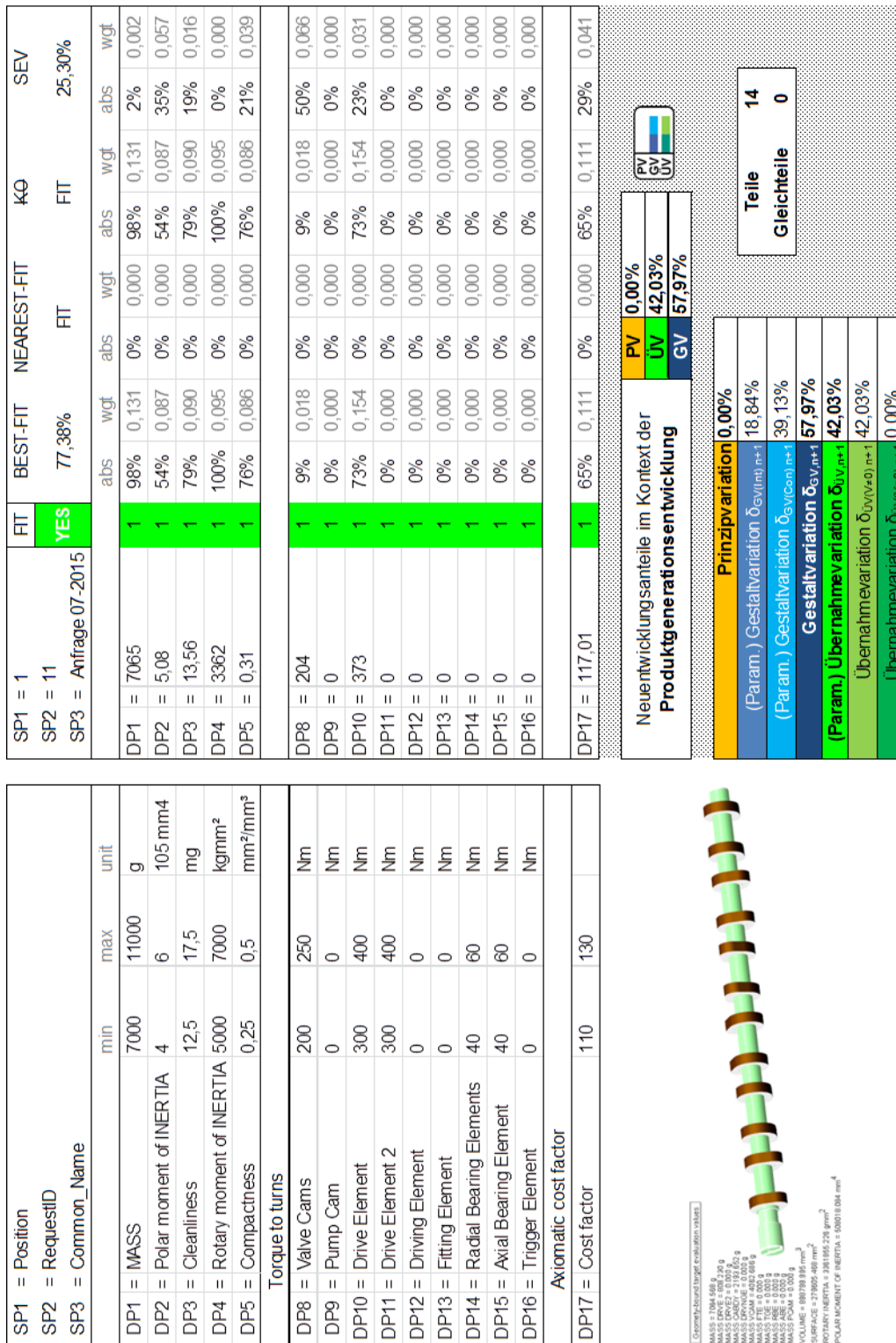


Abbildung 11-20: Kurzübersicht am Beispiel einer Bewertung für eine Nutzfahrzeugwelle für einen SOHC-Reihensechszylindermotor (FIT=YES)

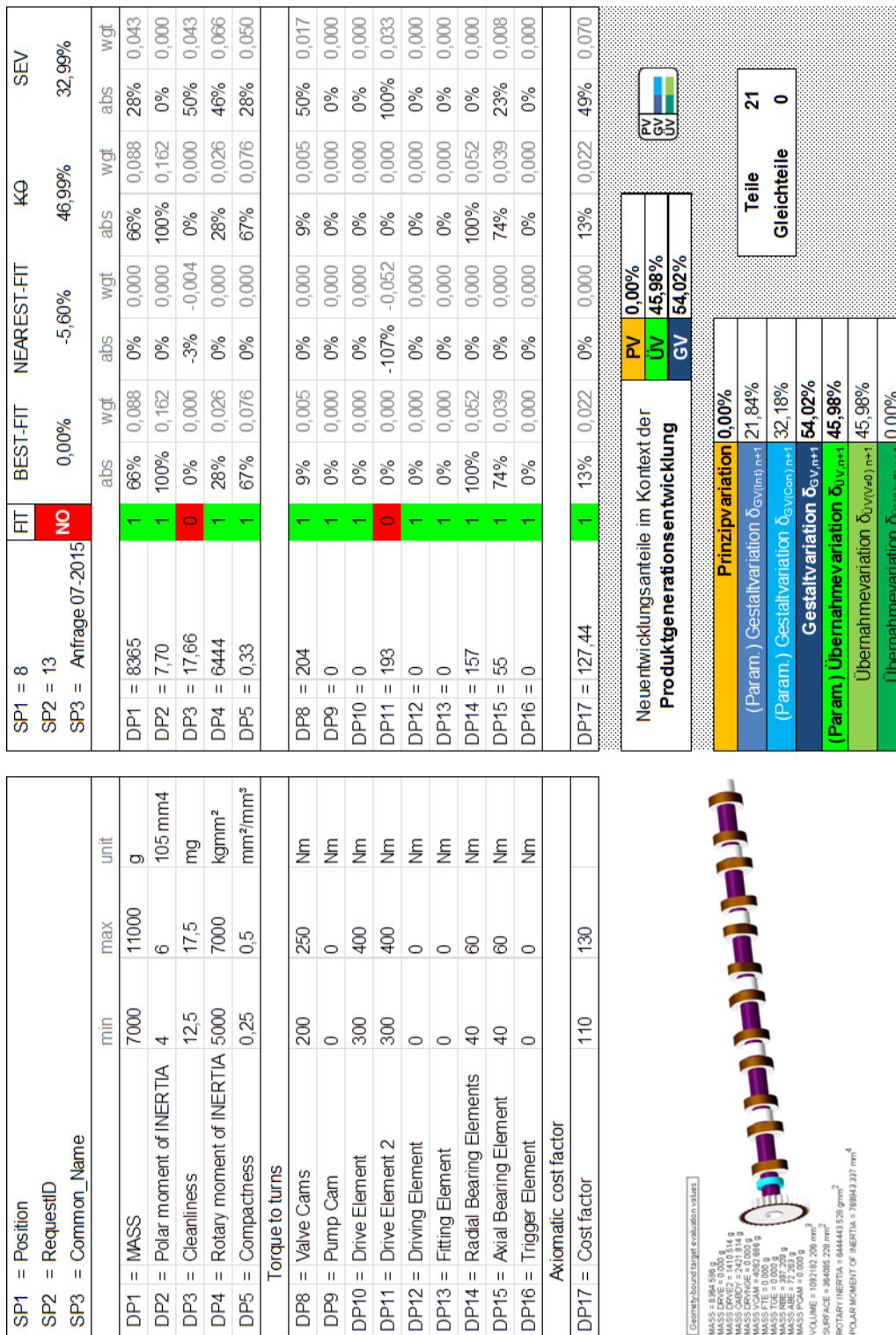


Abbildung 11-21: Kurzübersicht am Beispiel einer Bewertung für eine Nutzfahrzeugwelle für einen SOHC-Reihensechszylindermotor (FIT=NO)

11.3.2 Datenbasis des Softwareprototyps

Nr.	Aktivität	Softwareprototyp
1	Zusammenstellung der Referenzdaten	42 gebaute Nockenwellen verteilt auf 5 Nockenwellentypen
2	Ermittlung enthaltener Elementklassen	10 Elementklassen
3	Bestimmung der funktions- und anwendungsbezogenen Eigenschaften	21 relevante Produkteigenschaften identifiziert (Haupt- und Nebenfunktionen sowie anwendungsbezogene Produkteigenschaften)
4	Zuordnung zwischen Nockenwelleneigenschaften und Elementklassen	Beziehungsdiagramm auf Grundlage von 3 Anwendungen, 10 Elementklassen und 19 Haupt- und Nebenfunktionen enthält 36 Knoten und 66 Kanten
5	Herleitung der Hauptelementklassen einer gebauten Nockenwelle	Hauptklassen sind Nockenwellenkörper und Ventilenocken
6	Ableitung erforderlicher Elementtypen	87 Elementtypen die mit den Produkteigenschaften 264 Beziehungen bilden
7	Herleitung der produktspezifischen Regeln	Definition 30 produktspezifischer Regeln auf Grundlage der Beziehungsdiagramme und der Unternehmensexpertise zu gebauten Nockenwellen.
8	Berechnung der gültigen, produktspezifischen Elementtypenkombinationen	Aus 29.393.280 möglichen Elementtypenkombinationen resultieren 74.196 gültige Kombinationen.
9	Definition einer Optimierung zur Reduktion der gültigen Elementtypenkombinationen	(1) Standard → Minimale Anzahl an Funktionen (2) Integral → Standard und minimale Anzahl an Elementtypen (3) Modular → Standard und maximale Anzahl an Elementtypen.
10	Verifikation des Regelwerkes auf Grundlage von neun Referenznockenwellen	Optimierregeln sowie Regeln zur Ermittlung gültiger Elementtypenkombinationen verifiziert.
11	Ermittlung und Verifikation nockenwellenspezifischen Assemblierungsregeln ⁸¹⁴	Definition von Assemblierungsregeln für die mehrfach verwendeten Bauteile Ventilenocken und Radiallagerelemente und Verifikation anhand der neun Referenznockenwellen.

Tabelle 11-13: Datenbasis des Softwareprototyps mit markieren Hauptpositionen, deren Überarbeitung beim Übergang auf ein unternehmensweit einsetzbares Entwicklungswerkzeug den Hauptmehraufwand generieren (1/2)

⁸¹⁴ Der Begriff „Assemblierungsregeln“ wird im Kontext dieser Arbeit auf S. 206 eingeführt.

Nr.	Aktivität	Softwareprototyp
12	Aufstellen der Anforderungsbeziehungen für die Variantenauswahl	Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Anforderungen sowie festen und emergenten Eigenschaften und Merkmalen.
13	Parametrisierung der CAD-Daten	Zugriff auf CAD-Daten von 9 gebauten Nockenwellen und über 50 weiteren Einzelteilen. Für die geometrische Beschreibung dienen 44 Parameter.
14	Festlegung der Parametereinteilung zur Ermittlung der Variationsanteile im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung	Klassifizierung der 44 Parameter in Gestalt- und Übernahmevariationsparameter.
15	Datenbankerstellung zur Variantenableitung	Access-Datenbank
16	Variantenbewertung	Excel-Berechnungsblätter
17	Beschreibung der Baukastenelemente	Korrespondierende Paare aus Objekt- und Objektbeschreibung ⁸¹⁵

Tabelle 11-14: Datenbasis des Softwareprototyps mit markieren Hauptpositionen, deren Überarbeitung beim Übergang auf ein unternehmensweit einsetzbares Entwicklungswerkzeug den Hauptmehraufwand generieren (2/2)

⁸¹⁵ Die Beschreibung der Elemente des Baukastens gemäß Abbildung 6-12 auf S. 196 muss auch für ein unternehmensweites Entwicklungstool durch das Datenmanagementsystem abgebildet werden.

11.4 Anhang zu Kapitel 8

11.4.1 Fragebogen zu den semistrukturierten Mitarbeiterinterviews

Evaluation der Methode durch semistrukturierte Mitarbeiterinterviews (April und Mai 2015) anhand einer prototypischen Operationalisierung der Methode im Rahmen eines softwaretechnischen Entwicklungswerkzeuges zur Unterstützung der Konzeptentwicklung in der Anfragephase.

Entwicklung einer Methode zur Entscheidungsunterstützung bei der Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotserstellung auf Grundlage abgeleiteter Varianten eines Baukastens

Allgemeine Fragen zur Angebotserstellungsphase aus Sicht des Konstrukteurs

1. Welche Aktivitäten werden bei der Konzeptentwicklung im Rahmen der Angebotserstellung durchgeführt?
2. Gibt es redundante und häufig wiederkehrende Konstruktionstätigkeiten?

JA		NEIN	
4	3	2	1

Wenn ja:

2.1. Können Sie Beispiele nennen?

2.2. Woran liegt das Ihrer Meinung nach, dass diese Tätigkeiten redundant und häufig wiederkehrend ausgeführt werden?

3. Wie hoch schätzen Sie aus Ihrer Sicht den Arbeitsaufwand für Iterationen (Erstellung von Varianten, Änderungen) während der Angebotserstellung ein?

HOCH		MITTEL		NIEDRIG		
6	5	4	3	2	1	0

3.1. Was sind mögliche Ursachen für zusätzliche Iterationen?

3.2. Welche Auswirkungen haben zusätzliche Iterationen?

4. Wie schätzen Sie den Anteil der zusätzlichen Iterationen ein, die hätten vermieden werden können?

HOCH		MITTEL		NIEDRIG		
6	5	4	3	2	1	0

4.1. Welche sind vermeidbar?

4.2. Woran kann ich diese erkennen?

5. Gibt es im nachfolgenden Kontext ein unterschiedliches Begriffsverständnis?

5.1. In der Angebotsphase kommt es bei der kunden- und anbiertgerechten Designfestlegung zu vermeidbaren Konstruktionsaktivitäten.

In der Angebotsphase kommt es bei der kunden- und anbiertgerechten Designfestlegung zu unnötigen Konstruktionsaktivitäten.

5.2. In der Angebotsphase kommt es bei der kunden- und anbiertgerechten Designfestlegung zu vermeidbaren bzw. unnötigen Konstruktionsaktivitäten.

In der Angebotsphase kommt es bei der kunden- und anbiertgerechten Konzeptentwicklung zu vermeidbaren bzw. unnötigen Konstruktionsaktivitäten.

Vorstellung der prototypischen Umsetzung und Erläuterung der Methode. Im Anschluss gemeinsame Anwendung und Frage zur prototypischen Umsetzung.

6. Fallen Ihnen spontan Entwicklungssituationen aus abgeschlossenen oder aktiven Projekten ein, die als Anwendungsbeispiel herangezogen werden können?

Wenn ja, welche?

7. Könnten Sie sich vorstellen, nach einer Schulung die Methode auf Basis eines ausgereiften Softwaretools selbständig anzuwenden?

JA		NEIN	
4	3	2	1

7.1. Ist die Vorgehensweise verständlich?

7.2. Was passt schon gut und was sollte geändert werden?

8. Könnten Sie sich vorstellen, die Methode auf Basis eines ausgereiften Softwaretools für Folgeprojekte anzuwenden?

JA		NEIN	
4	3	2	1

9. Welche Risiken sehen Sie in der Anwendung der Methode?

10. Wie schätzen Sie den Aufwand für die Anwendung des Softwaretools in der Anfragephase ein?

HOCH		MITTEL		NIEDRIG		
6	5	4	3	2	1	0

Fragen zur Einschätzung des Nutzens der Methode

11. Wird der angedachte Nutzen abgedeckt?

JA		NEIN	
4	3	2	1

Wenn nein:

- 11.1. Ist der Nutzen in anderen Aspekten zu sehen?
- 11.2. Gibt es weitere Einsatzmöglichkeiten für die Methode?
- 11.3. Gibt es bessere Einsatzmöglichkeiten für die Methode?

12. Welches generelle Potential sehen Sie in einem zukünftigen Praxiseinsatz der Methode verglichen mit der Konzeptentwicklung ohne Methodenunterstützung?

HOCH		MITTEL		NIEDRIG		
6	5	4	3	2	1	0

12.1. Wie schätzen Sie die Zeitersparnis durch den Methodeneinsatz ein?

HOCH		MITTEL		NIEDRIG		
6	5	4	3	2	1	0

12.2. Wie schätzen Sie die Reduktion des Arbeitsaufwands durch den Einsatz der Methode ein?

HOCH		MITTEL		NIEDRIG		
6	5	4	3	2	1	0

12.3. Wie schätzen Sie den positiven Einfluss des Methodeneinsatz auf die Arbeits- und Ergebnisqualität ein?

HOCH		MITTEL		NIEDRIG		
6	5	4	3	2	1	0

11.4.2 Weitere Ergebnisse der quantitativen Auswertung

Allgemeinen Fragen zur Angebotserstellung aus Sicht des Konstrukteurs

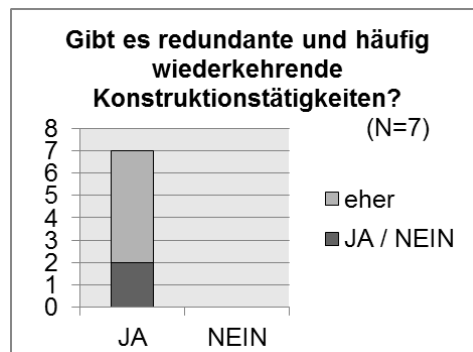


Abbildung 11-22: Einschätzung hinsichtlich dem Auftreten redundanter und häufig wiederkehrender Konstruktionstätigkeiten

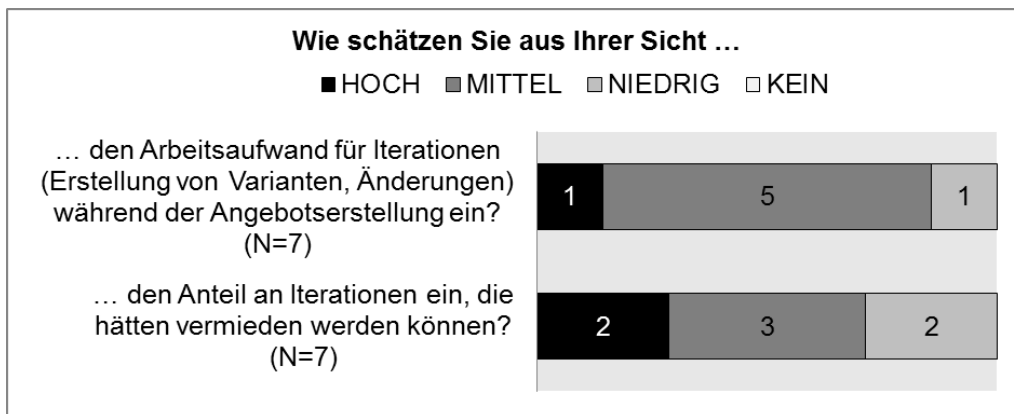


Abbildung 11-23: Auswertung der Einschätzung hinsichtlich dem Anteil an vermeidbaren Iterationen und dem dadurch entstehenden Arbeitsaufwand

Fragen zur prototypischen Umsetzung

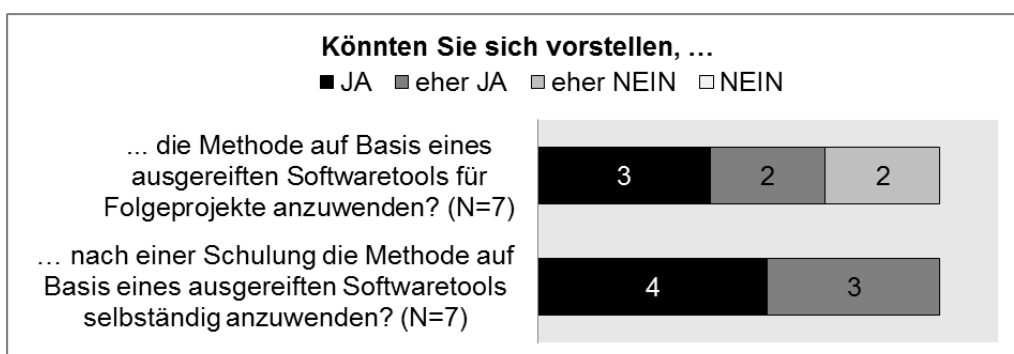


Abbildung 11-24: Einschätzung zur Methodenanwendung für Folgeprojekte und deren Anwendbarkeit auf Grundlage eines ausgereiften Softwaretools

11.4.3 Methodenrelevante Daten für A-Projekt 1 (PKW)

Variant Decision Support System (VDSS) - Main

[Admin Form](#) to edit meta data / create base rules

1. Requirement add Rule Set for Requirement

Select workRules (current active select rules)

withLFC	▼
withCreatesignal	▼
withRollerTappet	▼
withRBE	▼
withDRVE2	▼
withAdjustCamshaft	▼
withCamInCam	▼
withCentralScrew	▼
withDmeFuelPump	▼
withDmeOilPump	▼
withDmeVacuumPump	▼
withDRVE	▼
Standard	▼
withLubricateBearing	▼
withSupportGear	▼
withNOFuelPump	▼
withNOOilPump	▼
withNORollerTappet	▼
withNOVacuumPump	▼
withScrewdriverClearance	▼
withSealCamshaft	▼
withSeparateOilMist	▼
withSupportCamPhaser	▼
withDRVNGE	▼

3. choose RuleSet to add

Exclude workRules (current active rules)

NODRVNGE	▼
NOAdjustCamshaft	▼
NOCaminCam	▼
NOCentralScrew	▼
NODriveFuelPump	▼
NODriveOilPump	▼
NODriveVacuumPump	▼
NODRVE	▼
NOSupportGear	▼
NOLubricateBearing	▼
NOScrewdriverClearance	▼
NOSealCamshaft	▼
NOSeparateOilMist	▼
NOSupportCamPhaser	▼
NOLFC	▼
basedel	▼
NORBE	▼
NORollerTappet	▼
NOCreatesignal	▼
isSOHC	▼
NODRVE2	▼

clear all work Rules

Cylinders:

Valves/cyl:

Config:

Num rad. supp.:

RequestID:

CommonName:

6. Modellparametersatz

8. Anforderungen

Assemblierung Exportdatensätze

7. Vorassemblierung

4. apply Exclude Rules

these rules reduce the work collection (mark references to be excluded)

5. optimize

Choose optimization type

standard min. number of functions

integral min. number of functions AND min. number of parts

modular min. number of functions AND max. number of parts

[cfg view](#)

combine rules with AND

2. generate Work Collection

according to active select rules (w/o rules all avail. variants are copied)

Abbildung 11-25: Ein- und ausgeschlossenen Elementtypen sowie funktions- und anwendungsbezogene Eigenschaften für Abfrage 16 zur Ableitung von LFC-Nockenwellenvarianten

Requirements (tbl_Geometry)

RequestID

16

Common_Name

A-Projekt 1 - LFC D24

RequestID	Value	Common_Name	Value
CYLINDER_COUNT	4	VCAM_BASE_CIRCLE	33
Valves/Cylinder_COUNT	4	VCAM_WIDTH	10,1
SPACING	91	VCAM_LIFT	6
DRVE_LENGTH	0	VCAM_TOP_RADIUS	12
ANGLE_PRESET	0	PCAM_WIDTH	0
DIST_ABE	24,175	PCAM_LIFT	0
DIST_RBE	181	PCAM_TOP_RADIUS	0
DIST_RBE_X1	90	PCAM_BASE_CIRCLE	0
DIST_RBE_X2	363	VCAM_1_1	69,7
DIST_DRVEZ	5,5	VCAM_1_2	110,3
DIST_TGE	129,5	TGE_ROOT_DIAMETER	33
DIST_PCAM	0	TGE_SIGNAL_DIAMETER	42
CABDY_DIAMETER	24	TGE_WIDTH	8
CABAY_LENGTH	395,35	RADIAL_BEARING_DIAMETER	32
CABDY_WALLTHICK	3	RADIAL_BEARING_WIDTH	17
CABDY_PASS_COUNT	0	AXIAL_BEARING_DIAMETER	32
CABDY_PASS_DIST	0	AXIAL_BEARING_WIDTH	26,35
CABDY_PASS_DIA	0	SPANNER_HEIGHT	0
CABDY_PASS_DIST2	0	DRVNGE_LENGTH	0
DIST_FTE	0	DRVEZ_TIP_DIAMETER	87
CABDY_BLOW_BY_HOLE	0	DRVEZ_SEAT_WIDTH	11
CABDY_BLOW_BY_SWIRL	0	DRVEZ_SEAT_DIAMETER	24
CABDY_DIST_CIC_PIN_HOLE	0	DRVEZ_ROOT_DIAMETER	77

8. Anforderungen

Active Produkteigenschaften	Value
01 EngineType	Diesel
02 Original_Customer	
03 Surface quality Radial Bearings	ground
04 Surface quality VCAM	finished
05 Surface hardness min Bearing [HRC]	25
06 Surface hardness min VCAM [HRC]	56
07 Hertzian stress min VCAM [MPa]	
08 Drive type	Gear
09 Pump lobe type	
10 Friction-enhancing activity for thermal shring fit of cam lobes	none

Intervallforderungen für emergente Bewertungszielgrößen

Bewertungszielgrößen	min	max
MASS [g]	1400	1700
Pol.Mom.of Inertia[10 ⁻⁵ mm ⁴]	0,9	1,1
Cleanliness [mg]	5	7,5
Rotary Inertia [kgmm ²]	500	600
Torque to Turn [Nm]		
Valve Cams	80	100
Pump Cam		
Drive Element	120	150
Drive Element2	120	150
Driving Element		
Fitting Element		
Radial Bearing Element	20	40
Axial Bearing Element	20	40
Trigger Element	20	40

6. Modellparametersatz

Abbildung 11-26: Modellparameter, aktiven Produkteigenschaften und Intervallforderungen für die emergenten Bewertungszielgrößen für Abfrage 16 zur Ableitung von LFC-Varianten

11.4.4 Ergebnisse der Methodenanwendung für A-Projekt 1 (PKW)

Nr.	Abf.	Benennung	CAD-Modell	Ranking				PGE - Produktgenerationsentwicklung						Gleichanteil				
				FIT	BF	NF	HPL	Total	Rang	ΔGV(int)	ΔGV(Con)	ΔGV	ΔÜV(V≠0)	ÜS/GS	ΔÜV(V=0)	T	GT	
1	14	A-Projekt 1 - RBE D24		YES	73,17%	FIT	21,74%	51,43%	1	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	23,88%	2,94	50,75%	16	0
4	14	A-Projekt 1 - RBE D24		YES	69,07%	FIT	23,78%	45,29%	2	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	22,39%	2,35	47,76%	16	0
3	14	A-Projekt 1 - RBE D24		YES	63,58%	FIT	26,17%	37,41%	3	6,06%	15,15%	21,21%	78,79%	24,24%	3,71	54,55%	17	1
6	14	A-Projekt 1 - RBE D24		YES	59,47%	FIT	27,40%	32,08%	4	7,58%	18,18%	25,76%	74,24%	22,73%	2,88	51,52%	17	1
2	14	A-Projekt 1 - RBE D24		NO	0,00%	-2,98%	24,07%	-27,05%	5	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	22,39%	2,94	52,24%	16	0
5	14	A-Projekt 1 - RBE D24		NO	0,00%	-2,98%	25,90%	-28,88%	6	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	20,90%	2,35	49,25%	16	0
2	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		YES	83,03%	FIT	13,13%	69,91%	1	1,82%	21,82%	23,64%	76,36%	20,00%	3,23	56,36%	12	0
1	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		YES	82,57%	FIT	14,90%	67,67%	2	0,00%	18,87%	18,87%	81,13%	20,75%	4,30	60,38%	12	0
5	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		YES	79,46%	FIT	16,06%	63,40%	3	3,64%	25,45%	29,09%	70,91%	18,18%	2,44	52,73%	12	0
4	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		YES	78,77%	FIT	17,84%	60,92%	4	1,89%	22,64%	24,53%	75,47%	18,87%	3,08	56,60%	12	0
3	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		NO	0,00%	-3,72%	15,55%	-19,27%	5	1,82%	21,82%	23,64%	76,36%	18,18%	3,23	58,18%	12	0
6	15	A-Projekt 1 - ohne RBE D24		NO	0,00%	-3,72%	18,23%	-21,96%	6	3,64%	25,45%	29,09%	70,91%	16,36%	2,44	54,55%	12	0

Tabelle 11-15: Ergebnisse der Abfragen 14 (mit RBE) und 15 (ohne RBE) bei konstantem Außen-Ø von Ø24mm und konstanter Wandstärke von 3 mm des Nockenwellenkörpers

Nr.	Abfrage	Benennung	CAD-Modell	Ranking				PGE - Produktgenerationsentwicklung						Gleichanteil			
				FIT	BF	NF	HPL	Rang	ΔGV(int)	ΔGV(con)	ΔGV	ΔUV(V≠0)	US(GS)	ΔUV(V=0)	I	GT	
3	16	A-Projekt 1 - LFC D24		YES	57,06%	FIT	27,50%	★1	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	29,85%	★2,94	44,78%	16	0
8	16	A-Projekt 1 - LFC D24		YES	52,99%	FIT	29,12%	★2	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	28,36%	☆2,35	41,79%	16	0
2	16	A-Projekt 1 - LFC D24		YES	46,09%	FIT	33,50%	★3	6,06%	15,15%	21,21%	78,79%	31,82%	★3,71	46,97%	17	0
6	16	A-Projekt 1 - LFC D24		YES	42,02%	FIT	34,38%	★4	7,58%	18,18%	25,76%	74,24%	30,30%	★2,88	43,94%	17	0
7	16	A-Projekt 1 - LFC D24		NO	0,00%		-2,98%	24,63%	★5	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	25,37%	49,25%	16	0
10	16	A-Projekt 1 - LFC D24		NO	0,00%		-2,98%	26,89%	★6	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	23,88%	46,27%	16	0
4	16	A-Projekt 1 - LFC D24		NO	0,00%		-2,98%	30,50%	★7	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	28,36%	46,27%	16	0
1	16	A-Projekt 1 - LFC D24		NO	0,00%		-2,98%	30,57%	★8	7,46%	17,91%	25,37%	74,63%	31,34%	43,28%	16	0
9	16	A-Projekt 1 - LFC D24		NO	0,00%		-2,98%	31,91%	★9	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	26,87%	43,28%	16	0
5	16	A-Projekt 1 - LFC D24		NO	0,00%		-2,98%	32,28%	★10	8,96%	20,90%	29,85%	70,15%	29,85%	40,30%	16	0

Tabelle 11-16: Bewertungsergebnis zur Abfrage 16 für LFC-Nockenwellen bei konstantem Außen-Ø von Ø24mm und konstanter Wandstärke von 3 mm des Nockenwellenkörper

11.4.5 Methodenrelevante Daten für A-Projekt 16 (NFZ)

Variant Decision Support System (VDSS) - Main

to edit meta data / create base rules

Admin Form

add Requirements / Rules

1. Requirement

Select workRules (current active select rules)

withRollerTappet	▼
withDRVEZ	▼
withLubricateBearing	▼
withAdjustCamshaft	▼
withCamInCam	▼
withCentralScrew	▼
withCreateSignal	▼
withDriveFuelPump	▼
withDriveOilPump	▼
withDriveVacuumPump	▼
withDRVE	▼
Standard	▼
withLFC	▼
withSupportGear	▼
withNOFuelPump	▼
withNOOilPump	▼
withNORollerTappet	▼
withNOVacuumPump	▼
withRBE	▼
withScrewdriverClearance	▼
withSealCamshaft	▼
withSeparateOilMist	▼
withSupportCamPhaser	▼
withDRVNGE	▼

3. choose RuleSet to add

Exclude workRules (current active rules)

NODRVNGE	▼
isSOHC	▼
NOAdjustCamshaft	▼
NOCamInCam	▼
NOCentralScrew	▼
NOCreatesignal	▼
NODriveFuelPump	▼
NODriveOilPump	▼
NODriveVacuumPump	▼
NODRVE	▼
NOSupportGear	▼
NOLFC	▼
NOLubricateBearing	▼
NORBE	▼
NOScrewdriverClearance	▼
NOSsealCamshaft	▼
NOSeparateOilMist	▼
NOSupportCamPhaser	▼
basedel	▼
NORollerTappet	▼
NODRVEZ	▼

clear all work Rules

Cylinders

Valves/cyl

Config SOHC ▼

Num rad. supp.

RequestID

CommonName

6. Modellparametersatz

8. Anforderungen

Assemblierung

Exportdatensätze

7. Vorassemblierung

2. generate Work Collection

combine rules with AND

according to active select rules (w/o rules all avail. variants are copied)

cfg view

work Collection Monitor

4. apply Exclude Rules ▼

these rules reduce the work collection (mark references to be excluded)

standard min. number of functions

integral min. number of functions AND min. number of parts

modular min. number of functions AND max. number of parts

Abbildung 11-27: Ein- und ausgeschlossenen Elementtypen sowie funktions- und anwendungsbezogene Eigenschaften für Abfrage 11

Requirements (tbl_Geometry)

Common_Name A-Projekt16 - DRVE

RequestID 11

Active Produkteigenschaften

CYLINDER_COUNT	6	VCAM_BASE_CIRCLE	61		Diesel
Valves/Cylinder_COUNT	4	VCAM_WIDTH	18,3		ground
SPACING	128	VCAM_LIFT	8,974		ground
DRVE_LENGTH	78,9	VCAM_TOP_RADIUS	20		ground
ANGLE_PRESET	0	PCAM_WIDTH	0		
DIST_ABE	50	PCAM_LIFT	0		
DIST_RBE	317,05	PCAM_TOP_RADIUS	0		55
DIST_RBE_X1	189,05	PCAM_BASE_CIRCLE	0		
DIST_RBE_X2	828,35	VCAM_1_1	88,05		
DIST_DRVE2	0	VCAM_1_2	162,05		
DIST_TGE	0	TGE_ROOT_DIAMETER	0		Plug
DIST_PCAM	0	TGE_SIGNAL_DIAMETER	0		
CABDY_DIAMETER	33,2	TGE_WIDTH	0		
CABAY_LENGTH	761,1	RADIAL_BEARING_DIAMETER	33,2		
CABDY_WALLTHICK	4	RADIAL_BEARING_WIDTH	24,7		
CABDY_PASS_COUNT	0	AXIAL_BEARING_DIAMETER	33,2		
CABDY_PASS_DIST	0	AXIAL_BEARING_WIDTH	25,7		250
CABDY_PASS_DIA	0	SPANNER_HEIGHT	0		
CABDY_PASS_DIST2	0	DRVNGE_LENGTH	0		400
DIST_FTE	0	DRVE2_TIP_DIAMETER	0		400
CABDY_BLOW_BY_HOLE	0	DRVE2_SEAT_WIDTH	0		
CABDY_BLOW_BY_SWIRL	0	DRVE2_SEAT_DIAMETER	0		
CABDY_DIST_CIC_PIN_HOLE	0	DRVE2_ROOT_DIAMETER	0		60

Intervalloforderungen für emergente Bewertungszielgrößen

6. Modellparametersatz

	min	max
MASS [g]	7000	9000
Pol.Mom.of Inertia[10^5 mm^4]	4	6
Cleanliness [mg]	12,5	22,5
Rotary Inertia [kgmm^2]	5000	7000
Torque to Turn [Nm]		
Valve Cams	200	
Pump Cam		
Drive Element	300	
Drive Element2	300	
Driving Element		
Fitting Element		
Radial Bearing Element		
Axial Bearing Element	40	
Trigger Element		

Abbildung 11-28: Modellparameter, aktiven Produkteigenschaften und Intervallforderungen für die emergenten Bewertungszielgrößen für Abfrage 11

11.5 Ergänzungen zum Glossar der KaSPro

Definition 2-4: Angebotsphase in der PGE - Produktgenerationsentwicklung (S. 57)

Definition 6-1: Variantenauswahlprozess im erweiterten ZHO-Modell (S. 229)

11.6 Formenzeichen und Abkürzungen

Anw.	Anwendung
AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface
ATO	Kundenauftragsspezifischer Zusammenbau auf Grundlage auftragsneutraler Vorfertigung und kundenspezifischer Endfertigung oder Montage: (engl.) Assemble-to-Order
B	Nockenbreite
BF	BEST-FIT
BI	Business Intelligence
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design (CAD)
CAS	Computer Aided Selling (CAS)
C&C ² -A	Contact and Channel Approach
Con	Konnektor von (engl.) Connector
CPM	Characteristics-Properties Modelling
CRM	Customer Relationship Management (CRM): Verwaltung von Informationen über Kunden und Vertriebsprojekte.
CTO	Kundenauftragsspezifische Konfiguration: (engl.) Configure-to-Order
$\delta_{GV(Con)}$	Gestaltvariationsanteile an den Konnektoren
$\delta_{GV(Int)}$	Gestaltvariationsanteile im Inneren der Konstruktion
$\delta_{ÜV(V \neq 0)}$	Übernahmevariationsanteile
$\delta_{ÜV(V=0)}$	Übernahmeanteile
d_f	Fügedurchmesser
d_{Gk}	Nockengrundkreisdurchmesser
DIS	Dateninformationssatz: Enthält, als ein beschreibender Teil eines Baukastenelements, feste Produkteigenschaften, die sich direkt oder indirekt auf Anforderungen beziehen können.
DRM	Design Research Methodology
DSS	Decision Support System: (dt.) Entscheidungsunterstützungssystem (EUS)
E	Einlass
EG	Produktentwicklungsgeneration
EDM	Engineering Data Management (synonym PDM)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EIS	Executive Information Systems: (dt.) Führungsinformationssystem (FIS)

ERP	Enterprise Resource Planning (ERP): Einsatzplanung der in einem Unternehmen vorhandenen Ressourcen.
ES	Expertensystem
ESS	Executive Support System
etc.	Gleichbedeutend mit usw. (und so weiter): (lat.) et cetera
ETO	Klassische, kundenspezifische Einzelfertigung: (engl.) Engineer-to-Order
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem: (engl.) Decision Support System (DSS)
FF	Forschungsfrage
FIS	Führungsinformationssystem: (engl.) Executive Information Systems (EIS)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse: (engl.) Failure Mode and Effects Analysis
G	Produktgeneration
ggf.	gegebenenfalls
GS	Gestaltvariation
GS(Con)	Gestaltvariation am Konnektor
GS(Int)	Gestaltvariation im inneren der Konstruktion
GT	Gleichteil
H	Nockenhub
HP	Hypothese
HPL	Hundertprozentlösung (100%-Lösung)
HRC	Hardness Rockwell Cone: Maßeinheit für die Härte von Werkstoffen.
Int	innen(liegend) von (engl.) internal
IPEK	Institut für Produktentwicklung
iPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell
IT	Informationstechnologie
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
Kap.	Kapitel
KI	Künstliche Intelligenz
KBE	Wissensbasierte Konstruktion: (engl.) Knowledge-based Engineering
KBS	Knowledge-based System: (dt.) Wissensbasiertes System (WBS)
LSS	Leitstützstrukturen
MIS	Management Information System: (dt.) Managementinformationssystem
MPa	Megapascal: Maßeinheit für den Druck sowie die mechanische Spannung. 1 MPa = 1 Million Pa = 1 N/mm ² und 1×10 ⁵ Pa = 1 bar.
MSS	Management Support System
MTO	Kundenspezifische Produktion: (engl.) Make-to-Order
MTS	Lagerfertigung: (engl.) Make-to-Stock. Synonym Pick-to-Order (PTO)
N	Stichprobengröße (Anzahl der abgegebenen Bewertungen)
NF	NEAREST-FIT
NFZ	Nutzfahrzeug
Nr.	Nummer
OEM	Original Equipment Manufacturer
OLAP	Online Analytical Processing

PC	Personal Computer
PDD	Property-Driven Development
PDM	Product Data Management (synonym EDM)
PGE	Produktgenerationsentwicklung: (engl.) Product Generation Engineering
PKW	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
PTO	Lagerfertigung: (engl.) Pick-to-Order. Synonym Make-to-Stock (MTS)
R	Nockenspitzenradius
PS	Prinzipvariation
Rho	Rangkorrelationskoeffizienten Rho nach Spearman
Sig.	Signifikanz
SMW-KA	Serienmittelwert-Konstruktionsaktivitäten
SMW-KL	Serienmittelwert-Konstruktionsleistung
SOM	Self-organizing Maps (Data Mining Method)
SOP	Beginn der Serienproduktion: (engl.) Start of Production (SOP) oder auch „Job No. 1“
T	Teil
TS	Tragstrukturen (TS) werden erst durch die Erfüllung der Funktion zu Leitstützstrukturen (LSS)
u.a.	unter anderem
UDF	Benutzerdefinierte Konstruktionselemente: (engl.) User defined features
US	Übernahmevariation
ÜS(V=0)	Übernahme (Gleichanteil)
ÜS(V≠0)	Übernahmevariation
V	Variation
VDSS	Variantenentscheidungsunterstützungssystem: (engl.) Variant Decision Support System (VDSS)
VoC	Die Stimme des Kunden: (engl.) Voice of Customer (VoC)
WBS	Wissensbasiertes System: (engl.) Knowledge-based System (KBS)
WP	Wirkflächen
WFP	Wirkflächenpaare
z.B.	zum Beispiel
ZHO	Ziel-, Handlungs- und Objektsystem
ZS	Zielsystem
ZUL	Zulieferunternehmen

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Markus Peter Walch
Geburtsdatum: 10. Juli 1980
Geburtsort: Karlsruhe
Wohnort: Bretten
Familienstand: verheiratet, 3 Kinder
Staatsangehörigkeit: deutsch

Bildungsgang

1987 – 1991 Richard-Hecht Grund- und Hauptschule in Stutensee Spöck
1991 – 1997 Erich-Kästner-Realschule in Stutensee Blankenloch
1997 – 2000 Allgemeine Hochschulreife, Otto-Hahn-Gymnasium in Karlsruhe
2000 – 2005 Allgemeines Maschinenbaustudium, Universität Karlsruhe (TH)
Hauptfächer: Verbrennungsmotoren und Thermische Turbomaschinen

Berufstätigkeit

Seit 01/2006 Konstruktionsingenieur bei der MAHLE GmbH in Stuttgart
Bad Cannstatt im Bereich Produktentwicklung Ventiltrieb
11/2011 – 09/2017 Berufsbegleitende Promotion mit Industriebeteiligung am
IPEK Institut für Produktentwicklung in der Forschungsabteilung
Entwicklungsmanagement und -methodik (EMM) am Karlsruher Institut für
Technologie (KIT)

