

Forschungsberichte

Quentin Lohmeyer

**Menschzentrierte Modellierung von
Produktentstehungssystemen unter besonderer
Berücksichtigung der Synthese und Analyse
dynamischer Zielsysteme**

Human-centered modeling of product development
systems in consideration of the synthesis and
analysis of dynamic systems of objectives

Band 59

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2013
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

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

ISSN 1615-8113

Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme

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

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Quentin Lohmeyer
aus Düsseldorf

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Januar 2013

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Korreferent: Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. H. Birkhofer

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 Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreißsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus 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

Vorwort zu Band 59

Die Produktentstehungsprozesse für moderne mechatronische Systeme des Maschinen- und Fahrzeugbaus haben in den letzten zwei Jahrzehnten enorm an Komplexität zugenommen. Durch die intensive Kombination mechanischer, elektronischer und informationstechnischer Lösungen sowie der Vielzahl von dabei zu berücksichtigenden Wechselwirkungen und Randbedingungen ergeben sich neuartige Herausforderungen. Zur Unterstützung des Entwicklers in der Analyse- und Synthesetätigkeit im Produktentstehungsprozess wurden vielfältige technische Lösungen entwickelt. CAD-Systeme, moderne CAE-Systeme, die virtuelle Realität, Rapid Prototyping und umfangreiche Projektmanagementtools stehen heute zur Verfügung, um den Produktentstehungsprozess zu modellieren und zu unterstützen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass in den drei Disziplinen Mechanik, Elektronik und Informationstechnik jeweils eigene Konzepte, Methoden und Werkzeuge vorhanden sind, die nicht ohne weiteres zueinander kompatibel oder auch nur verknüpfbar sind.

Produktentwicklung findet heute natürlich in interdisziplinären Teams statt. Die Arbeitsprozesse zur Zusammenarbeit in diesen Teams stellen allerdings noch immer eine große Herausforderung dar. Eine Unterstützung erfordert hier eine Erforschung und Beschreibung der Synthese- und Analyseprozesse des entwickelnden Menschen durch Modellbildung. Hierzu sind in den vergangenen drei Jahrzehnten verschiedene Ansätze erarbeitet worden, die insbesondere das Ziel hatten, ein tieferes Verständnis für den Menschen in seiner Konstruktionstätigkeit zu gewinnen. Zumeist sind diese Ansätze allerdings im Umfeld der mechanischen Konstruktion erarbeitet worden. Für die neue Komplexität bieten sich systemtheoretische Modellbildungen zur Beschreibung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen an. Hierdurch gelingt es, auf einer höheren Abstraktionsebene Zusammenhänge darzustellen. Ein sehr grundlegendes Modell in diesem Zusammenhang ist das sogenannte ZHO-Modell. Hiermit wird über die drei Komponenten „Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem“ eine ganzheitliche Beschreibung auch komplexer Vorgänge und Prozesse möglich.

Auf der Basis des ZHO-Modells forschen aktuell verschiedene Gruppen an neuen Modellierungen für Produktentstehungsprozesse. In diesem Zusammenhang kommt der Berücksichtigung des entwickelnden Menschen mit seinen individuellen Aktivitäten im Produktentstehungsprozess eine hohe Bedeutung zu. An dieser Stelle setzt die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Quentin Lohmeyer an. Er hat sich zum Ziel gesetzt, für eine neue menschzentrierte Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik ein Beschreibungsmodell zu entwickeln, das den Menschen einschließlich seines Wissens und seines Vorstellungsvermögens als zentrales

Element des Produktentstehungsprozesses versteht und so individuelle Denk- und Handlungsvorgänge bei der Entwicklung von Zielen und Objekten abbilden kann. Hierbei berücksichtigt er insbesondere die Diversität und die Dynamik heutiger Produktentstehungsprozesse. Das heißt, sowohl die Zielsysteme als auch die daraus vom Handlungssystem abgeleiteten Objekte entwickeln sich dynamisch und sind, insbesondere im Bereich der Ziele, am Anfang von einer großen Unsicherheit belegt. Hier beschreibt Herr Dr. Lohmeyer auf der Basis des ZHO-Modells den analysierenden und synthetisierenden Menschen als zentrales Element der Produktentstehung in einem ganzheitlichen Modell. Zentrale Idee ist es dabei, den Menschen selbst im Sinne des ZHO-Modells als Handlungssystem zu verstehen und zu beschreiben. Die Arbeit eröffnet einen vielversprechenden neuen Ansatz für die Forschung auf dem Gebiet der Entwicklungsmethodik.

Januar 2013

Albert Albers

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird mit dem erweiterten ZHO-Modell ein menschenzentriertes Erklärungsmodell entwickelt, das den Entwickler als denkenden und handelnden Menschen im Mittelpunkt eines unsicherheitsbehafteten und iterativ verlaufenden Produktentstehungsprozesses beschreibt. Das Modell zeigt, wie der Entwickler auf Basis seines Wissens und seines Vorstellungsvermögens in iterativen Analyse- und Syntheseschritten durchgängig fallspezifisches Wissen generiert, dann damit bestehende Wissens- und Definitionslücken schließt und so in der Entwicklung des Produktes kontinuierlich voranschreitet.

Das erweiterte ZHO-Modell basiert auf einem systemtechnischen Ansatz, welcher Produktentstehung als Interaktion von Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem beschreibt. Dabei beinhaltet das Zielsystem alle expliziten Ziele, einschließlich deren Abhängigkeiten und Randbedingungen, während das Objektsystem neben dem Produkt alle im Produktentstehungsprozess generierten Dokumente sowie alle virtuellen und physischen Produktmodelle umfasst. Das Handlungssystem ist als das System definiert, welches ein (anfangs vages) Zielsystem in ein konkretes Objektsystem überführt.

Ausgehend von dem Verständnis, dass der Mensch im Zentrum der Entwicklung steht, also er derjenige ist, welcher das Zielsystem in das Objektsystem überführt, kann der Mensch selbst als Handlungssystem beschrieben werden. Im erweiterten ZHO-Modell bildet daher der Entwickler das Handlungssystem, welches ausgehend von seiner individuellen Wissensbasis das explizite Zielsystem definiert. Durch die Analyse des Zielsystems wird die Begrenzung des Lösungsraums, d.h. des Raums, der die Menge der zulässigen Lösungen beschreibt, bestimmt. Die subjektive Wahrnehmung und Interpretation des Zielsystems führt dazu, dass jeder Entwickler einen individuellen Lösungsraum aufspannt, in welchem er Lösungen zunächst in Form mentaler Modelle vorausdenkt und diese dann als virtuelle oder physische Objekte umsetzt. Durch die Analyse dieser Objekte kann nun wiederum neues fallspezifisches Wissen gewonnen werden, welches dem Entwickler erlaubt, das Zielsystem weiter zu ergänzen, zu verfeinern oder zu verändern.

In der Arbeit werden vier Fallbeispiele vorgestellt, in denen das erweiterte ZHO-Modell im Rahmen verschiedener Produktentstehungsprozesse in der Forschung und in der industriellen Praxis experimentell angewandt und untersucht wurde. Die Fallbeispiele aus der Industrie basieren dabei jeweils auf einem etwa halbjährigen Untersuchungszeitraum, in welchem das Entwicklungsgeschehen durchgängig beobachtet und am erweiterten ZHO-Modell reflektiert wurde. Mit jedem Fallbeispiel konnten so einzelne charakteristische Aspekte des jeweiligen Entwicklungsprozesses herausgestellt und untersucht werden.

abstract

This thesis considers the development of the Advanced System Triple, which is a human-centered explanation model describing the designer, his individual thinking and his personal acting in the center of an uncertainty affected and iterative proceeded product development process. The model illustrates how the designer, based on his experience and imagination, continuously generates case-specific knowledge by iterative steps of analysis and synthesis in order to reduce both the lack of knowledge and the lack of definition and thus to increase the product development's degree of maturity.

The Advanced System Triple bases on a systems engineering approach representing product development as an interaction of three systems: the system of objectives, the operation system and the system of objects. The system of objectives contains all explicit objectives, their relationships and constraints, whereas the system of objects comprises all the documents generated in the product development process as well as all virtual and physical prototypes. The operation system is defined to be that system transferring the (initially vague) system of objectives into a concrete system of objects.

In a human-centered understanding of product development it is especially the designer, who transfers objectives into objects. Consequently the designer himself can be described as an operation system. Against this background the Advanced System Triple represents the designer as the operation system defining the explicit system of objectives on basis of individual knowledge. By analyzing this system of objectives the designer is able to build up a solution space, which is a mental space of acceptable solutions limited by the individual perception and interpretation of the explicit objectives. The solution space is then explored by the designer in order to develop solutions first in a mental way, then in form of virtual or physical objects. By analyzing these objects the designer is able to gain additional case-specific knowledge that allows a detailed defining, refining and redefining of the system of objectives.

In this thesis four exemplary cases are presented considering the experimental application of the Advanced System Triple in the context of different product development processes of research and industrial projects. Those experiments conducted in cooperation with industrial partners are based on six month long periods of examination including the observation and reflection of the model's performance. The research reveals case specific aspects of the corresponding development process and thus allows the analysis of different benefits provided by the Advanced System Triple.

Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Albert Albers gilt mein besonderer Dank. Seine wissenschaftliche Ansätze und Perspektiven gaben meiner Arbeit die so wichtigen wegweisende Impulse. Bedanken möchte ich mich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und den Freiraum den wissenschaftliche Ansatz einer Menschzentrierten Modellierung umfassend ausarbeiten und im Rahmen verschiedenster Forschungs- und Industrieprojekte am IPEK anwenden und reflektieren zu können.

Herrn Prof. Herbert Birkhofer danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats sowie für das entgegengebrachte Interesse und die wertvollen Diskussionen. Meinen aufrichtigen Dank möchte ich ihm aussprechen für die beispiellose Ernsthaftigkeit und Intensität, mit welchen er sich den Inhalten meiner Arbeit widmete.

Frau Prof. Barbara Deml danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kollegen am Institut danke ich für fünf unvergessliche Jahre, in denen ich viel erleben und erlernen durfte. Ich möchte mich bedanken für die vielseitige und nahezu selbstverständliche Unterstützung im Kleinen wie im Großen. Zutiefst dankbar bin ich hier insbesondere Björn Ebel, Tarak Turki und Jan Breitschuh für ihre zumeist schonungslose Kritik und ihren stets aufrichtigen Zuspruch.

Meiner Familie danke ich von Herzen für ihre uneingeschränkte Unterstützung. Insbesondere bei meiner Frau Jasmin möchte ich mich bedanken für all das Verständnis und den Rückhalt, den sie mir zuteilwerden ließ.

Karlsruhe, den 16. Januar 2013

Quentin Lohmeyer

„Überall geht ein früheres Ahnen dem späteren Wissen voraus.“

Alexander von Humboldt

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung	6
2.1	Komplexität und Unsicherheit	7
2.1.1	Komplexität in der Produktentstehung	7
2.1.2	Unsicherheit in der Produktentstehung	10
2.1.3	Zwischenfazit	13
2.2	Systemtheorie und Modelltheorie	14
2.2.1	Allgemeine Systemtheorie	14
2.2.2	Allgemeine Modelltheorie	17
2.2.3	Zwischenfazit	20
2.3	ZHO-Modell der Systemtechnik	21
2.3.1	Ursprünge des ZHO-Modells	21
2.3.2	Systeme des ZHO-Modells	24
2.3.3	Prinzipien des ZHO-Modells	25
2.3.4	Zwischenfazit	27
2.4	Zentrale Hypothesen nach Albers	28
2.4.1	Erste Hypothese: Einzigartigkeit von Produktentstehungsprozessen	28
2.4.2	Zweite Hypothese: System der Produktentstehung	29
2.4.3	Dritte Hypothese: Validierung	30
2.4.4	Vierte Hypothese: Zielbeschreibung in der Problemlösung	31
2.4.5	Fünfte Hypothese: Beschreibung von Funktionen	32
2.4.6	Zwischenfazit	33
2.5	Integriertes Produktentstehungsmodell iPeM	34
2.5.1	Integrierte Prozessmodellierung	34
2.5.2	Integrierte Prozessplanung und -steuerung	38
2.5.3	Integrierte Ressourcenplanung und -steuerung	40
2.5.4	Zwischenfazit	42
2.6	Handhabung von Anforderungen	43
2.6.1	Anforderungsbegriff	43
2.6.2	Anforderungserfassung	44
2.6.3	Anforderungsstrukturierung	51
2.6.4	Anforderungsmodellierung	55
2.6.5	Zwischenfazit	58
2.7	Handhabung von Zielsystemen	59
2.7.1	Zielbegriff	59
2.7.2	Zielformulierung	62

2.7.3	Zielsysteme.....	65
2.7.4	Zielsystementwicklung.....	67
2.7.5	Zwischenfazit.....	70
3	Zielsetzung der Arbeit.....	71
3.1	Berücksichtigung individueller Denk- und Handlungsabläufe.....	71
3.2	Berücksichtigung epistemischer Unsicherheit.....	72
3.3	Berücksichtigung iterativer Entwicklungsprozesse.....	73
4	Forschungsdesign.....	74
4.1	Forschungshypothesen.....	74
4.2	Forschungsfragen.....	75
4.3	Forschungsvorgehen.....	76
5	Theoretische Untersuchung.....	79
5.1	Faktor Mensch – Individuelle Denk- und Handlungsabläufe.....	80
5.1.1	Mentale Modelle.....	80
5.1.2	Reflexives Handeln.....	85
5.1.3	Zwischenfazit.....	89
5.2	Faktor Wissen – Umgang mit epistemischer Unsicherheit.....	90
5.2.1	Wissen und Wissensbasis.....	90
5.2.2	Problem- und Lösungsraum.....	96
5.2.3	Zwischenfazit.....	104
5.3	Faktor Prozess – Iterative Analyse und Synthese.....	105
5.3.1	Analyse und Synthese.....	105
5.3.2	Iteration.....	109
5.3.3	Zwischenfazit.....	113
6	Erweitertes ZHO-Modell.....	114
6.1	Aufbau des erweiterten ZHO-Modells.....	115
6.1.1	Mensch als Handlungssystem.....	115
6.1.2	Analyse des Objektsystems.....	116
6.1.3	Synthese des Zielsystems.....	117
6.1.4	Analyse des Zielsystems.....	118
6.1.5	Synthese des Objektsystems.....	119
6.2	Zweck des erweiterten ZHO-Modells.....	120
6.2.1	Abbilden einer menschenzentrierten Entwicklung.....	120
6.2.2	Abbilden der co-evolutionären Systementwicklung.....	121
6.2.3	Abbilden des iterativen Entwicklungsprozesses.....	122
7	Experimentelle Untersuchung.....	123
7.1	Fallbeispiel 1: Konvergenz des Lösungsraums.....	124
7.1.1	Entwicklungssituation.....	124

7.1.2	Entwicklungscharakteristik.....	125
7.1.3	Entwicklungsbeschreibung	126
7.1.4	Reflektion.....	128
7.2	Fallbeispiel 2: Entwicklung im Team.....	130
7.2.1	Entwicklungssituation	130
7.2.2	Entwicklungscharakteristik.....	131
7.2.3	Entwicklungsbeschreibung	132
7.2.4	Reflexion.....	134
7.3	Fallbeispiel 3: Dimensionen von Zielen	137
7.3.1	Entwicklungssituation	137
7.3.2	Entwicklungscharakteristik.....	138
7.3.3	Entwicklungsbeschreibung	139
7.3.4	Reflexion.....	141
7.4	Fallbeispiel 4: Einbindung des Kunden	143
7.4.1	Entwicklungssituation	143
7.4.2	Entwicklungscharakteristik.....	144
7.4.3	Entwicklungsbeschreibung	145
7.4.4	Reflexion.....	147
8	Bedeutung der Arbeit.....	149
8.1	Bedeutung für die Forschung	149
8.2	Bedeutung für die Praxis	150
8.3	Bedeutung für die Lehre	151
9	Zusammenfassung und Ausblick	152
9.1	Zusammenfassung	152
9.2	Ausblick	154
10	Literaturverzeichnis	157
11	Glossar	173

1 Einleitung

Der denkende und handelnde Mensch ist das zentrale Element des Systems der Produktentstehung. Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts prägte Ferdinand REDTENBACHER, der Begründer des wissenschaftlichen Maschinenbaus, dieses menschenzentrierte Verständnis, indem er darlegte, dass erst durch die *combinierte Methode*, in welcher sich Gefühl, Erfahrung und Rechnung des Konstruierens wechselseitig unterstützen, der größte Reichtum von Mitteln dargeboten und so am einfachsten, schnellsten und sichersten zum Ziele geführt werde¹. Die Vielfältigkeit und Wechselhaftigkeit im Entstehungsprozess eines Produktes erfordert daher, früher wie heute, eben die Fähigkeiten des Menschen, die nicht nur auf Wissenschaft und Handwerk beruhen, sondern auch, und zwar in nicht geringem Grade, auf Geistestätigkeiten, die künstlerisch genannt werden müssen².

Auf Basis dieses Verständnisses kann das Ziel der Konstruktions- und Entwicklungswissenschaften somit nicht darin bestehen, den Prozess einer Produktentstehung vollständig berechenbar, definierbar oder gar automatisierbar zu machen. Stattdessen gilt es die Menschen, d.h. die Konstrukteure und Entwickler, im System der Produktentstehung zu unterstützen und ihr analytisches und schöpferisches Potential in vollem Umfang offenlegen und nutzen zu lassen. Es ist dabei nicht allein ausreichend, den Menschen zu kreativen Hochleistungen zu befähigen; die Herausforderung liegt vielmehr darin, die kreativen Ideen mit hoher Treffsicherheit und Qualität auch unter den schwierigen Randbedingungen von Komplexität und Interdisziplinarität umzusetzen³.

Neuere Forschungsarbeiten zur Akzeptanz von wissenschaftlich entwickelten Methoden und Werkzeugen in der industriellen Praxis erlauben die Schlussfolgerung, dass das Verständnis von REDTENBACHER in den Konstruktions- und Entwicklungswissenschaften nahezu verloren gegangen ist. Vielen Ansätzen mangelt es an spürbarer oder messbarer *Performance*, an angenehmer und intuitiver *Präsentation* und nicht zuletzt an einer sinnvollen *Prozessanbindung*⁴. Insbesondere der allgemein iterative Prozessverlauf sowie die schrittweise Problem- und Zielklärung werden seitens der Forschung kaum berücksichtigt⁵.

¹ vgl. Redtenbacher 1852, S.291

² vgl. Redtenbacher 1848, S.IV, Bader 1858, S.151

³ vgl. Albers 2011

⁴ vgl. Badke-Schaub, Daalhuizen & Roozenburg 2011

⁵ vgl. Bender 2004, S.104

ALBERS⁶ versteht Produktentstehung als sozio-technisches System, das nicht nur durch technische und wirtschaftliche Elemente, sondern in ganz wesentlichem Maße durch die beteiligten Personen geprägt ist. Diese menschenzentrierte Sicht beschreibt die Entwicklung eines Produktes als wissensbasierte Tätigkeit mit vernetztem, teilweise intransparentem und oft dynamischem Charakter in einem komplexen Umfeld, weshalb der Entwickler zumeist im Zustand von Unsicherheit handeln muss⁷.

Unsicherheit kann dabei im Allgemeinen zurückgeführt werden auf einen Mangel an Definition (lack of definition) sowie einen Mangel an Wissen (lack of knowledge)⁸. Um folglich den Grad an Unsicherheit bereits zu Beginn eines neuen Produktentstehungsprozesses auf ein vertretbares Maß zu reduzieren, ist jedes Unternehmen bestrebt, zu großen Teilen auf bekannten Definitionen und bestehendem Wissen aufzubauen.

Unsicherheiten gehen somit oft mit dem Neuheitsgrad einer Produktentwicklung einher. Dabei darf die Neuheit einer Entwicklung nicht auf die Frage beschränkt werden, ob bekannte oder bislang unbekannte Lösungsprinzipien verwendet werden, d.h. ob es sich um eine Anpassungskonstruktion oder eine Neukonstruktion handelt⁹. ALBERS¹⁰ geht davon aus, dass mehr als 90% aller Innovationsprojekte in der Produktentstehung auf bekannten Lösungsprinzipien beruhen und der Lösungsraum zudem in vielen Bereichen restriktiv vorgegeben ist. Doch eben diesen Lösungsraum gilt es gezielt zu explorieren und kreativ zu nutzen. Obwohl bewährte Lösungsprinzipien verwendet werden, handelt es sich dabei zumeist dennoch um hoch komplexe und anspruchsvolle Entwicklungsaufgaben, bei denen Innovationen durchaus möglich sind, auch wenn die Potentiale insbesondere in konstruktiven Details und gestalterischen Feinheiten zu finden sind. Es handelt sich hierbei keineswegs um Anpassungskonstruktionen im Sinne einer lediglich an neue Randbedingungen angepassten Gestaltung¹¹, sondern vielmehr um *evolutionäre Produktgenerationsentwicklungen*¹².

Die den Innovationserfolg behindernden Barrieren sind dabei insbesondere darin zu sehen, dass Produktentstehung nach wie vor in Fachdisziplinen abgegrenzt und somit nicht ganzheitlich gedacht wird. Es ist daher notwendig von einer fachdisziplinentorientierten zu einer systemorientierten Produktentstehung überzugehen¹³.

⁶ vgl. Albers 2011

⁷ vgl. Badke-Schaub und Frankenberger 2004, S. 25

⁸ vgl. Hastings & McManus 2004

⁹ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.4

¹⁰ vgl. Albers 2011

¹¹ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.94f

¹² vgl. Albers 2011

¹³ vgl. Albers & Gausemeier 2010

Die Modellierung von sozio-technischen Produktentstehungssystemen kann durch das ZHO-Modell nach ROPOHL¹⁴ erfolgen. Der Ansatz basiert auf der allgemeinen Systemtheorie und bildet ein Produktentstehungssystem als Systemtripel aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem ab. Die Entstehung eines Produktes lässt sich so als die Überführung eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein geeignetes Handlungssystem beschreiben¹⁵. Das ZHO-Modell berücksichtigt dabei die kontinuierliche und wechselseitige Entwicklung von Ziel- und Objektsystem und weist daher die Eignung auf, den iterativen Charakter unsicherheitsbehafteter Entwicklungsprozesse besonders gut abbilden zu können.

Das Zielsystem, welches alle expliziten Ziele und Randbedingungen, einschließlich ihrer Begründung und Wechselwirkung enthält, wird entlang des Produktentstehungsprozesses kontinuierlich erweitert, verfeinert und mitunter auch geändert¹⁶. Demnach besteht eine zentrale Aufgabe des Handlungssystems – und hier insbesondere des entwickelnden Menschen – darin, die dynamische Entwicklung des Zielsystems in einer Vielzahl aufeinanderfolgender Synthese- und Analyseschritte iterativ voranzutreiben.

Zielführend ist dies aber nur dann, wenn die in der Entwicklung generierten Objekte systematisch validiert werden, um so kontinuierlich fallspezifisches Wissen zu gewinnen, d.h. Unsicherheiten zu verringern, und somit das Zielsystem kontinuierlich zu konkretisieren. Eine besondere Herausforderung für den Menschen besteht hierbei darin, die vielfältigen, in Objekten enthaltenden Informationen zu extrahieren und ins Zielsystem zu überführen. ALBERS und DÜSER¹⁷ sehen insbesondere bei den Aktivitäten der Validierung den Bedarf und das Potential, durch neue Ansätze effizienter vorzugehen, d.h. bei geringeren Validierungsaufwänden mehr fallspezifisches Wissen zu generieren.

Eine menschenzentrierte Konstruktions- und Entwicklungsmethodik, wie sie unter anderem von BADKE-SCHAUB et al.¹⁸ und ALBERS et al.¹⁹ gefordert wird, benötigt menschenzentrierte Modelle, welche Komplexität und Unsicherheit in Produktentstehungsprozessen zulassen, kontinuierliche Wissensgewinnung und iterative Zielklärung berücksichtigen, wissenschaftliche und künstlerische Lösungsfindung kombinieren und in denen nicht zuletzt die Entwickler sich und ihre Tätigkeiten wiederfinden.

¹⁴ vgl. Ropohl 1975

¹⁵ vgl. Albers 2010

¹⁶ vgl. Meboldt 2008, S.188ff.

¹⁷ vgl. Albers & Düser 2010

¹⁸ vgl. Badke-Schaub, Daalhuizen & Roozenburg 2011

¹⁹ vgl. Albers & Lohmeyer 2012

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung und Untersuchung eines systemorientierten Erklärungsmodells, das die zentrale Rolle des denkenden und handelnden Menschen im System der Produktentstehung darstellt. Zweck des Modells soll es sein, den iterativen Prozessverlauf von Aktivitäten der Prinzip- und Gestaltmodellierung und Aktivitäten der Validierung so abzubilden, dass Rückschlüsse darüber gezogen werden können, wie der Mensch entlang des Produktentstehungsprozesses kontinuierlich fallspezifisches Wissen gewinnt und dieses zur Verfeinerung und Veränderung des Zielsystems verwendet.

Die Forschungsarbeit ist entsprechend Bild 1-1 in neun Kapitel eingeteilt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. In **Kapitel 2** werden die Grundlagen dieser Arbeit beschrieben. Dazu wird zunächst der derzeitige Forschungsstand zu Verständnis und Bedeutung von Komplexität und Unsicherheit im Umfeld der Produktentstehung aufgezeigt. Als grundlegende Ansätze für diese Arbeit werden im Weiteren das ZHO-Modell, die zentralen Hypothesen nach ALBERS und das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM vor dem theoretischen Hintergrund der System- und Modelltheorie vorgestellt. Ferner werden bestehende Arbeiten und Ansätze zur Handhabung von Anforderungen und Zielen aufgeführt und vergleichend diskutiert.

Darauf aufbauend wird in **Kapitel 3** die Zielsetzung der Arbeit präzisiert. In **Kapitel 4** werden ergänzend dazu die grundlegenden Annahmen für diese Forschungsarbeit aufgeführt, die zu behandelnden Forschungsfragen abgeleitet und das methodische Forschungsvorgehen umschrieben.

Kapitel 5 umfasst die theoretische Untersuchung der Forschungsfragen. Dazu wird ein vertiefter Einblick in relevante wissenschaftliche Ansätze vorgenommen, um deren Inhalte und Ergebnisse im Kontext der identifizierten Forschungsfragen zu untersuchen. Der *Faktor Mensch* wird in diesem Zusammenhang insbesondere unter den kognitions- und arbeitspsychologische Aspekte der mentalen Modellbildung und der Handlungsregulation betrachtet. Der *Faktor Wissen* behandelt den Umgang mit Unsicherheit sowie die co-evolutionäre Entwicklung von Problem- und Lösungsraum. Mit dem *Faktor Prozess* werden Forschungen zu Analyse-Synthese-Zyklen und Iterationen eingehender untersucht.

Auf Basis der vorgestellten Grundlagen und der in der theoretischen Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse wird in **Kapitel 6** ein systemorientiertes Erklärungsmodell entwickelt, das der oben genannten Zielsetzung entspricht. Das sogenannte *Erweiterte ZHO-Modell* stellt den entwickelnden Menschen mitsamt seines individuellen Wissens und seiner Fähigkeit, Lösungsräume zu bilden und zu nutzen, ins Zentrum des Modells. Der Mensch bildet so den Mittelpunkt des Produktentstehungsprozesses, welcher in Form einer liegenden Acht als iterative und co-evolutionäre Synthese und Analyse von Ziel- und Objektsystem abgebildet wird.

Kapitel 7 beinhaltet die Durchführung und Auswertung von experimentellen Untersuchungen des erweiterten ZHO-Modells in insgesamt vier Fallbeispielen. Im Rahmen von teilnehmenden Beobachtungen und semi-strukturierten Interviews wird das Modell zur Erklärung realer Entwicklungssituationen herangezogen. Dabei wird die Aussagefähigkeit des Modells von Entwicklern und Konstrukteuren hinsichtlich Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken bewertet. Ausgehend von den in der Untersuchung gewonnenen Erkenntnissen wird das erweiterte ZHO-Modell im Rahmen der Fallbeispiele zweckspezifisch angepasst, um so z.B. auch die Interaktion mehrerer Individuen im Team abbilden und untersuchen zu können.

In **Kapitel 8** wird das erweiterte ZHO-Modell vor dem Hintergrund der durchgeführten Untersuchungen diskutiert und hinsichtlich seiner Bedeutung für die Forschung, die Praxis und die Lehre bewertet. **Kapitel 9** fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten.

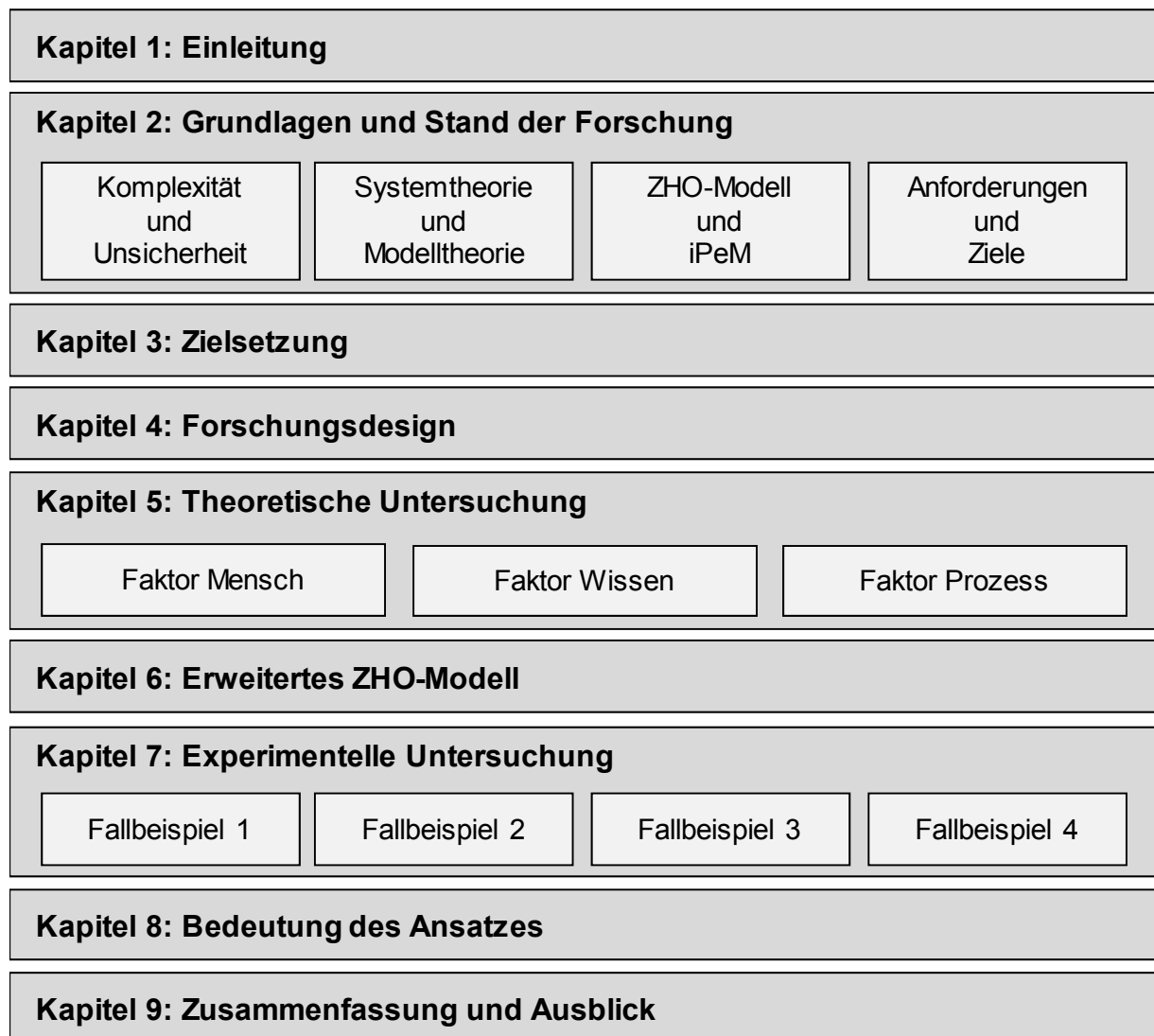


Bild 1-1: Übersicht über Aufbau und Struktur der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen der Arbeit vorgestellt und diskutiert. Aus dem erarbeiteten Stand der Forschung wird im Folgenden zudem der Handlungsbedarf und somit die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

Die grundlegende Herausforderung heutiger Produktentstehungsprozesse resultiert aus der stetigen Zunahme der darin enthaltenen **Komplexität**. Diversität und Dynamik erschweren es, Einflussfaktoren und ihre Zusammenhänge transparent und aktuell darzustellen. Die daraus resultierende **Unsicherheit** ist ein zentraler Betrachtungsgegenstand derzeitiger Forschungsarbeiten im Umfeld der Produktentstehung.

Wissenschaftliche Ansätze zum Umgang mit Komplexität und Unsicherheit basieren zumeist auf den Grundlagen der allgemeinen Systemtheorie sowie der allgemeinen Modelltheorie. Die **Systemtheorie** bietet verschiedene Möglichkeiten, Elemente und Relationen zu strukturieren und so Transparenz zu erzeugen. Die **Modelltheorie** erlaubt es zudem, durch das vereinfachte Abbilden von Systemen einen zweckorientierten Kompromiss aus Transparenz und Aktualität zu finden.

Eine wesentliche Basis dieser Arbeit stellt das ZHO-Modell der Systemtechnik dar. Das **ZHO-Modell** beschreibt Produktentstehung durch drei miteinander wechselwirkende Systeme: Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem. Zum Stand der Forschung werden hier die Ursprünge des Modells erläutert und die einzelnen Systeme sowie die Prinzipien des ZHO-Modells vorgestellt und beschrieben.

Die fünf **zentralen Hypothesen nach ALBERS** bilden eine weitere Grundlage dieser Arbeit. Die einzelnen Hypothesen werden kurz darlegt und erläutert. In diesem Zusammenhang wird auch das **integrierte Produktentstehungsmodell iPeM**, einschließlich seiner wesentlichen Bestandteile, vorgestellt. Zudem wird ein Einblick gegeben, welche Möglichkeiten das iPeM zur integrierten Modellierung von Produktentstehungsprozessen bietet und wie es zur flexiblen Planung und Steuerung von Aktivitäten und Ressourcen in Entwicklungsprojekten genutzt werden kann.

Die letzten beiden Unterkapitel behandeln das Verständnis des Anforderungsbegriffs und des Zielbegriffs im Kontext der Produktentstehung. Die jeweiligen Begriffe werden im Einzelnen erläutert und voneinander abgegrenzt. Des Weiteren werden bestehende Ansätze zur **Handhabung von Anforderungen** sowie zur **Handhabung von Zielsystemen** untersucht. Hierzu werden Methoden und Werkzeuge betrachtet, die zur Erfassung, Strukturierung und Modellierung von Anforderungen sowie zur Zielformulierung und zur Zielsystementwicklung verwendet werden.

2.1 Komplexität und Unsicherheit

2.1.1 Komplexität in der Produktentstehung

Der Begriff der Komplexität wird umfassend in verschiedensten Zusammenhängen verwendet. Unter wissenschaftlicher Betrachtung stellt WEBER²⁰ unterschiedliche Definitionen von Komplexität vor und diskutiert ausgehend davon die Frage, was Komplexität im Allgemeinen sowie speziell im Kontext der Produktentstehung bedeutet. Er stellt dabei abschließend fest, dass derzeit kein allgemeingültiges Verständnis von Komplexität herrscht, die unterschiedlichen Sichten jedoch wichtig sind, um sich den vielseitigen Herausforderungen im Umgang mit Komplexität annehmen zu können. Im Bereich der Produktentstehung wird Komplexität dabei zumeist im Zusammenhang mit komplexen, sowohl technischen wie auch sozio-technischen Systemen genannt.

Zudem hat sich in den vergangenen Jahren die Unterscheidung von struktureller und dynamischer Komplexität bewährt²¹. **Strukturelle Komplexität** (vgl. Bild 2-1) kann im Allgemeinen beschrieben werden als das Zusammenwirken einer hohen Quantität und Diversität einzelner Elemente (Varietät) sowie einer hohen Quantität und Diversität ihrer Relationen (Konnektivität)²². Diversität verursacht Intransparenz im Produktentstehungsprozess, welcher durch die methodische Entwicklung von Modellen zur Strukturierung, wie z.B. Design Structure Matrices (DSM)²³ oder Contact & Channel-Modellen (C&C²-M)²⁴ entgegen gewirkt werden kann.

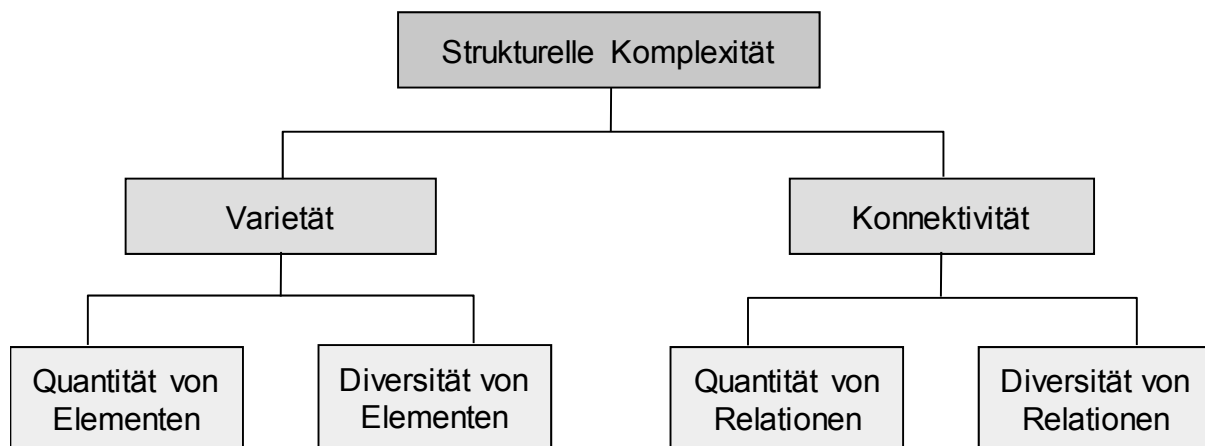


Bild 2-1: Strukturelle Komplexität als Folge von Quantität und Diversität²⁵

²⁰ vgl. Weber 2005

²¹ vgl. Braha & Bar-Yam 2006

²² vgl. Patzak 1982, S.22ff.

²³ vgl. Maurer 2007

²⁴ vgl. Oerding 2009

²⁵ vgl. Patzak 1982, S.23

Dynamische Komplexität resultiert aus Änderungen im Produktentstehungsprozess. Änderung bedeutet in diesem Zusammenhang ein Abweichen der aktuellen Situation (IST) von der geplanten Situation (SOLL). Das Abweichen von SOLL und IST wird als Problem bezeichnet, wobei ALBERS²⁶ hier zwischen einem erwarteten Abweichen (Planungssituation) und einem unerwarteten Abweichen (Notsituation) unterscheidet. Der Umgang mit Dynamik im Produktentstehungsprozess ist folglich im kontinuierlichen Erkennen und Bewältigen von SOLL-IST-Abweichungen zu sehen. Dabei ist eine besondere Herausforderung in der Analyse der Tragweite (Chancen und Risiken) zu sehen, da diese, auch aufgrund der strukturellen Komplexität, nur begrenzt vorherzusehen sind.

Strukturelle Komplexität	hoch	Kompliziertes System	Äußerst komplexes System
	gering	Einfaches System	Relativ komplexes System
		gering	hoch
		Dynamische Komplexität	

Bild 2-2: Strukturelle und dynamische Komplexität von Systemen nach SCHUH²⁷

Durch die in Bild 2-2 dargestellte Matrix können, ausgehend von der jeweiligen Ausprägung struktureller (Vielzahl/Vielfalt) und dynamischer Komplexität (Veränderlichkeit/Dynamik), vier grundsätzliche Systemtypen unterschieden werden:

- einfache Systeme (wenig Elemente, Beziehungen und Verhaltensmöglichkeiten)
- komplizierte Systeme (viele Elemente und Beziehungen; Verhalten ist deterministisch)
- relativ komplexe Systeme (wenig Elemente und Beziehungen; hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten; keine vollständige Beherrschbarkeit möglich)
- äußerst komplexe Systeme (Vielzahl von Elementen mit vielfältigsten Beziehungen; große Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten mit veränderlichen Wirkungsverläufen zwischen den Elementen)²⁸.

²⁶ vgl. Albers, Burkardt, Meboldt & Saak (2005)

²⁷ vgl. Schuh (2005), S.6

Eine weitere Möglichkeit der Klassifikation von Komplexität kann entsprechend des betrachtenden Systems vorgenommen werden. LINDEMANN et al.²⁹ schlagen beispielsweise eine Untergliederung in Marktkomplexität, Produktkomplexität, Organisationskomplexität und Prozesskomplexität vor. EARL et al.³⁰ sehen Komplexität jedoch gerade in der übergeordneten Wechselwirkung der genannten Systeme begründet (vgl. Bild 2-3).

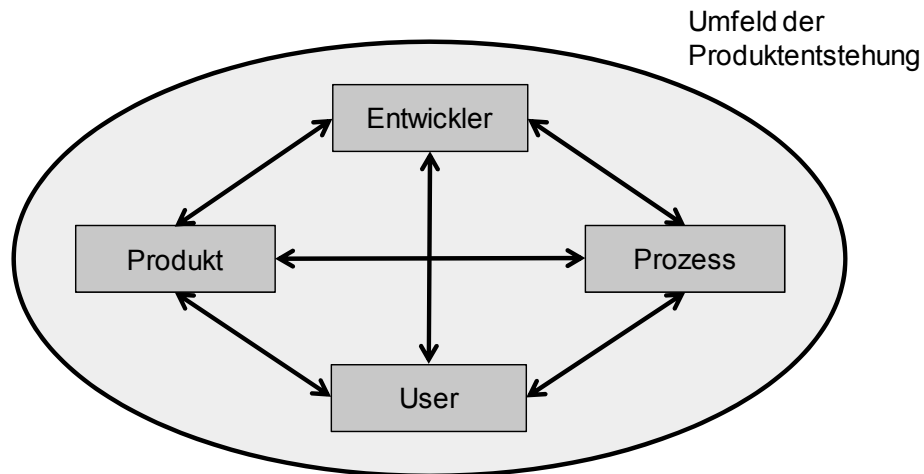


Bild 2-3: Grundlegendes Beziehungsnetzwerk in der Produktentstehung³¹

Der Umgang mit Komplexität wird gemeinhin als Herausforderung aufgefasst, wobei sich zwei grundsätzliche Wege aufgezeigt haben, um sich dieser zu stellen: (1) Die **Komplexitätsreduktion** umfasst Ansätze der Vereinfachung. Dies ist allerdings nur möglich, sofern das komplexe System auch vollständig beeinflusst werden kann. So kann beispielsweise die Anzahl der am Markt angebotenen Produktvarianten durch das herstellende Unternehmen selbst bestimmt und folglich auch reduziert werden³². (2) Die Ansätze des **Komplexitätsmanagements** verfolgen dahingegen das Ziel, komplexe Systeme, auch solche, die sich der eigenen Kontrolle entziehen, handhaben zu können³³. Die Komplexität des Marktes beispielsweise kann nicht reduziert werden. Jede vereinfachte Betrachtung würde den Verlust relevanter Information zur Folge haben. Folglich ist es möglich, die betrachtete Komplexität eines solchen Systems zu reduzieren, nicht jedoch die Komplexität des Systems selbst. SCHUH³⁴ unterscheidet an dieser Stelle auch zwischen interner und externer Komplexität, d.h. zwischen beeinflussbarer und nicht beeinflussbarer Komplexität.

²⁸ vgl. Schuh (2005), S.5f.

²⁹ vgl. Lindemann, Maurer & Braun 2009, S.14

³⁰ vgl. Earl, Johnson & Eckert 2005

³¹ vgl. Earl, Johnson & Eckert 2005

³² vgl. Jonas & Krause 2010

³³ vgl. Albers, Deigendesch & Meboldt 2008

³⁴ vgl. Schuh 2005, S.13ff.

2.1.2 Unsicherheit in der Produktentstehung

Eine ergänzende Sicht auf Komplexität wird unter anderem von SUH³⁵ vertreten. SUH geht davon aus, dass Komplexität in ihrem Kern Unsicherheit ist. Dabei beinhaltet der Begriff Unsicherheit nach DE WECK et al.³⁶ sowohl die Wahrscheinlichkeit, dass sich getroffene Annahmen während des Produktentstehungsprozesses als fehlerhaft erweisen, als auch dass vollständig unbekannte Sachverhalte auftreten, welche die Entwicklung eines Produktes und dessen Erfolg am Markt maßgeblich beeinflussen.

WYNN et al.³⁷ unterscheiden im Kontext der Produktentstehung insbesondere zwischen epistemischer und aleatorischer Unsicherheit. **Epistemische Unsicherheit** bezeichnet Unsicherheit, die durch Erkenntnisgewinn, d.h. insbesondere durch Validierungsaktivitäten, reduziert werden kann. **Aleatorische Unsicherheit** dahingegen basiert nicht auf Erkenntnis, sondern, wie beispielsweise im Fall der Fertigungsstreuung, auf Wahrscheinlichkeit, so dass hier insbesondere stochastische Methoden zur Reduzierung von Unsicherheiten angewendet werden können.

Eine detailliertere Betrachtung bietet das Unsicherheitsmodell des Sonderforschungsbereichs 805 (vgl. Bild 2-4). Dieses nutzt eine Einteilung in die vier Grundtypen (1) Stochastische Unsicherheit mit bekannter Wahrscheinlichkeit und Bedeutung, (2) Ungewissheit bzw. Mehrdeutigkeit mit bekannter Wahrscheinlichkeit aber unbekannter Bedeutung, (3) Unsicherheit mit unbekannter/unvollständiger Wahrscheinlichkeit und bekannter Bedeutung sowie (4) Unkenntnis mit unbekannter Wahrscheinlichkeit und unbekannter Bedeutung³⁸.

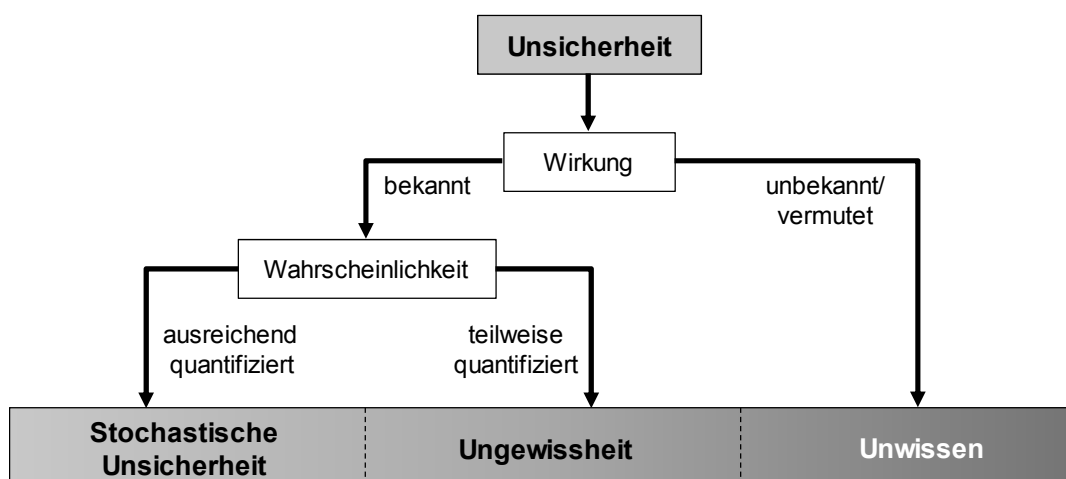


Bild 2-4: Unsicherheitsmodell des SFB 805 nach HANSELKA und PLATZ³⁹

³⁵ vgl. Suh 1999

³⁶ vgl. de Weck, Eckert & Clarkson 2007

³⁷ vgl. Wynn, Grebici & Clarkson 2011

³⁸ vgl. Hanselka & Platz 2010

³⁹ vgl. Hanselka & Platz 2010

In einer Literaturstudie zum Verständnis von Unsicherheit in der Produktentstehung stellen KREYE et al.⁴⁰ fest, dass diese Thematik im Verlauf der letzten zehn Jahre stark an Relevanz gewonnen hat. In den über 50 untersuchten Forschungsarbeiten wird der Begriff der Unsicherheit jedoch in verschiedener Definition und in unterschiedlichem Kontext verwendet. KREYE et al. ordnen die untersuchten Arbeiten daher vier übergeordneten Bereichen von Unsicherheit zu: Kontextunsicherheit, Datenunsicherheit, Modellunsicherheit und phänomenologischer Unsicherheit.

Kontextunsicherheit leitet sich aus der Entwicklungssituation ab. DE WECK et al.⁴¹ unterscheiden hier, ausgehend vom Grad der Beeinflussbarkeit, zwischen einer internen und einer externen Unsicherheit. CHALUPNIK et al.⁴² ergänzen, dass mit zunehmender Einbeziehung des Kontextes die Möglichkeiten der zielorientierten Einflussnahme kontinuierlich abnehmen (vgl. Bild 2-5).

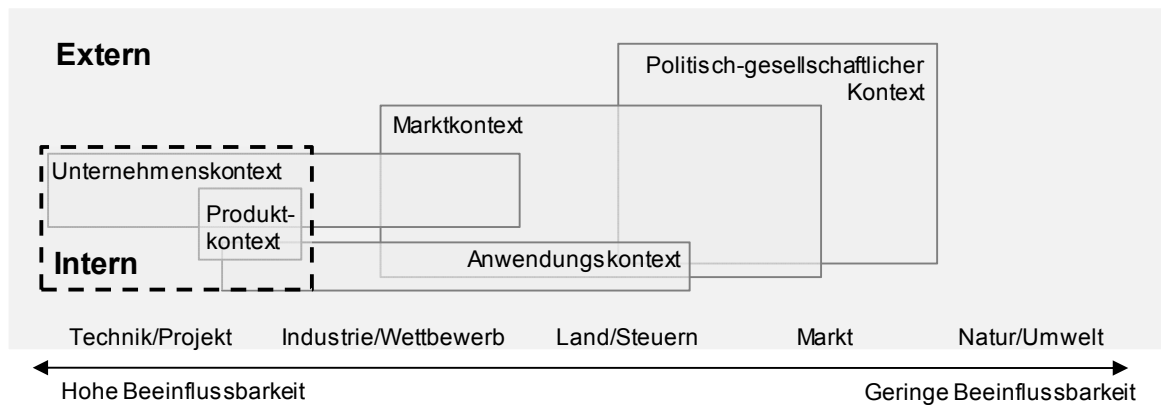


Bild 2-5: Unsicherheit als Größe der Beeinflussbarkeit nach CHALUPNIK et al.⁴³

Datenunsicherheit tritt im Zusammenhang mit der Erfassung und Verwendung von Produktparametern auf. Produktentstehung ist auf eine umfassende Datenbasis angewiesen, die sich jedoch für gewöhnlich durch ein erhebliches Maß an Unvollständigkeit, Ungenauigkeit und Unverlässlichkeit auszeichnet. Ähnlich verhält es sich mit Modellunsicherheit. Diese geht aus dem für ein Modell charakteristischem Merkmal der Verkürzung hervor. Modelle bilden immer nur einen Teil der Wirklichkeit ab und verhalten sich somit nur verhältnismäßig realistisch bzw. nur verhältnismäßig genau und verlässlich⁴⁴. Phänomenologische Unsicherheit definieren KREYE et al.⁴⁵ als die Unvorhersagbarkeit zukünftiger Ereignisse und Einflüsse, was der bereits erwähnten aleatorischen Unsicherheit entspricht.

⁴⁰ vgl. Kreye, Goh & Newnes 2011

⁴¹ vgl. de Weck, Eckert & Clarkson 2007

⁴² vgl. Chalupnik, Wynn & Clarkson 2009

⁴³ vgl. Chalupnik, Wynn & Clarkson 2009

⁴⁴ vgl. Meboldt 2008, S.102f.

⁴⁵ vgl. Kreye, Goh & Newnes 2011

Die Ursachen für Unsicherheit in der Produktentstehung sehen HASTINGS und MCMANUS⁴⁶ insbesondere in zwei Bereichen. Sie beschreiben die Unsicherheit grundsätzlich auf bestehende **Wissenslücken** (engl.: lack of knowledge) oder aber auf bestehende **Definitions-lücken** (engl.: lack of definition) zurückzuführen ist. Wissenslücken beinhalten, dass das für die Entwicklung des richtigen Produktes notwendige Wissen nicht oder nur unzureichend bekannt ist. Definitions-lücken dahingegen sind dadurch charakterisiert, dass über wichtige Aspekte des Produktes nicht bzw. noch nicht entschieden wurde und das Produkt daher unzureichend bestimmt ist. Ausgehend von dieser Klassifikation, können Unsicherheiten im Produktentstehungsprozess vermindert werden, indem entweder der kontinuierliche Zugewinn von relevanter Information den Mangel an Wissen reduziert, oder die notwendigen Entscheidungen und Spezifikationen vorgenommen werden. Für das Schließen von Definitions-lücken wird in der Praxis oft auf das Mittel der Abschätzung zurückgegriffen⁴⁷, während sich für das Schließen von Wissenslücken insbesondere die Methoden der virtuellen und physischen Validierung eignen⁴⁸.

LINDEMANN und LORENZ⁴⁹ sehen beim Umgang mit Unsicherheit insbesondere Bedarf bei der Unterstützung flexibler Prozesse, der Berücksichtigung der frühen Phase, der Entwicklung von Alternativen und der Förderung interdisziplinärer Zusammenarbeit. (1) Die Wichtigkeit flexibler Prozessmodelle ist darin begründet, dass sie, im Gegensatz zu sequentiellen Modellen, ein individuell iteratives Vorgehen zulassen⁵⁰, welches wiederum das kontinuierliche Schließen von Definitions- und Wissenslücken ermöglicht. (2) Die sogenannte „Frühe Phase“ bezeichnet die Phase der Produktentstehung, in welcher über die wichtigsten Definitionen des Produktes entschieden werden soll, obwohl hier ein maximales Defizit an Wissen vorliegt⁵¹. Folglich sind die in dieser Phase getroffenen Entscheidungen als besonders unsicherheitsbehaftet einzustufen. (3) Die Entwicklung von Alternativen ermöglicht es durch vergleichende Bewertung Definitions-lücken begründet zu schließen sowie bei hinzugewonnenem Wissen gegebenenfalls auf eine alternative Lösung überzugehen. (4) Die Förderung interdisziplinärer Zusammenarbeit verstärkt den Austausch von Wissen, so dass Wissenslücken besser identifiziert und geschlossen werden können. Des Weiteren begünstigt das disziplinübergreifende Schließen von Definitions-lücken den Grad der Vollständigkeit und Verlässlichkeit von Entscheidungen⁵².

⁴⁶ vgl. Hastings & McManus 2004

⁴⁷ vgl. Adolphy, Gericke & Blessing 2009

⁴⁸ vgl. Albers & Düser 2010

⁴⁹ vgl. Lindemann & Lorenz 2008

⁵⁰ vgl. Albers, Sadowski & Marxen 2011

⁵¹ vgl. Muschik 2011, S.18f.

⁵² vgl. Albers, Ebel & Alink 2011

2.1.3 Zwischenfazit

Heutige Produktentstehungsprozesse sind als äußerst komplexe Systeme zu verstehen, die sich durch ein hohes Maß an Diversität und Dynamik auszeichnen. Die Folge von struktureller und dynamischer Komplexität ist insbesondere darin zu sehen, dass kein Produktentstehungsprozess wie der andere verläuft. Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell⁵³ und somit im Vorfeld auch nicht vollständig planbar.

Eingeschränkte Planbarkeit als Folge von Komplexität ist ein Indikator für Unsicherheit, d.h. es bestehen Wissens- und Definitionslücken, die nicht zu Beginn eines Produktentstehungsprozesses, sondern erst im Verlauf desselbigen geschlossen werden können. Das kontinuierliche Schließen von Wissens- und Definitionslücken ist als ein iterativer Prozess zu verstehen, den es durch entsprechend flexible Prozessmodelle zu unterstützen gilt.

Die grundlegende Problematik bei unsicherheitsbehafteten Prozessen besteht darin, dass einerseits ein sachlich begründetes Schließen von Definitionslücken nur auf Basis des entsprechenden problemspezifischen Wissen erfolgen kann, andererseits aber das zweckmäßige Schließen von Wissenslücken der zielgerichteten Definition davon bedarf, welches Wissen gewonnen werden soll. Folglich benötigt das Definieren entsprechendes Wissen und die Wissensgewinnung entsprechende Definitionen. Diese enge wechselseitige Abhängigkeit von Wissen und Definition wird auch als **Unsicherheitsdilemma** bezeichnet.

Ausgehend von dem aufgezeigten Verständnis von Produktentstehung als komplexes und unsicherheitsbehaftetes System leitet sich bei der Betrachtung von Zielsystemen in der Produktentstehung die Schlussfolgerung ab, dass die Aufgaben- bzw. Zielklärung niemals als eine abgeschlossene, der eigentlichen Entwicklung vorangehende Phase, sondern als eine kontinuierliche, den gesamten Prozess begleitende Aktivität zu betrachten ist.

Zu Beginn eines Produktentstehungsprozesses können Ziele nur so genau und nur so vollständig beschrieben werden, wie es der aktuelle Wissensstand zulässt. Erst mit dem kontinuierlichen Zugewinn an problemspezifischem Wissen können diese Ziele verfeinert und durch Hinzunahme weiterer Ziele ergänzt werden. Folglich ist die Veränderung von Zielen entlang des Prozesses nicht als Ausnahme, sondern als Regelfall zu betrachten.

⁵³ vgl. Albers 2010

2.2 Systemtheorie und Modelltheorie

2.2.1 Allgemeine Systemtheorie

Die Allgemeine Systemtheorie wurde durch den Biologen BERTALANFFY⁵⁴ zum Ende der 1940er Jahre begründet. Zwar lassen sich die Ursprünge der Systemtheorie bis in die griechische Antike zurückverfolgen, weiter sind auch in der Epoche der Aufklärung wichtige Elemente der Systemtheorie entstanden und weiterentwickelt worden⁵⁵, doch die *General System Theory* von BERTALANFFY stellt das zusammenfassende Schlüsselwerk für das heutige Systemverständnis dar.

Die Allgemeine Systemtheorie ist, wie ihr Name bereits sagt, nicht auf eine bestimmte Disziplin begrenzt. BERTALANFFY sieht insbesondere in diesem disziplinübergreifenden Wesenszug das Potential zur Integration etablierter Disziplinen. BERTALANFFY⁵⁶ fasst seine Grundidee durch die folgenden Punkte zusammen:

- Es besteht eine allgemeine Tendenz zur Integration der verschiedenen Natur- und Sozialwissenschaften.
- Im Zentrum dieser Integration scheint eine allgemeine Systemtheorie zu stehen.
- Diese Theorie könnte von immenser Bedeutung im Hinblick auf die Entwicklung exakter Theorien, auch außerhalb der von Naturgesetzen geprägten Wissenschaftsbereiche, sein.
- Die Entwicklung einheitlicher, vertikal zu den Sparten einzelner Wissenschaften verlaufener Prinzipien, ermöglicht dieser Theorie dem Ziel einer vereinten Wissenschaft näher zu kommen.
- Dies kann zu einer dringend benötigten Integration innerhalb der wissenschaftlichen Ausbildung führen.

Im Rahmen seiner Forschung stellt PULM⁵⁷ dar, dass ausgehend von dem disziplinübergreifenden Wesenszug der Allgemeinen Systemtheorie, diese dennoch immer im Kontext einer bestimmten Disziplin zu Einsatz kommt und dort folglich eine spezifische Ausprägung erfährt. Im Bereich der Ingenieurwissenschaften hat sich diese Ausprägung unter dem Begriff des Systems Engineering⁵⁸ bzw. später auch unter dem Begriff der Systemtechnik⁵⁹ etabliert.

⁵⁴ vgl. Bertalanffy 1949

⁵⁵ vgl. Oerding 2009, S.36ff.

⁵⁶ vgl. Bertalanffy 1969, S.38

⁵⁷ vgl. Pulm 2004, S.22f.

⁵⁸ vgl. Goode & Machol 1957, Hall 1962

⁵⁹ vgl. Zangemeister 1969, Beitz 1970

Auf Basis der Allgemeinen Systemtheorie beschreibt ROPOHL⁶⁰ ein System als eine Ganzheit, die auf einem bestimmten Rang von ihrer Umgebung abgegrenzt wird, die Beziehungen zwischen bestimmten Attributen aufweist und die aus miteinander verknüpften Teilen besteht. Diese Aspekte fasst er als das hierarchische, das strukturele und das funktionale Systemkonzept zusammen (vgl. Bild 2-6).

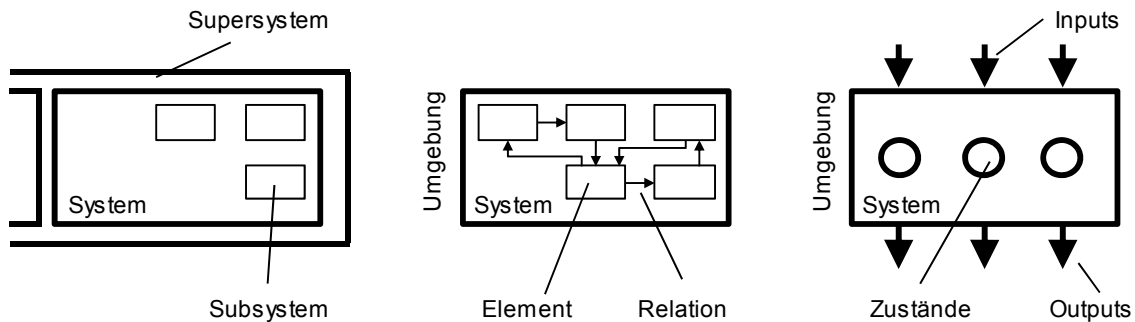


Bild 2-6: Hierarchisches, struktureles und funktionales Systemkonzept nach ROPOHL⁶¹

Das **hierarchische Konzept** umfasst die Festlegung einer Systemgrenze und damit die Abgrenzung eines Systems von seiner Umwelt. Das hierarchische Konzept ist durch das grundlegende Verständnis charakterisiert, dass jedes System als Teil eines Supersystems (Blick nach außen), wie auch als Verbund mehrerer Subsysteme (Blick nach innen) zu betrachten ist. Folglich hebt das hierarchische Konzept hervor, dass jedes System gleichzeitig Sub- und Supersystem ist⁶².

Das **strukturele Konzept** geht auf die etymologische Bedeutung des Systembegriffs zurück, welche darin besteht, ein System als ein „zergliedertes Ganzes“ zu betrachten⁶³. Das strukturele Konzept ist durch das grundlegende Verständnis charakterisiert, dass jedes System als Ganzes mehr ist, als die Summe seiner Teile (Emergenz). Das bedeutet, dass die Vielfalt möglicher Beziehungsgeflechte, die in einer gegebenen Menge von Elementen bestehen, vollständig unterschiedliche Systemeigenschaften hervorrufen kann.

Das **funktionale Konzept** lässt den inneren Aufbau eines Systems unberücksichtigt und fokussiert stattdessen auf das nach außen gerichtete Systemverhalten. Das funktionale Konzept ist durch das grundlegende Verständnis charakterisiert, dass jedes System mit seiner Umgebung interagiert. Die Funktion eines Systems wird hier jedoch lediglich durch die Eingangsgrößen (Inputs), die Ausgangsgrößen (Outputs) und die von außen wahrnehmbaren Zustände definiert⁶⁴.

⁶⁰ vgl. Ropohl 1975, S.31

⁶¹ vgl. Ropohl 2009, S.76

⁶² vgl. Muschik 2011, S.50f.

⁶³ vgl. Oerding 2009, S.29

⁶⁴ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.41ff.

In der Literatur wird **Ganzheitlichkeit** als das grundlegende Wesensmerkmal der Systemtheorie beschrieben. Die Betrachtung eines Gegenstandes in seiner Ganzheit beinhaltet dabei eine umfassende, weitsichtige und vorausschauende Berücksichtigung möglichst vieler Aspekte und Zusammenhänge⁶⁵.

Ausgehend von dem Verständnis, dass der Mensch im Mittelpunkt der Produktentstehung steht⁶⁶, ist abzuleiten, dass eine ganzheitliche Betrachtung der Produktentstehung nicht nur die Kombination der hierarchischen, strukturalen und funktionalen Aspekte eines technischen Systems⁶⁷, sondern darüber hinaus auch die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen dem technischen System und dem Menschen beinhaltet. Produktentstehung ist somit als ein **sozio-technisches System** zu verstehen.

ROPOHL⁶⁸ unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen zwei verschiedenen soziotechnischen Systemen (vgl. Bild 2-7). Im sozio-technischen System der Entstehung agiert der Mensch als Entwickler bzw. Konstrukteur des technischen Systems, während der Mensch im sozio-technischen System der Verwendung den Kunden bzw. den Nutzer des technischen Systems darstellt. Bei der Entwicklung eines Produktes gilt es die jeweiligen Bedingungen beider sozio-technischer Systeme zu erfassen und die Folgen des Systemverhaltens vorauszudenken.

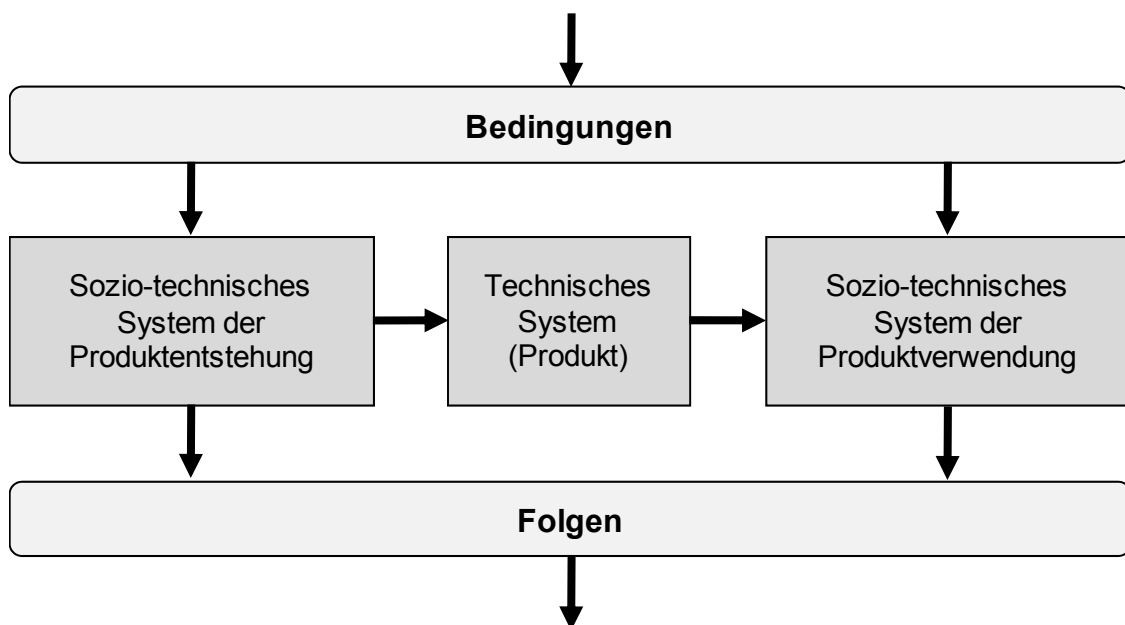


Bild 2-7: Sozio-technische Systeme der Entstehung und Verwendung nach ROPohl⁶⁹

⁶⁵ vgl. Martinez 1990

⁶⁶ vgl. Albers 2011

⁶⁷ vgl. Hubka 1984

⁶⁸ vgl. Ropohl 2009, S.44

⁶⁹ vgl. Ropohl 2009, S.44

2.2.2 Allgemeine Modelltheorie

Die *Allgemeine Modelltheorie* nach STACHOWIAK⁷⁰ basiert auf den Ergebnissen der erkenntnistheoretischen Wissenschaften, welche sich seit jeher damit auseinandersetzen, wie der Mensch wahrnimmt, denkt und versteht. Die folglich menschenzentrierte Definition eines allgemeinen Modellbegriffs stellt STACHOWIAK⁷¹ durch drei charakteristische Merkmale eines Modells dar: das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal.

Abbildungsmerkmal: Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.

Das Abbildungsmerkmal beinhaltet die einfache, jedoch grundlegende Definition des Modellbegriffs: Ein Modell ist ein Abbild eines Originals. Mit dieser Beschreibung werden die elementaren Bestandteile des Modellkonzepts nach KLAUS⁷² eingeführt und deren Zusammenhang aufgezeigt (vgl. Bild 2-8).

Verkürzungsmerkmal: Modelle erfassen im Allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen.

Das Verkürzungsmerkmal bezieht den Menschen in seiner Rolle als Modellerschaffer bzw. Modellnutzer mit in die Definition des Modellbegriffs ein. Der Mensch nimmt das Original subjektiv wahr und fokussiert dabei auf bestimmte, für ihn relevante Aspekte des Originals (vgl. Bild 2-8). Ausgehend von der subjektiven Beurteilung der Relevanz bildet der Modellerschaffer ein verkürztes Abbild der Realität. Das grundlegende Wesensmerkmal der Modelltheorie ist folglich **Reduktion**.

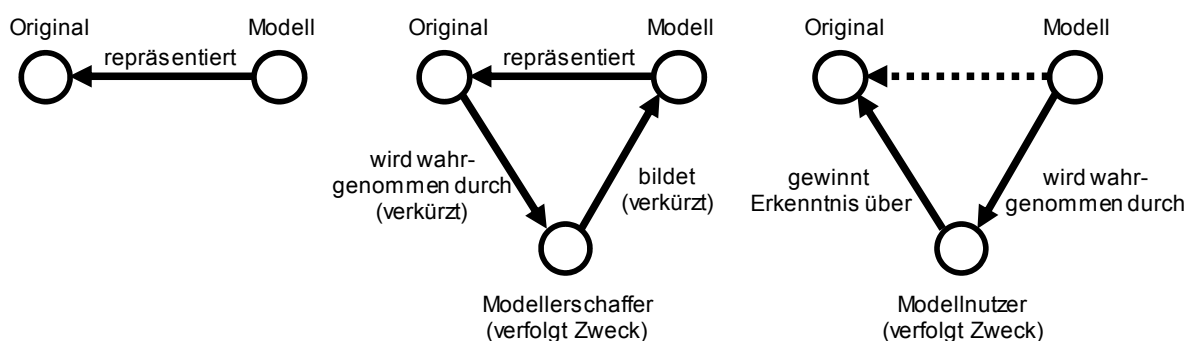


Bild 2-8: Modellbegriff, Modellbildung und Modellnutzung⁷³

⁷⁰ vgl. Stachowiak 1973

⁷¹ vgl. Stachowiak 1973, S.131ff.

⁷² vgl. Klaus 1967, S.413

⁷³ eigene Darstellung in Anlehnung an Klaus 1967 und Stachowiak 1973

Pragmatisches Merkmal: Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für bestimmte Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen.

Das pragmatische Merkmal adressiert die **Anwendbarkeit** und damit den Zweck eines Modells. Für gewöhnlich besteht der Zweck der Modellbildung nicht allein in der Abbildung eines Originals, sondern in der Gewinnung neuer Erkenntnisse durch die Nutzung des Modells (vgl. Bild 2-8). KLAUS⁷⁴ hält fest, dass ein Modell nicht nur eine Zusammenfassung der bekannten Fakten sein darf; das Modell hat vielmehr auch die Aufgabe, das aus den Fakten zu gewinnende mehr oder weniger unvollständige Bild zu einem Gesamtbild zu ergänzen. In der Modellnutzung können Modelle folglich als Instrumente verstanden werden, deren Zweck dann nicht darin besteht, Aussagen über die Realität an sich zu machen, sondern Wege zur Erklärung, Prognose und Gestaltung der Realität zu finden⁷⁵.

Im Weiteren unterscheidet STACHOWIAK⁷⁶ zwischen dem Fall, dass Modellerschaffer und Modellnutzer identisch sind, und dem Fall, dass sie es nicht sind. Im ersten Fall ist es nicht zwangsläufig notwendig, dass ein explizites Modell gebildet wird. Der Mensch ist in der Lage mentale Modelle⁷⁷ zu entwickeln und diese dann direkt, d.h. ohne den Zwischenschritt einer Externalisierung, für die Gewinnung neuer Erkenntnisse einzusetzen. Nichtsdestotrotz kann auch bei Einzelpersonen die Bildung von expliziten Modellen (z.B. Skizzen) hilfreich sein, um so das Arbeitsgedächtnis zu entlasten und den individuellen Reflexionsprozess zu unterstützen⁷⁸.

Im zweiten Fall sind Modellerschaffer und Modellnutzer nicht identisch. An dieser Stelle spielen nun insbesondere Aspekte der individuellen Wahrnehmung und des individuellen Handelns mit in die Betrachtung hinein. Modellerschaffer und Modellnutzer unterscheiden sich hinsichtlich ihrer individuellen mentalen Modelle, so dass es zu unterschiedlichen subjektiven Einschätzungen hinsichtlich der relevanten Aspekte des Originals (Verkürzung) oder aber der Zweckmäßigkeit eines Modells (Pragmatismus) kommen kann. Mit Hilfe von externen Modellen können individuelle Sichtweisen kommuniziert und so eine Annäherung der mentalen Modelle von Modellerschaffer und Modellnutzer ermöglicht werden⁷⁹.

⁷⁴ vgl. Klaus 1963, S.247

⁷⁵ vgl. Keuth 1978, S.89

⁷⁶ vgl. Stachowiak 1973, S.207ff.

⁷⁷ vgl. Meboldt 2008, S.203

⁷⁸ vgl. Sachse & Leinert 2002

⁷⁹ vgl. Birkhofer & Jänsch 2003

Bei der Modellbildung wird ein Original in Abhängigkeit eines bestimmten Zwecks, welcher durch bestimmte Personen zu einem bestimmten Zeitpunkt festgelegt wird, auf bestimmte Aspekte reduziert. In einem heutigen Produktentstehungsprozess, der dadurch gekennzeichnet ist, dass verschiedenste Produktmerkmale (viele Zwecke) durch zumeist interdisziplinäre Entwicklungsteams (viele Personen) entlang des gesamte Produktlebenszyklus (viele Zeitpunkte) berücksichtigt werden müssen, entsteht eine enorme Anzahl, zum Teil grundverschiedener Produktmodelle. Diese Modelle werden für gewöhnlich isoliert voneinander gebildet und genutzt. Mehrere Forschungsprojekte befassen sich daher mit der Entwicklung von integrativen Ansätzen zur Verknüpfung dieser isolierten Modelle. Das langfristige Ziel der Forschung besteht dabei in der Bildung und Nutzung durchgängiger Produktmodelle.

ALBERS⁸⁰ definiert **Durchgängigkeit** von Modellen als die gleichzeitige Realisierung horizontaler Durchgängigkeit, vertikaler Durchgängigkeit und Konsistenz. Horizontale Durchgängigkeit (vgl. Bild 2-9) beinhaltet, dass ein Modell entlang des gesamten Produktlebenszyklus verwendet werden kann. Dazu muss eine kontinuierliche Erweiterbarkeit des Modells gewährleistet sein, die auch durch entsprechende Schnittstellen der verwendeten rechnerbasierten Werkzeuge zu realisieren ist⁸¹. Vertikale Durchgängigkeit bezeichnet dahingegen, dass der Detaillierungsgrad eines Modells stufenlos einstellbar ist. Das Modell kann so mit Hilfe von Filteroptionen an die „zoomende Arbeitsweise⁸²“ des Entwicklers, d.h. den kontinuierlichen Wechsel der Betrachtungsebene in Hinblick auf den Detaillierungsgrad, angepasst werden. Konsistenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass zwei Modelle, die dasselbe Original repräsentieren, keine widersprüchlichen Aussagen beinhalten, sondern sich in ihrer Abbildung ergänzen. Im Speziellen bei interdisziplinären Entwicklungen ist dieser Abgleich einzelner disziplinspezifischer Modelle von besonderer Bedeutung.

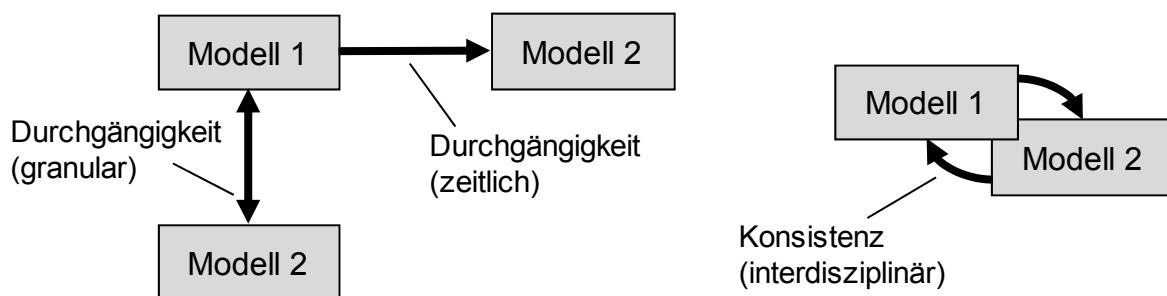


Bild 2-9: Horizontale und vertikale Durchgängigkeit und Konsistenz von Modellen

⁸⁰ vgl. Albers & Lohmeyer 2012

⁸¹ vgl. Anderl 2011

⁸² vgl. Ehrlenspiel 2007, S.77

2.2.3 Zwischenfazit

Heutige Produktentstehungsprozesse sind als sozio-technische Systeme zu verstehen, die starke Wechselwirkungen zwischen Produkt und Mensch aufweisen. Der Mensch ist in der Produktentstehung nicht nur in seiner Rolle als Kunde bzw. Nutzer, sondern auch in der des Entwicklers bzw. Konstrukteurs zu berücksichtigen.

Das damit einhergehende systemische Verständnis von Produktentstehung besteht, entsprechend der Allgemeinen Systemtheorie, in einer ganzheitlichen Betrachtung aller hierarchischen, strukturellen und funktionalen Aspekte, also einer Betrachtung des Systems der Produktentstehung im vollen Umfang seiner Komplexität.

Im Weiteren ist Produktentstehung maßgeblich geprägt durch die Entwicklung und Nutzung einer Vielzahl unterschiedlicher Modelle. Ausgehend von der Allgemeinen Modelltheorie ist ein Modell als die Repräsentation eines Originals zu verstehen, mit dessen Hilfe die Betrachtung einer komplexen Realität subjektiv verkürzt wird, um so zu einem zweckorientierten Erkenntnisgewinn zu gelangen. Modellbildung erfolgt durch Komplexitätsreduktion und stellt somit Anwendbarkeit vor Ganzheitlichkeit.

Systemtheorie und Modelltheorie stehen somit, geprägt durch ihre grundlegenden Wesensmerkmale *Ganzheitlichkeit* und *Reduktion* in einem eindeutigen Widerspruch zueinander. Es ist für einen Entwickler nicht möglich alle Wechselwirkung des sozio-technischen Systems einer Produktentstehung zu berücksichtigen, wenn sein punktuelles Interesse einem Teilaspekt eines Teilsystems gilt. Die gleichzeitige Notwendigkeit einer ganzheitlich-systemischen und reduziert-modellhaften Betrachtung der Produktentstehung wird im Rahmen dieser Arbeit unter dem Begriff des Reduktions-Dilemmas diskutiert.

Eine Möglichkeit des Umgangs mit dem Reduktions-Dilemma besteht in der Entwicklung und Verwendung durchgängiger Produktmodelle (siehe Bild 2-10). Einzelne Modelle bilden dabei ein System von Modellen, das in seiner Gänze ein konsistentes Gesamtbild des Produktes abbildet.

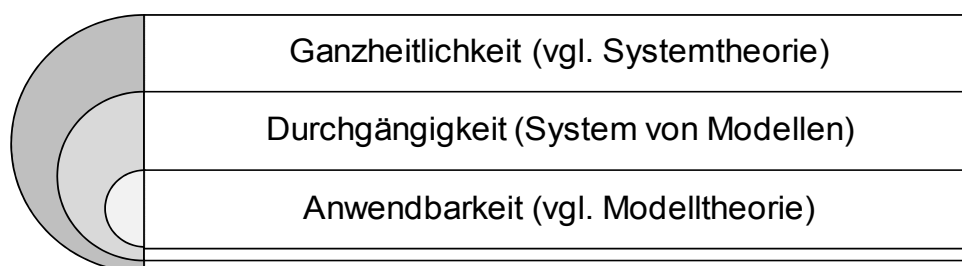


Bild 2-10: Durchgängigkeit als Bindeglied zwischen Ganzheitlichkeit und Anwendbarkeit⁸³

⁸³ vgl. Albers & Lohmeyer 2012

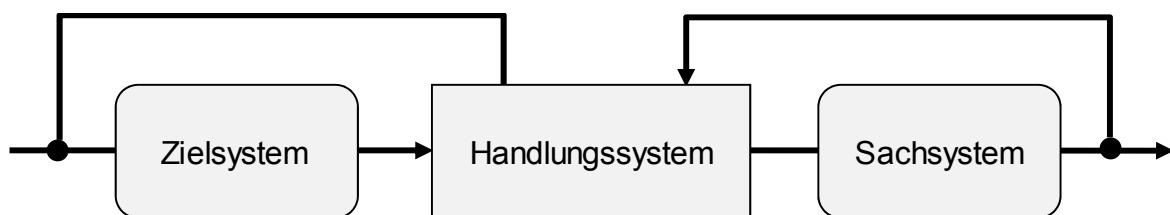
2.3 ZHO-Modell der Systemtechnik

2.3.1 Ursprünge des ZHO-Modells

Das ZHO-Modell ist ein systemtechnischer Ansatz, welcher Produktentstehung durch drei miteinander wechselwirkende Systeme beschreibt: Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem. Das ZHO-Modell, auch Systemtripel genannt, geht maßgeblich auf die Arbeiten von ROPOHL⁸⁴ zurück, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

In seiner *Einleitung in die Systemtechnik* thematisiert ROPOHL 1975 den damaligen Wandel von Ingenieursaufgaben und -tätigkeiten und leitet daraus drei grundlegende Systeme der Systemtechnik ab. Nach ROPOHL⁸⁵ bestehen Ingenieursaufgaben letzten Endes darin, technische Gebilde, also Maschinen, Geräte oder Anlagen hervorzubringen. Diese fasst er unter dem Begriff der Sachsysteme zusammen. Die Ingenieurstätigkeit, aus der die Sachsysteme hervorgehen, spielt sich im Rahmen komplexer Organisationen ab. Die darin enthaltenen Maßnahmen und Einrichtungen technischer Arbeit ordnet ROPOHL der zweiten Systemklasse zu: den Handlungssystemen. Im Weiteren orientiert sich die Ingenieurstätigkeit an bestimmten Zielvorgaben, die zum Teil aus dem Handlungssystem selbst, zum Teil aus dessen Umgebung stammen. Die Menge der Zielvorgaben bilden das Zielsystem.

Den Zusammenhang von Ziel-, Handlungs- und Sachsystem beschreibt ROPOHL durch den in Bild 2-11 dargestellten Regelkreis. In einem Handlungssystem wird gemäß einem Zielsystem ein Sachsystem verwirklicht. Dabei beeinflusst das Handlungssystem das Zielsystem, während das entstandene Sachsystem auf das Handlungssystem zurückwirkt oder gar dessen Bestandteil wird; zudem spielt das natürliche, technische und gesellschaftliche Umfeld dieser Systeme eine nicht zu unterschätzende Rolle.



natürliche, technische, gesellschaftliche Umgebungen

Bild 2-11: Regelkreis der Ingenieurstätigkeit nach ROPOHL⁸⁶

⁸⁴ vgl. Ropohl 1975

⁸⁵ vgl. Ropohl 1975, S.32f

⁸⁶ vgl. Ropohl 1975, S.33

ROPOHL orientiert sich in seinen Ausführungen insbesondere an einem Ansatz aus der *Systems Engineering Methodology* nach HALL⁸⁷, in welchem zwischen einem die Ziele enthaltenden Wertesystem (Value System) und dem zu entwickelnden Sachsystem (Physical System) unterschieden wird (vgl. Bild 2-12).

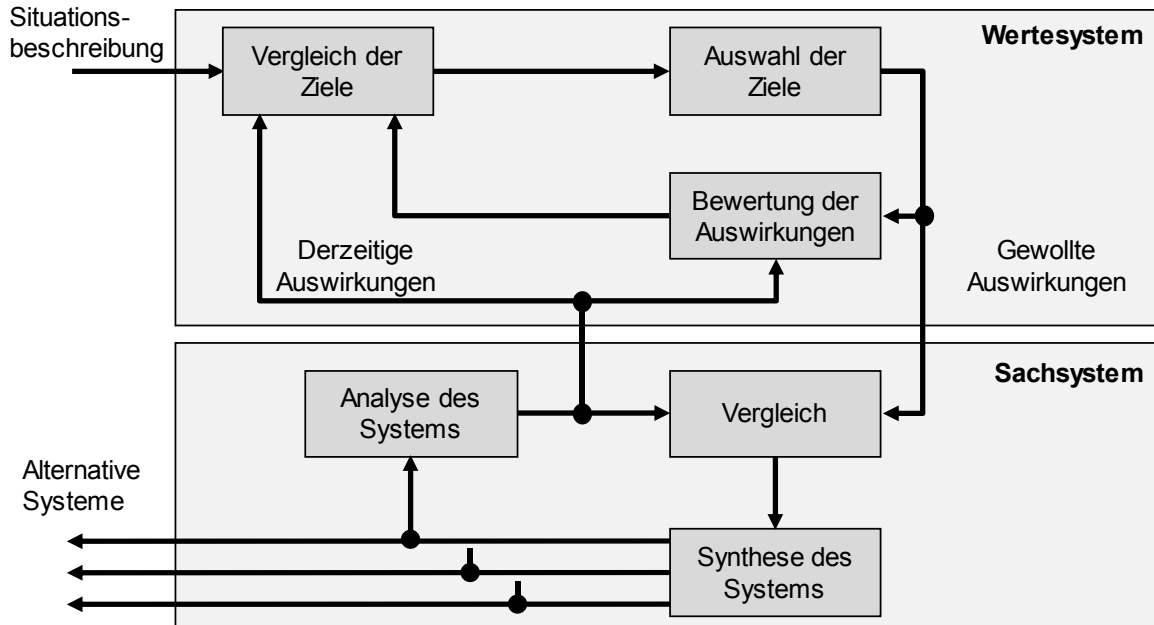


Bild 2-12: Regelkreis der Ingenieurstätigkeit nach HALL⁸⁸

Der Systemtripel aus Ziel-, Handlungs- und Sachsystem wird 1980 von LINDEMANN⁸⁹ mit dem Ziel einer systemtechnischen Betrachtung des Konstruktionsprozesses aufgegriffen und bildet 1995 das theoretische Gerüst für die *Methodik der integrierten Produkterstellung* (IPE-Methodik) nach EHRENSPIEL⁹⁰.

In der *Systemtechnik* nach PATZAK⁹¹ wird schließlich zwischen vier Systemen unterschieden. Das Zielsystem bleibt erhalten, das Handlungssystem wird jedoch unterteilt in ein abstraktes Programmsystem (Projekt, Vorhabensplan) und ein konkretes Wirksystem (Organisation, Handlungsträger, Sachmittel). Der Begriff des Sachsystems wird durch den des Objektsystems ersetzt.

Im Verlauf der 1990er Jahre wird der Ansatz nach PATZAK vom Fachgebiet Raumfahrttechnik an der Technischen Universität München aufgenommen. Die Benennung der einzelnen Systeme erfährt in diesem Zuge nochmals eine Anpassung. Zielsystem, Objektsystem, Prozesssystem und Handlungssystem bilden

⁸⁷ vgl. Hall 1962, S.103ff.

⁸⁸ vgl. Hall 1962, S.89

⁸⁹ vgl. Lindemann 1980, S.20ff.

⁹⁰ vgl. Ehrlenspiel 1995, S.260, Ehrlenspiel 2007, S.304f.

⁹¹ vgl. Patzak 1982, S.30

als sogenanntes **ZOPH-Modell**⁹² (vgl. Bild 2-13) einen systemtechnischen Ansatz zur ganzheitlichen Modellierung von Produktentwicklungssystemen. Der Ansatz ist seit 1997 auch Betrachtungsgegenstand des angelsächsischen Systems Engineering⁹³ und wird, unter anderem von BROWNING⁹⁴, als ein Schlüsselkonzept zur Modellierung von Produktentwicklungsprozessen verstanden.

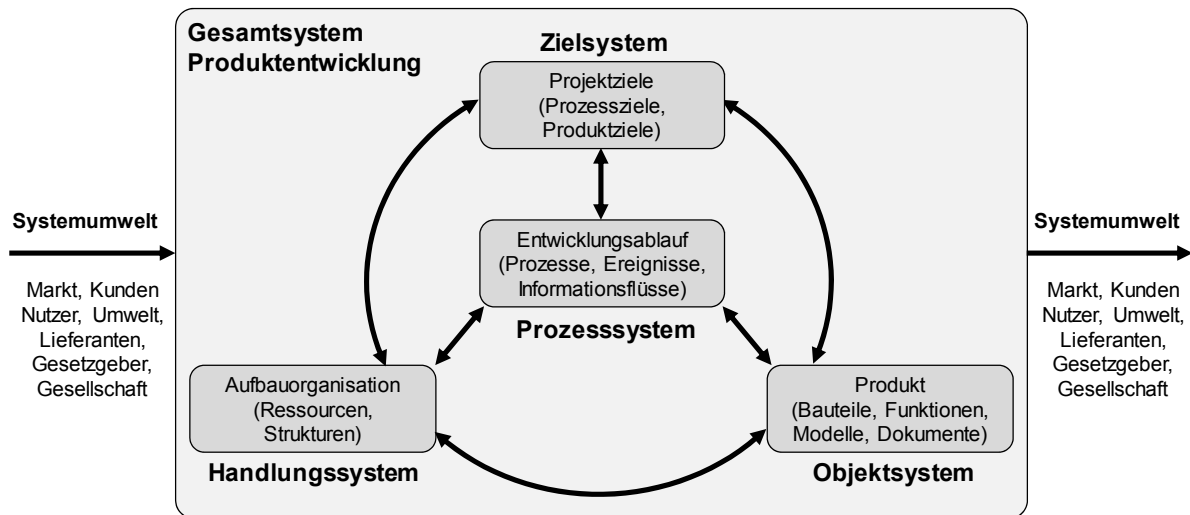


Bild 2-13: ZOPH-Modell nach NEGELE⁹⁵

ALBERS und MEBOLDT⁹⁶ entwickeln schließlich aufbauend auf der Systemtechnik nach ROPOHL⁹⁷ das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM (vgl. Kapitel 2.5) Die Basis dieses Modells bildet dabei der Systemtripel aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem (ZHO-Modell). MEBOLDT⁹⁸ sieht die Stärken des ZHO-Modells insbesondere durch die folgenden Punkte bestimmt:

- Durch die systemtechnische Logik können die Zusammenhänge zwischen Ziel, Handlungen und Ergebnissen auf allen Ebenen der Produktentstehung beschrieben und modelliert werden.
- Es werden soziale und technische Elemente gleichwertig 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.

⁹² vgl. Negele 1998, S.138ff.

⁹³ vgl. Negele, Fricke & Isenbergs 1997

⁹⁴ vgl. Browning, Fricke & Negele 2006

⁹⁵ vgl. Negele 1998, S.139

⁹⁶ vgl. Albers & Meboldt 2007

⁹⁷ vgl. Ropohl 1975

⁹⁸ vgl. Meboldt 2008, S.157f.

2.3.2 Systeme des ZHO-Modells

Das ZHO-Modell beschreibt das System Produktentstehung als Transformation eines Zielsystems in ein Objektsystem durch ein Handlungssystem (siehe Bild 2-14). Im Folgenden werden die Definitionen der Systeme nach ALBERS⁹⁹ vorgestellt.

Das **Handlungssystem** ist ein sozio-technisches System, das aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut ist. Es enthält weiterhin alle für die Realisierung einer Produktentstehung notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Ausstattung etc.). Das Handlungssystem erstellt sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem, beide Systeme sind ausschließlich durch das Handlungssystem miteinander verbunden.

Das **Zielsystem** umfasst die mentale Vorstellung der geplanten Eigenschaften eines Produktes und alle dafür notwendigen Restriktionen, deren Abhängigkeiten und Randbedingungen. Die Ziele beschreiben dabei den gewünschten zukünftigen Zustand des Produktes (und seiner Komponenten) und dessen Kontext, nicht jedoch die Lösung als solche. Das Zielsystem wird im Verlauf des Produktentstehungsprozesses fortwährend erweitert und konkretisiert.

Das **Objektsystem** enthält alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen. Es ist vollständig, sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. Das eigentliche Produkt ist neben Zwischenprodukten (z.B. Zeichnungen) eines der Elemente des Objektsystems. Das Handlungssystem nimmt während des Produktentstehungsprozesses ständig Teile des Objektsystems auf und leitet daraus durch Schritte der Analyse und Validierung neue Ziele ab.

Endergebnis eines Produktentstehungsprozesses ist neben dem eigentlichen Produkt auch die Summe aller Zwischenergebnisse im Objektsystem, das vollständige Zielsystem und nicht zuletzt das gesammelte Erfahrungswissen im Handlungssystem aus der Durchführung und Reflexion des Prozesses.

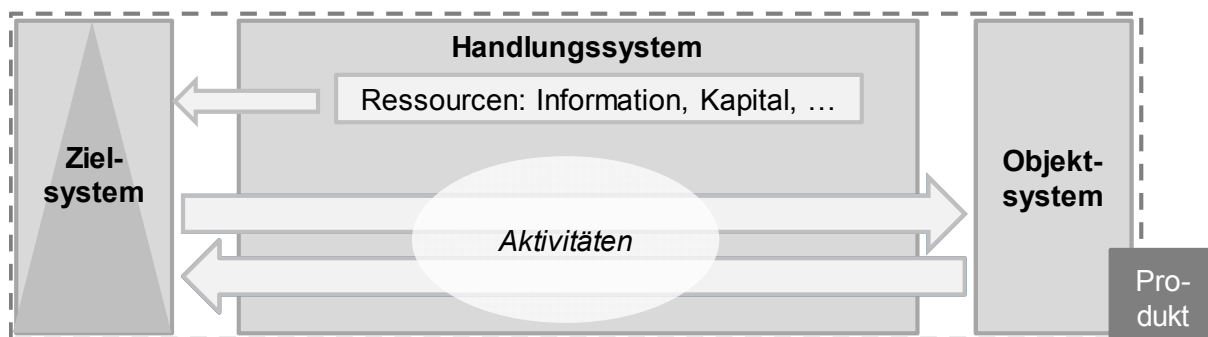


Bild 2-14: ZHO-Modell nach ALBERS

⁹⁹ vgl. Albers & Braun 2011

2.3.3 Prinzipien des ZHO-Modells

Der Mehrwert des ZHO-Modells geht nicht nur aus der systemischen Dreiteilung und den daraus abgeleiteten Definitionen von Ziel-, Handlungs- und Objektsystem hervor. Das durch das Modell implizierte Verständnis von Produktentstehung ergibt sich insbesondere aus der Interaktion der drei Systeme. Die im Folgenden aufgeführten Prinzipien des ZHO-Modells fassen die wesentlichen Punkte zusammen.

Prinzip der indirekten Wechselwirkung: *Jede Handlung kann nur vollständig durch das Systemtripler Ziel-, Handlungs- und Objektsystem beschrieben werden. Dabei besteht zwischen Ziel- und Objektsystem nur eine indirekte gegenseitige Wechselwirkung, die über das Handlungssystem bestimmt wird¹⁰⁰.*

Das Handlungssystem entwickelt mittels Aktivitäten Zielsystem und Objektsystem. Das Handlungssystem ist folglich als ein aktives System zu verstehen. Im Gegensatz dazu sind Zielsystem und Objektsystem passiv-reaktive Systeme, d.h. sie entwickeln sich nicht selbständig oder gegenseitig, sondern werden ausschließlich durch das Handlungssystem gebildet. Nichtsdestotrotz weisen auch Ziel- und Objektsysteme eigenes Systemverhalten auf, das sich allerdings auf Reaktionen gegenüber den Aktivitäten des Handlungssystems beschränkt.

Innerhalb eines Produktentstehungsprozesses, also bei der Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem, stehen diese beiden Systeme folglich niemals in direkter Wechselwirkung zueinander, sondern werden immer über Aktivitäten des Handlungssystems miteinander verknüpft (vgl. Bild 2-14). Ebenso erfolgt die Rückwirkung von Objektsystem auf Zielsystem ausschließlich über Aktivitäten, z.B. bei der Überführung neuer, durch Objekte gewonnener Erkenntnisse ins Zielsystem.

Prinzip der doppelten Kontingenz: *Sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem sind kontingent. Erst durch die gleichwertige Kopplung der beiden Systeme kann ein Produkt zielgerichtet entwickelt werden¹⁰¹.*

Zu Beginn eines Produktentstehungsprozesses sind Zielsystem und Objektsystem zunächst unbestimmt. Die initiale Definition eines abstrakten Zielsystems schränkt die Anzahl möglicher Produktlösungen erstmals ein und erlaubt so die Entwicklung zweckmäßiger, konkreter Objekte. Diese Objekte beinhalten jedoch mehr (bewusste und unbewusste) Entscheidungen als im Zielsystem bis dahin definiert wurden. Die Untersuchung und Bewertung konkreter Objekte führt daher zu Erkenntnissen, welche die weitere Entwicklung des Zielsystems maßgeblich bestimmen.

¹⁰⁰ vgl. Meboldt 2008, S.194

¹⁰¹ vgl. Meboldt 2008, S.195

Ziel- und Objektsystem sind über das Handlungssystem miteinander gekoppelt und bestimmen sich mit zunehmender Entwicklungsreife gegenseitig. Hierdurch reduziert sich die Kontingenz und es entsteht Ordnung, aus der letztendlich das Produkt hervorgeht (vgl. Bild 2-15).

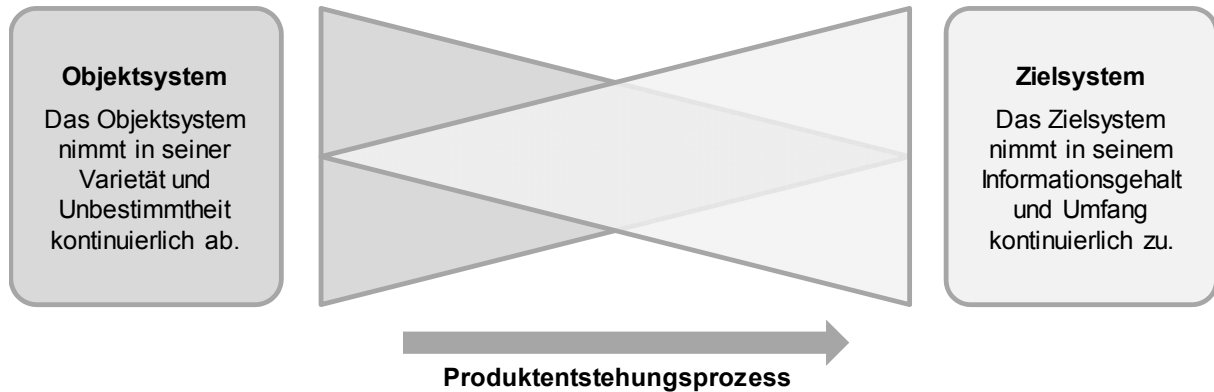


Bild 2-15: Doppelte Kontingenz von Ziel- und Objektsystem nach MEBOLDT¹⁰²

Prinzip der zweckmäßigen Zuordnung: Ein Element ist nicht absolut dem Ziel-, Handlungs- oder Objektsystem zugeordnet. Die Zuordnung ist relativ und hängt immer vom Zeitpunkt, Zweck und Standpunkt ab¹⁰³.

Die Zuordnung eines Objektes zu Ziel-, Handlungs- oder Objektsystem ist nicht immer eindeutig und kann in Abhängigkeit der gewählten Sichtweise variieren. Für gewöhnlich ist ein Objekt dem Objektsystem zuzuordnen. So kann es innerhalb eines Produktentstehungsprozesses beispielsweise notwendig sein, einen Prüfstand zu entwickeln, mit dessen Hilfe Teilaspekte des Produktes getestet werden sollen. Der Prüfstand ist in diesem Zusammenhang als ein Zwischenergebnis der Produktentstehung und somit als Objekt im Objektsystem zu verstehen. Wird dieser Prüfstand aber innerhalb des Produktentstehungsprozesses für Untersuchungen verwendet, kann dieser auch als Ressource und folglich als Teil des Handlungssystems verstanden werden.

Als ein weiteres Beispiel ist in diesem Zusammenhang auch die Anforderungsliste zu nennen. Die Anforderungsliste ist ein Objekt, das durch Aktivitäten im Handlungssystem entwickelt wird. Gleichzeitig beinhaltet sie jedoch, ebenso wie die meisten Objekte im Objektsystem, zielrelevante Information, die dem Zielsystem zuzuordnen ist. Die Anforderungsliste wird daher oft auch als ein Element des Zielsystems verstanden.

¹⁰² vgl. Meboldt 2008, S.157

¹⁰³ vgl. Meboldt 2008, S.156

2.3.4 Zwischenfazit

Das ZHO-Modell stellt Produktentstehung als ein sozio-technisches System dar. Es verbindet somit die Vorteile einer systemischen Betrachtung des Produktes und des Prozesses unter Einbeziehung der Wechselwirkungen mit Produktentwickler und Produktnutzer. Aufgrund seines systemischen Charakters können die Systemkonzepte der allgemeinen Systemtheorie auf das Modell angewandt werden, um so die hierarchischen, strukturalen und funktionalen Aspekte der Produktentstehung abbilden zu können.

Dem Handlungssystem kommt innerhalb des ZHO-Modells eine zentrale Rolle zu. Es entwickelt parallel das Zielsystem und das Objektsystem, es löst Probleme entlang des Prozesses und generiert das dafür notwendige fallspezifische Wissen. Mit dem Handlungssystem wird damit auch der denkende und handelnde Mensch in den Mittelpunkt der Betrachtung gerückt.

Die Differenzierung von Ziel- und Objektsystem bietet zudem den Vorteil der problemorientierten Abgrenzung zwischen SOLL- und IST-Zuständen. Erst durch deren Vergleich können zielführende Aktivitäten abgeleitet werden, durch welche wiederum Erkenntnis gewonnen und so die kontinuierliche Entwicklung der beiden Systeme vorangebracht werden kann.

Das Prinzip der doppelten Kontingenz stellt einen Ansatz zum Umgang mit dem Unsicherheitsdilemma dar. Die durchgängige Erweiterung und Konkretisierung des Zielsystems ist mit dem zuvor beschriebenen kontinuierlichen Schließen von Definitionslücken gleichzusetzen. Das dazu erforderliche Wissen entsteht innerhalb des Handlungssystems durch Aktivitäten der Synthese und Analyse von Objekten. Das ZHO-Modell ermöglicht somit die Beschreibung der kontinuierlichen Verringerung von Unsicherheiten entlang des Entwicklungsprozesses.

Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass mithilfe des ZHO-Modells das sozio-technische System der Produktentstehung insbesondere hinsichtlich der durch Komplexität und Unsicherheit hervorgerufenen Aspekte abgebildet werden kann. Das Modell bietet zudem das Potential, der in Kapitel 2.3 dargelegten Ganzheitlichkeit und Durchgängigkeit zu begegnen. Eine direkte Anwendbarkeit des Modells ist jedoch nur eingeschränkt gegeben. In der Folge ist das ZHO-Modell eher als ein Basismodell der Produktentstehung zu verstehen, d.h. es ist ein Modell, das die Grundlage für weiterführende Modelle darstellt, welche dann entsprechend des ihnen zugedachten Zweckes angewendet werden können, um bestimmte Aspekte der Produktentstehung beschreiben und unterstützen zu können.

2.4 Zentrale Hypothesen nach Albers

2.4.1 Erste Hypothese: Einzigartigkeit von Produktentstehungsprozessen

*Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell.*¹⁰⁴

Ausgehend von dem Verständnis, dass Produktentstehung ein komplexes und unsicherheitsbehaftetes System darstellt, ist zu schlussfolgern, dass allein aufgrund von Diversität und Dynamik keine Entwicklung exakt einer zweiten gleichen kann. Jeder Produktentstehungsprozess geht einher mit individuellen Zielen und Objekten, einem individuellen Ablauf von Aktivitäten und einer individuellen Zusammensetzung von Entwicklern mit unterschiedlichen Kompetenzen und Erfahrungen. In der Folge ist jeder Prozess von einer ihn charakterisierenden Einzigartigkeit geprägt¹⁰⁵.

Die Individualität und Einzigartigkeit von Produktentstehungsprozessen wird von den in Forschung und Praxis etablierten Vorgehens- und Prozessmodellen¹⁰⁶ bislang jedoch nicht oder nur eingeschränkt berücksichtigt. O'DONOVAN et al.¹⁰⁷ erläutern in diesem Zusammenhang, dass bei Prozessen unterschieden werden muss zwischen (1) dem generischen, übergeordneten Ansatz, dem jedes Entwicklungsprojekt folgen soll, und (2) der Menge an Aktivitäten, die tatsächlich durchlaufen werden, wobei eine Großzahl der etablierten Modelle der ersten Kategorie zuzuordnen ist¹⁰⁸. Diese Modelle zeichnen sich durch ein hohes Maß an Allgemeingültigkeit, zudem aber auch durch eine geringe Beschreibungstiefe aus. ECKERT und STACEY¹⁰⁹ folgern auf Basis einer Untersuchung von Prozessen in der industriellen Praxis, dass je größer ein Prozess beschrieben ist, desto weniger Unterstützung bietet er.

BENDER¹¹⁰ stellt in einer 2004 erhobenen Umfrage fest, dass die durch die Industrie meist geäußerte Kritik gegenüber entwicklungsmethodischer Vorgehens- und Prozessmodelle darin besteht, dass der Verlauf von Produktentstehungsprozessen als linear-sequentiell angenommen wird, obwohl diese im Allgemeinen einen stark iterativen Charakter aufweisen, der sich insbesondere durch eine fortlaufende Problem- und Zielklärung über den gesamten Prozessverlauf darstellt. Die betreffenden Modelle sind folglich nicht in der Lage den individuellen und einzigartigen Verlauf eines Produktentstehungsprozesses abzubilden. Sie sind somit für die unmittelbare Unterstützung des Entwicklers nicht einsetzbar.

¹⁰⁴ vgl. Albers 2010

¹⁰⁵ vgl. Albers, Braun & Muschik 2010

¹⁰⁶ vgl. Andreasen 2005, Wynn & Clarkson 2005

¹⁰⁷ vgl. O'Donovan, Eckert, Clarkson & Browning 2005

¹⁰⁸ vgl. Gericke & Blessing 2011

¹⁰⁹ vgl. Eckert & Stacey 2010

¹¹⁰ vgl. Bender 2004, S.104f.

2.4.2 Zweite Hypothese: System der Produktentstehung

Auf den Grundlagen der Systemtheorie lässt sich eine Produktentstehung als die Überführung eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem beschreiben.¹¹¹

Die allgemeine Systemtheorie bietet eine Möglichkeit disziplinübergreifende komplexe Systeme beschreiben und handhaben zu können. Produktentstehung stellt ein solches System dar, das sich entsprechend des ZHO-Modells ganzheitlich durch die Teilsysteme Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem abbilden lässt.

Durch die drei Systeme und deren dynamische Beziehungen untereinander kann der Produktentstehungsprozess als komplexes adaptives System beschrieben werden. Im Gegensatz zu funktionalen Input-Output-Beschreibungen, die von klaren Ursache-Wirkungs-Beziehungen ausgehen, in denen der Output – das Objekt – ein direktes Ergebnis des Inputs – des Zielsystems – ist, liegt diesem Systemansatz das Prinzip der doppelten Kontingenz zugrunde¹¹². Das ZHO-Modell bildet einen Produktentstehungsprozess folglich nicht in Form linear-sequentieller Arbeitsschritte ab, sondern nähert sich durch die kontinuierliche und wechselseitige Entwicklung von Ziel- und Objektsystem dem iterativen Charakter realer Entwicklungsprozesse an.

Das ZHO-Modell bildet somit die Basis für eine ganzheitliche und durchgängige Modellierung von Produktentstehungsprozessen. Ein weiterer Vorteil besteht in der Skalierbarkeit des Modells, d.h. mithilfe des ZHO-Modells können Produktentstehungssysteme unterschiedlichen Umfangs abgebildet werden. Exemplarisch seien hier das System eines einzelnen Entwicklers oder auch das System eines ganzen Unternehmens genannt. ALBERS et al. bezeichnen diese zweckorientierte Systembetrachtung als Modellierung eines System-of-Interest (vgl. Bild 2-16).

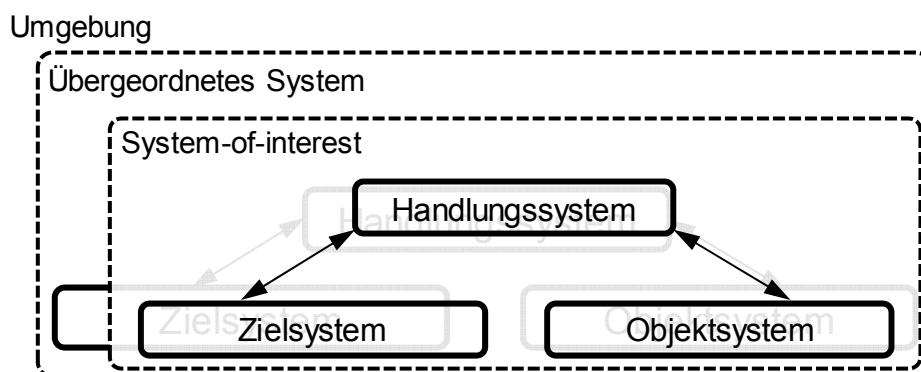


Bild 2-16: Systemtripel als skalierbares System-of-Interest nach ALBERS et al.¹¹³

¹¹¹ vgl. Albers 2010

¹¹² vgl. Meboldt 2008, S.156

¹¹³ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

2.4.3 Dritte Hypothese: Validierung

*Die Validierung ist die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess.*¹¹⁴

Die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess ist – neben der Modellierung von Prinzip und Gestalt – die Validierung, da in ihr die zielgerichtete Fortentwicklung des Zielsystems und damit der Erfolg des Produktes durch die kontinuierliche Spiegelung des erreichten Ist-Zustandes gemessen am geplanten Soll-Zustand definiert wird¹¹⁵. Nur durch Validierung wird Wissen gewonnen, so dass weitere Ziele und Einschränkungen für die weitere Entwicklung abgeleitet werden können¹¹⁶. Validierung muss in der Produktentstehung kontinuierlich erfolgen. Die hierbei gewonnene Erkenntnis muss zwingend zurück in die Entwicklung fließen¹¹⁷.

Bild 2-17 zeigt die beiden Aktivitäten Prinzip- und Gestaltmodellierung und Validierung auf Basis des ZHO-Modells als gegenläufige Prozesse. In Richtung gegen den Uhrzeigersinn werden ausgehend vom Kunden Ziele identifiziert und in das Zielsystem übernommen. Das Handlungssystem entwickelt auf Basis des Zielsystems Objekte, die dem Kunden zur Verfügung gestellt werden können. Im Uhrzeigersinn ist die Validierungsaktivität dargestellt. Ausgehend von Erkenntnissen, die aus der Anwendung und dem Zielsystem-Objektsystem-Abgleich hervorgehen, können neue Ziele abgeleitet und mit dem Kunden abgestimmt werden.

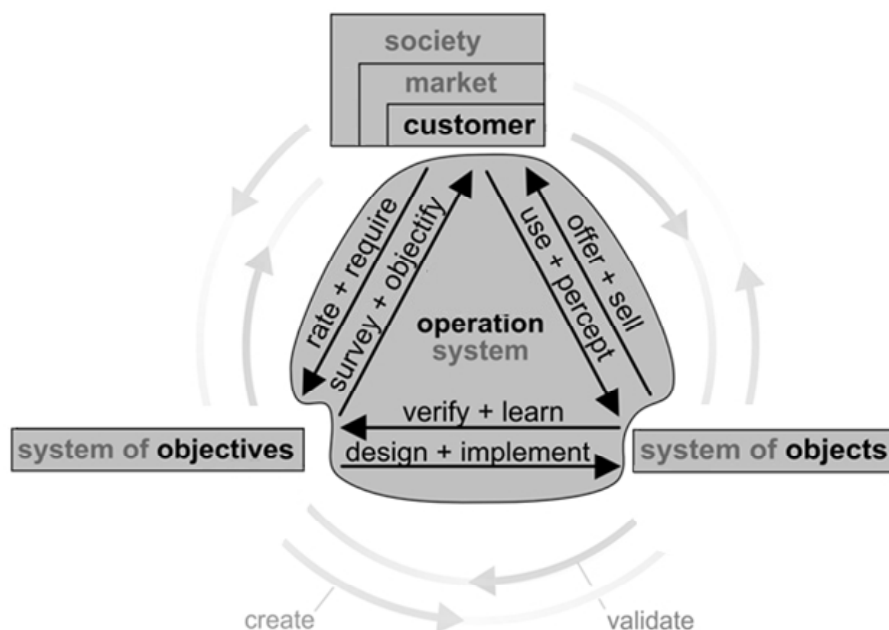


Bild 2-17: Zentrale Aktivitäten: Prinzip- und Gestaltmodellierung und Validierung¹¹⁸

¹¹⁴ vgl. Albers 2010

¹¹⁵ vgl. Albers, Behrendt & Ott 2010

¹¹⁶ vgl. Oerding 2009, S.107

¹¹⁷ vgl. Düser 2010, S.29

¹¹⁸ vgl. Albers, Geier & Merkel 2011

2.4.4 Vierte Hypothese: Zielbeschreibung in der Problemlösung

*Die Transformation von Zielen in Objekte kann als Problemlösungsprozess betrachtet werden.*¹¹⁹

In einem Problemlösungsprozess wird ein bestehender Ist-Zustand in einen geplanten Soll-Zustand überführt, wobei der Weg und die Mittel oder aber auch der gewünschte Soll-Zustand dieser Überführung unklar sein können¹²⁰. In der Produktentstehung besteht der Soll-Zustand zumeist in einem Objekt, dem Produkt. Der Soll-Zustand wird dabei über Ziele beschrieben, die grundsätzlich funktions- und gestaltbestimmend Informationselemente beinhalten.

Aufgrund der hohen Dynamik von Produktentstehungsprozessen und der Tatsache, dass heutige Produktentstehungsprojekte oftmals in global verteilten, interdisziplinären Teams erfolgen, ist eine kohärente Modellierung der Ziele dieser Prozesse notwendig. In der Folge ergibt sich die besondere Wichtigkeit von zum einen der durchgängigen Modellierung von Zielen und zum anderen der Verknüpfung von Zielen und Aktivitäten der Problemlösung. OERDING¹²¹ stellt hierzu einen Ansatz zur Modellierung von Zielsystemen vor, der den Contact & Channel-Ansatz (C&C²-A) verwendet, um Ziele und Gestalt über Funktionen zu verbinden. ALBERS, MUSCHIK und BRAUN¹²² wiederum erörtern die Wichtigkeit von Zielen, um durch Aktivitäten der Problemlösung zu neuen Objekten zu gelangen. Bild 2-18 zeigt die grundlegenden Zusammenhänge der beiden Ansätze in einer integrierten Darstellung.

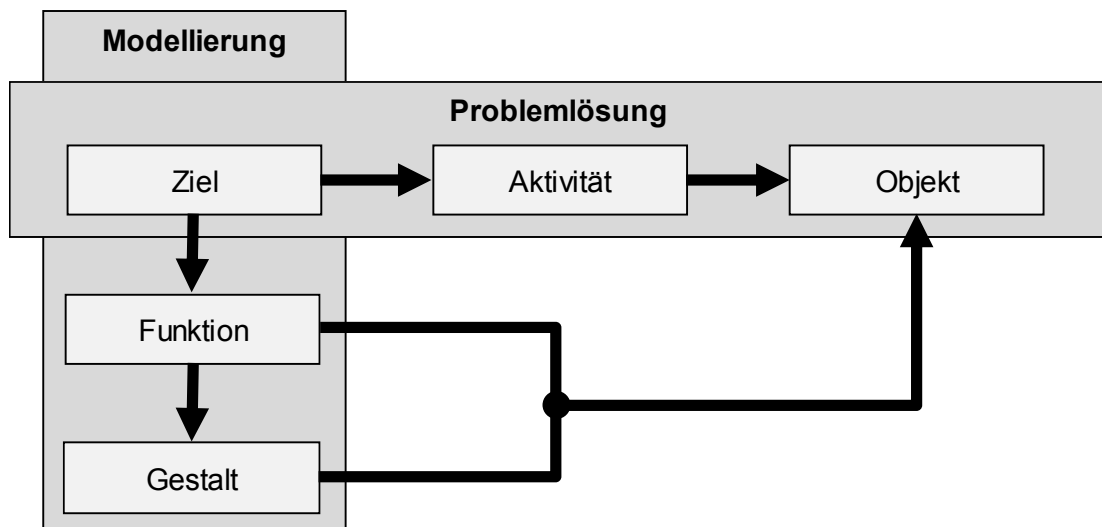


Bild 2-18: Wichtigkeit von Zielen im Kontext von Modellierung und Problemlösung

¹¹⁹ vgl. Albers 2010

¹²⁰ vgl. Dörner 1979, S.14

¹²¹ vgl. Oerding 2009, S.164

¹²² vgl. Albers, Muschik & Braun 2010

2.4.5 Fünfte Hypothese: Beschreibung von Funktionen

*Die Beschreibung einer technischen Funktion benötigt immer mindestens zwei Wirkflächenpaare und die sie verbindenden Leit-Stütz-Strukturen sowie zwei Konnektoren. Ein System kann seine Funktion(en) nur in Wechselwirkung mit seiner Umgebung erfüllen – ein Bauteil allein hat keine Funktion!*¹²³

Die fünfte Hypothese adressiert den von ALBERS und MATTHIESEN¹²⁴ entwickelten Contact & Channel-Ansatz (C&C²-A) mit dessen Hilfe Funktion-Gestalt-Zusammenhänge in Form von Contact & Channel-Modellen (C&C-M) abgebildet werden können. Jedes Modell basiert dabei auf den kleinsten gemeinsamen Grundelementen eines jeden technischen Systems: den Wirkflächen WF (engl.: Contacts) und den Leitstützstrukturen LSS (engl.: Channels).

Wirkflächenpaare WFP (vgl. Bild 2-19) werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird; Leitstützstrukturen dahingegen sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen¹²⁵.

ALBERS und MATTHIESEN erweiterten ihren Ansatz um ein eigenständiges Grundelement: den Konnektor (Connector). Konnektoren beschreiben alle Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung für die an der Grenze des Systems vorhandenen Wirkflächen. Konnektoren beziehen sich somit immer auf die im untersuchten Systembereich liegende, für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante, reduzierte Abbildung der Systemumwelt¹²⁶.



Bild 2-19: Modell einer Funktion mit dem C&C²-Ansatz¹²⁷

¹²³ vgl. Albers 2010, Albers, Sadowski & Marxen 2011

¹²⁴ vgl. Albers & Matthiesen 2002

¹²⁵ vgl. Matthiesen 2002, S.50f.

¹²⁶ vgl. Alink 2010, S.182

¹²⁷ vgl. Matthiesen & Ruckpaul 2012

2.4.6 Zwischenfazit

Die fünf Hypothesen nach ALBERS basieren auf persönlichen Erfahrungen aus langjähriger Tätigkeit in Industrie und Forschung. Die Hypothesen selbst sind schwerlich zu beweisen oder zu widerlegen. Vielmehr handelt es sich hierbei um grundlegende Annahmen, welche eine einheitliche Basis für aufbauende Forschungsarbeiten bietet. Die fünf Hypothesen stellen in ihrer Summe ein grundlegendes Verständnis von Produktentstehung dar.

Die Berücksichtigung von Komplexität (Diversität und Dynamik) und Unsicherheit (Wissens- und Definitionslücken) in realen Produktentstehungsprozessen führt zur Notwendigkeit einer modellbasierten Unterstützung von Entwicklern im systemischen Umgang mit

- der individuellen und iterativen Abfolge von Problemlösungsaktivitäten
- der kontinuierlichen Verfeinerung und Änderung von Zielsystemen
- der konsequenten Planung und Umsetzung von Validierungsaktivitäten zur Sicherstellung des kontinuierlichen Wissenszugewinns
- der durchgängigen und integrierten Modellierung von Ziel-, Funktions- und Gestaltzusammenhängen
- den sozio-technischen Wechselwirkungen innerhalb des Handlungssystems sowie zwischen Handlungssystem und Umgebung.

ALBERS und MEBOLDT entwickeln ausgehend von den fünf Hypothesen das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM). Das iPeM stellt einen ganzheitlichen Ansatz dar, der den Produktentstehungsprozess, ausgehend von mentalen Modellen in durchgängigen Modellebenen bis hin zu Workflows und operativen Instrumenten, beschreibt¹²⁸. Durch die Modellebenen werden explizite Sichten geschaffen, welche die Prozessmodellierung, das Projektmanagement und die methodische Unterstützung in gleichem Maße berücksichtigen. Im Gegensatz zu phasenorientierten Vorgehens- und Prozessmodellen gibt das iPeM keinen allgemeingültigen Prozessverlauf vor, sondern stellt ein Metamodell bereit, mit dessen Hilfe ein individueller Ablauf von Aktivitäten geplant, gesteuert und dokumentiert werden kann.

¹²⁸ vgl. Meboldt 2008

2.5 Integriertes Produktentstehungsmodell iPeM

2.5.1 Integrierte Prozessmodellierung

Prozessmodelle in der industriellen Praxis können entsprechend ihres Zwecks grundsätzlich in zwei Klassen unterteilt werden. Die eine Klasse umfasst Modelle, deren Zweck im Projektmanagement, d.h. der Planung, Steuerung und Kontrolle des Produktentstehungsprozesses, begründet ist. Die Modelle der anderen Klasse dahingegen sollen den Entwickler in seinen Tätigkeiten entlang des Produktentstehungsprozesses unterstützen.

Für das Projektmanagement haben sich heutzutage insbesondere die Stage-Gate-Modelle nach COOPER¹²⁹ bewährt. Dabei stehen primär Planbarkeit und Messbarkeit von zeitlichen wie inhaltlich quantifizierbaren Vorgaben im Vordergrund. Diese Modelle eignen sich zwar zum Management des Prozesses, jedoch kaum zur Unterstützung des problemlösenden Entwicklers innerhalb eines komplexen und unsicherheitsbehafteten Produktentstehungsprozesses. Zu den unterstützenden Modellen zählen u.a. das sequenzielle Vorgehensmodell nach der VDI RICHTLINIE 2221¹³⁰ oder auch das für die Entwicklung mechatronischer Produkte adaptierte V-Modell nach der VDI RICHTLINIE 2206¹³¹. Diese Modelle orientieren sich zwar an Konstrukteur bzw. Entwickler, bilden den Produktentstehungsprozess jedoch in einer derart verkürzten Form ab, dass eine tatsächliche Unterstützung in iterativen, wissensgenerierenden Prozessen nur eingeschränkt möglich ist.

ALBERS und MEBOLDT¹³² stellen mit dem **integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM)** einen Ansatz vor, der beide Sichten vertritt: die Sicht des Projektmanagements (Planung, Steuerung und Kontrolle) wie auch die Sicht der Entwicklungsunterstützung (Problemlösung und Wissensgenerierung). Ausgehend von der Annahme, dass Projektmanagement zwingend auf phasenbasierte Prozessmodelle angewiesen ist, Entwicklungsunterstützung aber nur aktivitätenbasiert erfolgen kann, kommt MEBOLDT¹³³ zu der Schlussfolgerung, dass dieser Konflikt nur gelöst werden kann, wenn die beiden Sichten klar und eindeutig differenziert, aber in einem integrierten Modell durchgängig verknüpft und abgebildet werden.

Die Kernidee des integrierten Produktentstehungsmodells besteht somit in der strikten Trennung von Aktivitäten und Phasen, ohne diese dabei zu entkoppeln.

¹²⁹ vgl. Cooper 1990

¹³⁰ vgl. VDI 2221, 1993, S.9

¹³¹ vgl. VDI 2206, 2004, S.29

¹³² vgl. Albers & Meboldt 2007

¹³³ vgl. Meboldt 2008, S.180

Das iPeM basiert auf dem systemtheoretischen Grundgerüst des ZHO-Modells. Zielsystem und Objektsystem einer Produktentstehung sind verknüpft über ein soziotechnisches Handlungssystem, welches im iPeM durch die Aktivitätenmatrix, das Ressourcensystem und das Phasenmodell repräsentiert wird (vgl. Bild 2-20).

Die **Aktivitätenmatrix** besteht aus insgesamt 70 Aktivitäten, die aus der Gegenüberstellung von Aktivitäten der Produktentstehung und Aktivitäten der Problemlösung resultiert. Die Aktivitäten der Produktentstehung orientieren sich an den Lebenszyklusphasen eines Produktes. Diese sind hier jedoch nicht als eine zeitliche, sondern lediglich als eine logische Abfolge zu verstehen. Die Aktivitäten der Problemlösung sind in Bild 2-20 durch die Problemlösungsmethodik SPALTEN¹³⁴ bestimmt. Sie können jedoch auch durch alternativ bezeichnete Problemlösungsschritte repräsentiert werden. SPALTEN ist ein Akronym, das für die einzelnen Problemlösungsaktivitäten Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungssuche, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden & Umsetzen und Nachbereiten & Lernen steht. Dabei ist zu beachten, dass der Problemlösungsprozess einem klar definierten Schema folgt, welches in Bild 2-21 dargestellt ist.

Die Aktivitätenmatrix stellt den statischen Teil des iPeM dar, d.h. die Matrix bleibt entlang eines Produktentstehungsprozesses unverändert und dient somit als beständige Basis eines gemeinsamen Begriffs- und Verständnismodells. Die 70 Aktivitäten der Matrix stellen dabei definierte Prozessbausteine dar, mit denen eine individuelle Prozessabfolge zusammengesetzt und so die Einzigartigkeit eines Prozesses abgebildet werden kann.

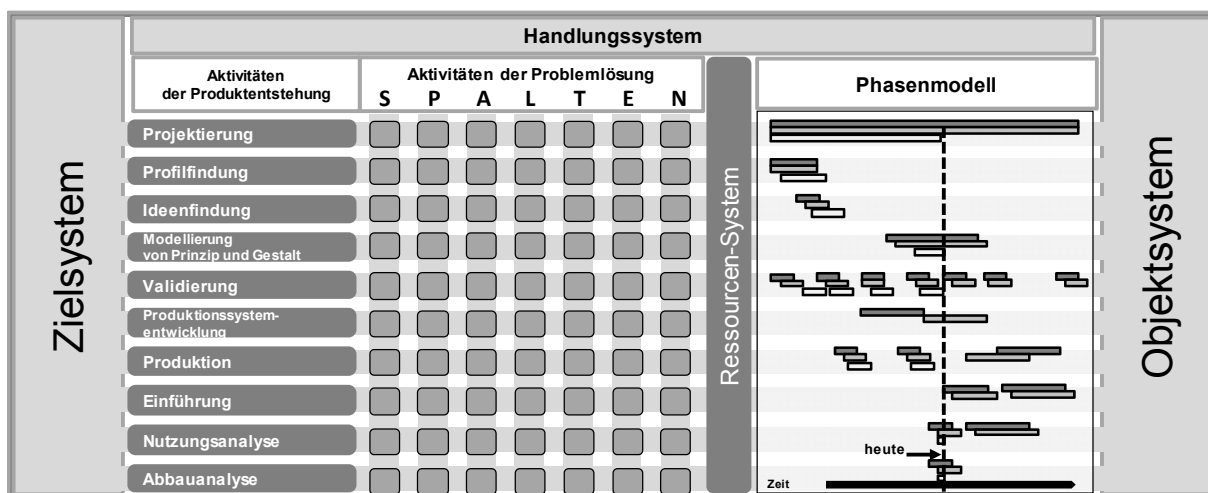


Bild 2-20: Integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM)¹³⁵

¹³⁴ vgl. Albers, Burkardt, Meboldt & Saak 2005

¹³⁵ vgl. Albers & Braun 2011

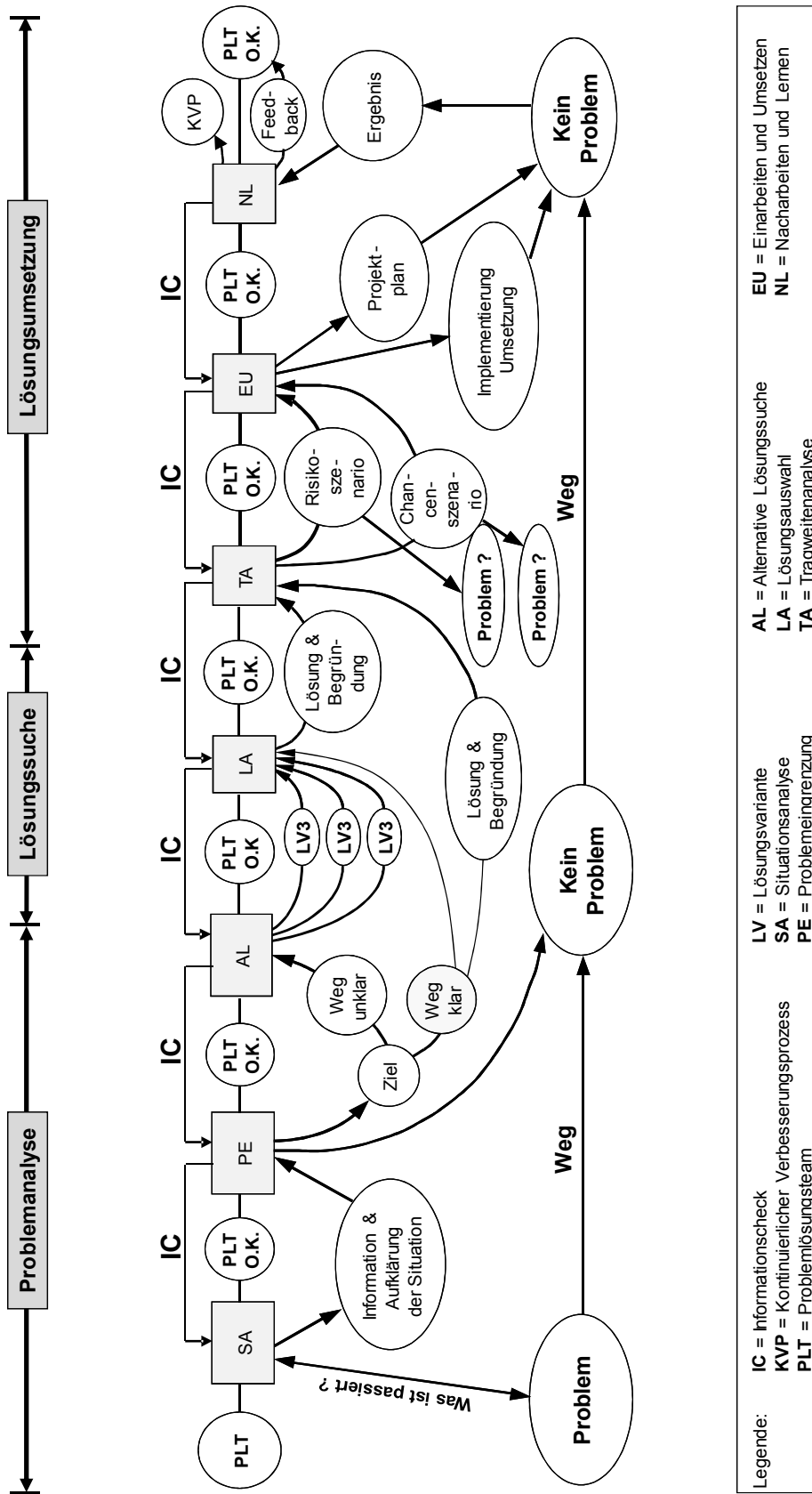


Bild 2-21: Problemlösungsmethodik SPALTEN¹³⁶

¹³⁶ vgl. Albers, Burkardt, Meboldt & Saak 2005

Der zeitliche Ablauf eines Produktentstehungsprozesses wird im **Phasenmodell** des iPeM abgebildet. Bild 2-22 zeigt das Phasenmodell eines exemplarischen Prozesses, der sich aus 5 Entwicklungsphasen (Recherchephase, Profilphase, Ideenphase, Konzeptphase und Prototypenphase) zusammensetzt. Jede Phase beinhaltet verschiedene, zum Teil auch simultan ablaufende Aktivitäten, die in Form von Balken dargestellt sind. Beispielsweise in der Profilphase gilt es somit, nicht nur neue Produktprofile zu finden, sondern insbesondere auch die zukünftige Produktion und Nutzung des Produktes zu berücksichtigen.

Bei genauerer Betrachtung, d.h. beim Hineinzoomen in das Modell, wird deutlich, dass sich die einzelnen Balken aus den Prozessbausteinen der Aktivitätenmatrix zusammensetzen¹³⁷. So werden beispielsweise in der Recherchephase vermehrt *Situationsanalysen* vorgenommen, während die Ideenphase insbesondere durch *Alternative Lösungssuche* und *Lösungsauswahl* geprägt ist. Jede Phase wird durch ein Gate (Projektmeilenstein) abgeschlossen. In diesem Zusammenhang zeigt sich die zentrale Rolle der Validierungsaktivitäten. So sind z.B. auch Rechercheergebnisse und ausgearbeitete Produktprofile innerhalb der jeweiligen Phase in ausreichendem Umfang zu validieren, um die quantitativen und qualitativen Ziele des Gates zu erfüllen und so in die nächste Projektphase übergehen zu dürfen.

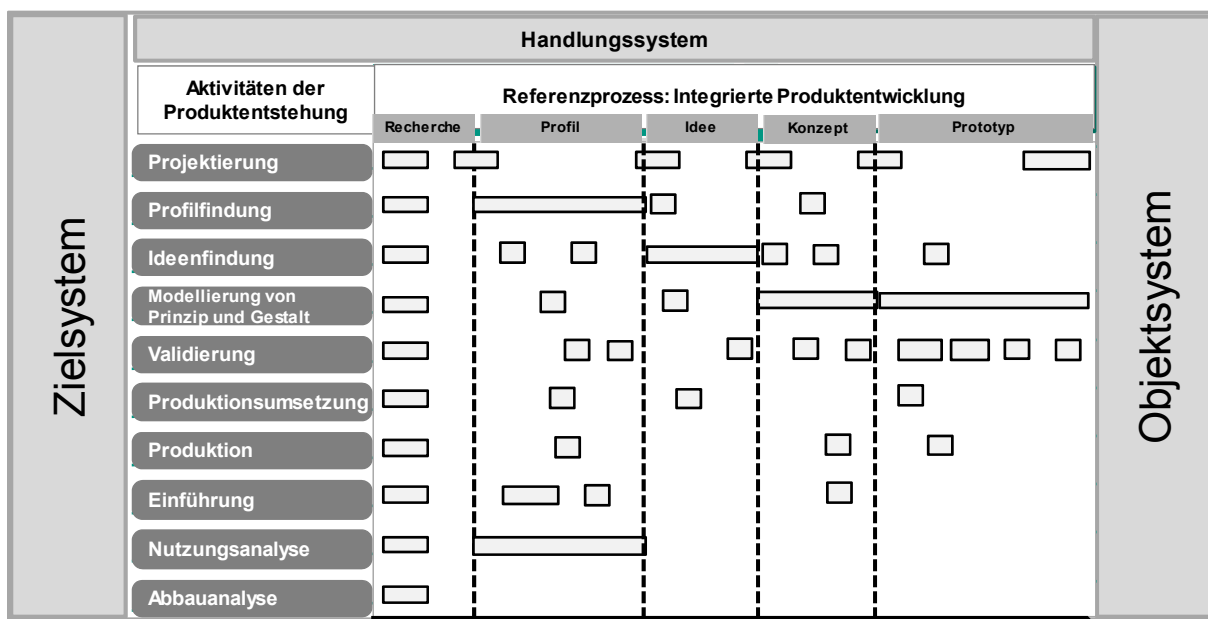


Bild 2-22: Exemplarischer Prozess als Phasenmodell im iPeM

Das **Ressourcensystem** beinhaltet die Ressourcen des Handlungssystems. Es umfasst den neben beteiligten Mitarbeitern auch das verfügbare Budget sowie bereitstehende Arbeitsmittel, wie z.B. Material und Maschinen.

¹³⁷ vgl. Albers & Muschik 2010

2.5.2 Integrierte Prozessplanung und -steuerung

Durch die Kopplung der allgemeingültigen Aktivitätenmatrix und des individuell anpassbaren Phasenmodells realisieren ALBERS und MEBOLDT¹³⁸ mit dem iPeM ein Modell zur Modellbildung (Metamodell). Mit Hilfe des iPeM können so Prozessmodelle unterschiedlichen Zwecks gebildet werden. Die Prozessplanung und -steuerung erfolgt dabei durch Referenzmodelle, Implementierungsmodelle und Anwendungsmodelle (vgl. Bild 2-23).

Referenzmodelle beschreiben archetypische Verläufe spezifischer Prozessklassen. So sieht das Referenzmodell eines Vorentwicklungsprozesses beispielsweise grundlegend anders aus, als das Referenzmodell eines Serienentwicklungsprozesses. Ebenso unterscheiden sich z.B. die Referenzmodelle im Anlagenbau von denen in der Automobilindustrie. Referenzmodelle werden auf Basis der Prozessenerfahrung eines Unternehmens gebildet¹³⁹. Sie besitzen für die Prozessplanung einen empfehlenden Charakter.

Implementierungsmodelle bilden die Planung eines konkreten Produktentstehungsprozesses ab. Sie orientieren sich an Referenzmodellen, unterscheiden sich jedoch durch die Berücksichtigung der individuellen Aspekte eines konkreten Prozesses, die bereits in der Prozessplanung vorhergesehen werden können.

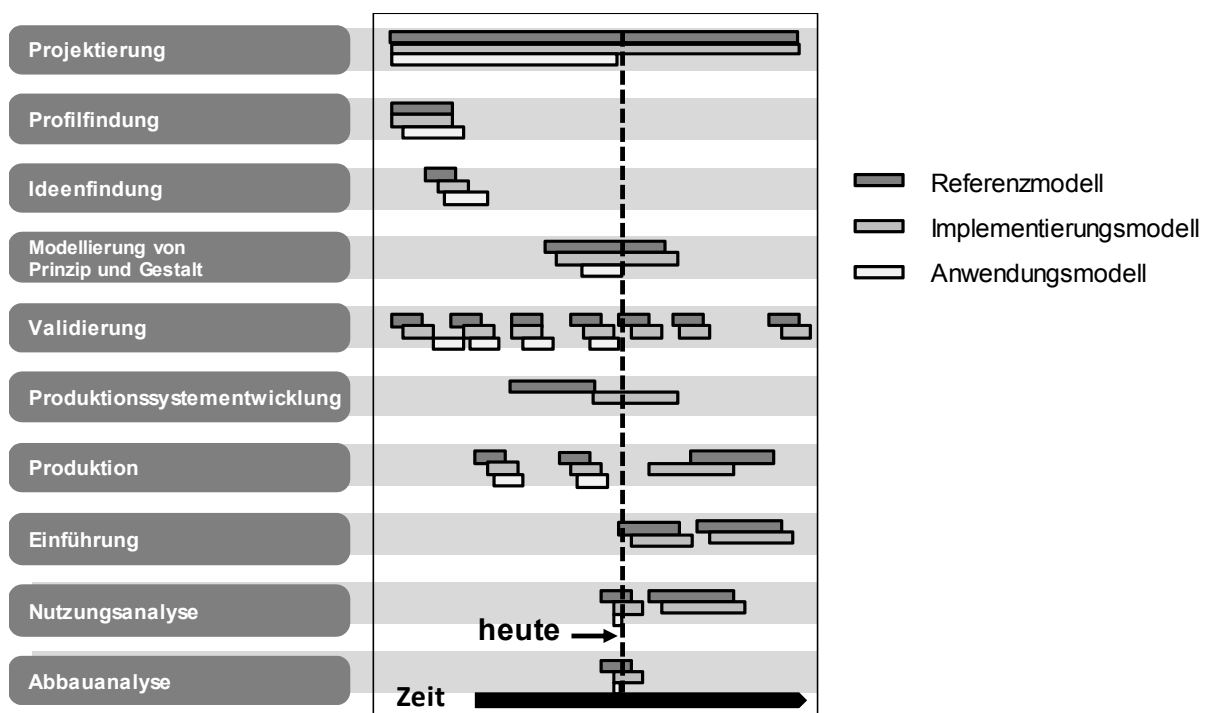


Bild 2-23: Referenz-, Implementierungs- und Anwendungsmodell im iPeM¹⁴⁰

¹³⁸ vgl. Albers & Meboldt 2007

¹³⁹ vgl. Meboldt 2008, S.205

¹⁴⁰ vgl. Albers & Braun 2011

Der tatsächliche Ablauf eines konkreten Produktentstehungsprozesses wird im **Anwendungsmodell** dokumentiert. Auf diese Weise werden Abweichungen zwischen Implementierungsmodell und Anwendungsmodell transparent gemacht, so dass entsprechende Maßnahmen zur Prozesssteuerung abgeleitet werden können. Eine mögliche Maßnahme besteht grundsätzlich in der Anpassung des Implementierungsmodells.

Im iPeM werden **Iterationen** als eine erneut durchgeführte Abfolge von Aktivitäten entlang des Zeitstrahls dargestellt¹⁴¹. Ein einfaches „Zurückspringen“ im Sinne konstruktionsmethodischer Prozessmodelle ist im iPeM nicht möglich. Jede ungeplante Iteration geht folglich mit der Hinzunahme zusätzlicher Aktivitäten im Anwendungsmodell einher, welche dann klar erkennbar zusätzliche Zeit und Ressourcen in Anspruch nehmen. Bild 2-24 zeigt einen beispielhaften Prozess, in dessen Implementierungsmodell bereits eine geplante Iteration vorgesehen ist und in dessen Anwendungsmodell zudem eine ungeplante Iteration auftritt. Diese geht mit einem Verlust an Zeit einher. Das iPeM bildet somit die Tragweite von Iterationen realistischer ab als die Vielzahl anderer Vorgehens- und Prozessmodelle.

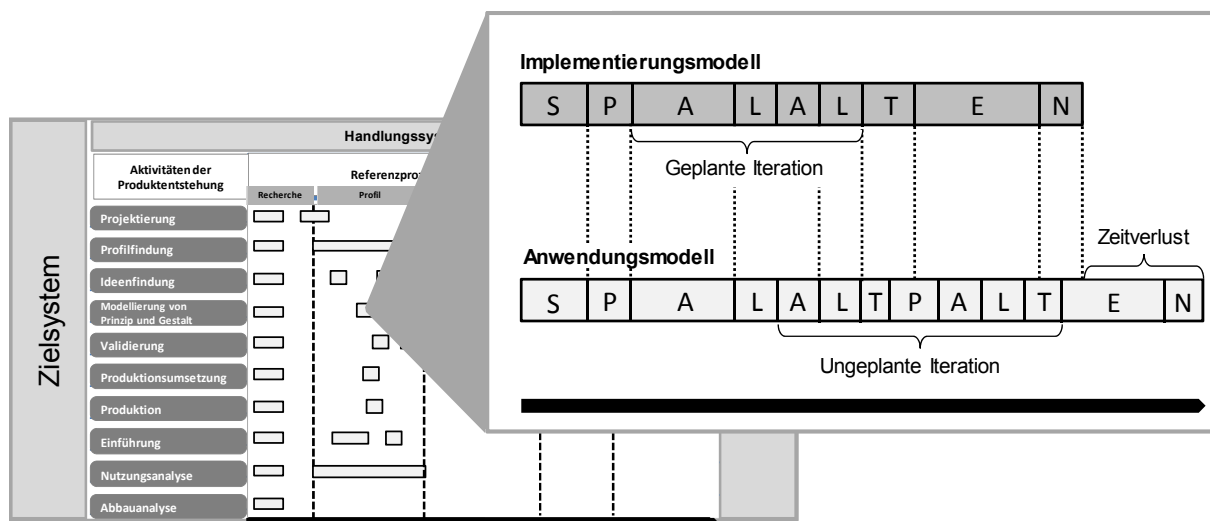


Bild 2-24: Abbildung geplanter und ungeplanter Iterationen im iPeM

Die Modellierung von Implementierungs- und Anwendungsmodellen dient nicht zuletzt dem besseren Verständnis der durchlaufenen Prozesse. Im Nachgang eines Produktentstehungsprozesses können diese Modelle analysiert und die darin abgebildeten Prozesse z.B. hinsichtlich Effektivität und Effizienz bewertet werden. Die hinzugewonnene Erfahrung ermöglicht so die kontinuierliche Verbesserung bestehender Referenzmodelle.

¹⁴¹ vgl. Albers, Muschik & Braun 2010

2.5.3 Integrierte Ressourcenplanung und -steuerung

Ressourcen stellen ein weiteres wesentliches Element im Handlungssystem dar. Sie umfassen sowohl Mitarbeiter und Kapital als auch Arbeitsmittel wie Material oder Maschinen. Da diese Elemente untereinander vernetzt sind und in vielfältigen Beziehungen, z.B. zu externen Lieferanten oder Servicedienstleistern, stehen, können die Ressourcen ebenfalls als Subsystem der Produktentstehung charakterisiert werden¹⁴².

Im iPeM erfolgt die Ressourcenplanung und -steuerung auf Basis von Zielen und Aktivitäten. Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts wird dabei zunächst ausgehend von den Zielen eine Abfolge durchzuführender Aktivitäten geplant (Implementierungsmodell). Den einzelnen Aktivitäten werden dann die im Ressourcensystem verfügbaren Mitarbeiter, Budgets und Arbeitsmittel zugeordnet. Dieser Vorgang, der auch als **Ressourcenallokation** bezeichnet wird, gestaltet sich insbesondere in Multi-Projektsystemen schwierig, da hier mehrere Projekte auf gemeinsame Ressourcen zugreifen und es so zu Engpässen in deren Verfügbarkeit kommen kann¹⁴³.

Durch die explizite Abbildung der Vernetzung von Aktivitäten mit Zielen und Ressourcen ergibt sich die Möglichkeit einer integrierten Ressourcenplanung und -steuerung. ALBERS et al.¹⁴⁴ führen hierzu die systemischen Wechselwirkungen zwischen Zielen, Aktivitäten und Objekten (ZAO-Ansicht) und jene zwischen Zielen, Ressourcen und Aktivitäten (ZRA-Ansicht) zusammen. Bild 2-25 zeigt ein einfaches Beispielsystem, in welchem die beiden aufgeführten Sichtweisen dargestellt sind. Die Abbildung verdeutlicht, dass z.B. Ziel 1 durch die Aktivität 1 in Objekt 1 umgesetzt werden soll. Der Abgleich von Objekt 1 zu Ziel 1 erfolgt durch Aktivität 2. Die ZRA-Ansicht (rechts in Bild 2-25) zeigt zudem, dass diesen beiden Aktivitäten dafür dieselbe Mitarbeiter-Ressource R1 zugeordnet ist.

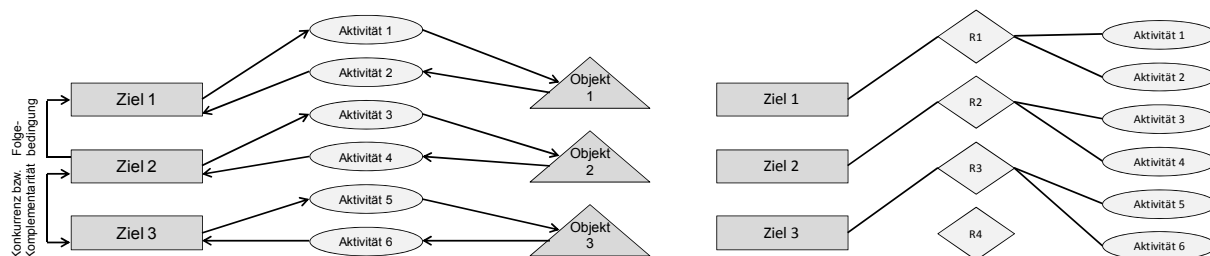


Bild 2-25: Beispielsystem eines geplanten Projekts in ZAO- und ZRA-Ansicht

¹⁴² vgl. Albers & Braun 2011

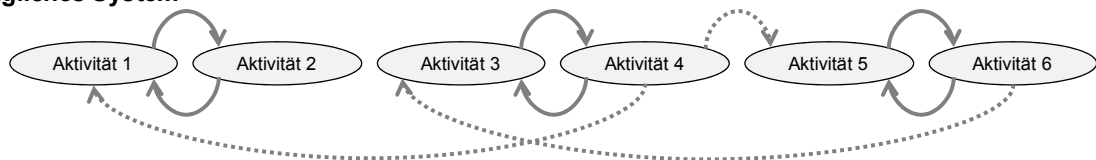
¹⁴³ vgl. Jahn 2009, S.15

¹⁴⁴ vgl. Albers, Breitschuh & Lohmeyer 2012

Von besonderer Wichtigkeit bei der Ressourcenplanung und -steuerung sind die Verbindungen innerhalb des Zielsystems. Im Beispielsystem (links in Bild 2-25) sind Ziel 1 und Ziel 2 verbunden über eine Folgebedingung, d.h. Ziel 1 geht aus der Erfüllung von Ziel 2 hervor (unidirektionale Verbindung). Weiter befinden sich Ziel 2 und Ziel 3 in direkter Abhängigkeit, die entweder komplementär oder konkurrierend sein kann (bidirektionale Verbindung).

Über die Verbindungen von Zielen ergeben sich indirekte Wechselwirkungen zwischen Aktivitäten. Bild 2-26 zeigt auf Basis des vorgestellten Beispielsystems die zielbedingten Verbindungen zwischen den sechs geplanten Aktivitäten. Dabei sind zum einen solche Verbindungen dargestellt, die sowohl über ein Ziel als auch über eine Ressource verknüpft sind. Zum anderen sind aber auch die Verbindungen abgebildet, die nur über Ziele, jedoch nicht über eine Ressource verknüpft sind.

Ursprüngliches System



Optimiertes System

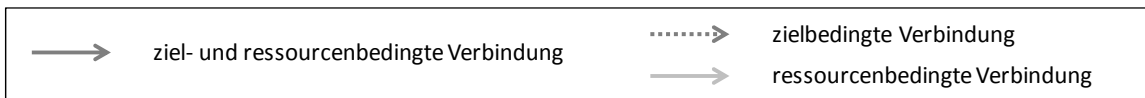
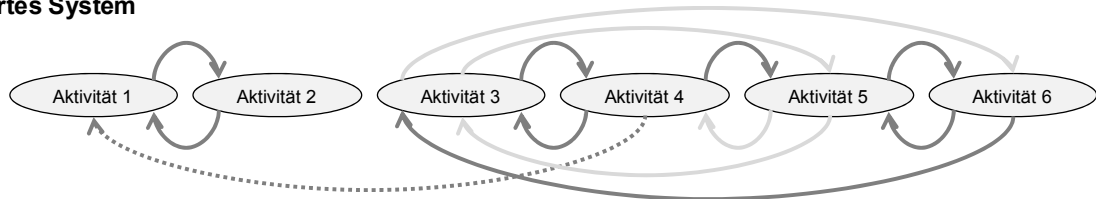


Bild 2-26: Integrierte Ressourcenplanung und -steuerung im iPeM¹⁴⁵

Letzteren Fall versucht der iPeM-Ansatz zur integrierten Ressourcenplanung und -steuerung durch eine optimierte Ressourcenallokation zu vermeiden, d.h. es werden – unter Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen – Mitarbeiter nach Möglichkeit den entsprechenden Aktivitäten so zugeordnet, dass sich die zielbedingten und die ressourcenbedingten Verbindungen von Aktivitäten überlagern. Der Vorteil dieses Ansatzes ist darin zu sehen, dass der Mitarbeiter nicht nur als Ressource zur Durchführung einer bestimmten Aktivität, sondern auch als Wissensträger mehrerer Aktivitäten wahrgenommen und so zielgerichtet eingesetzt werden kann.

¹⁴⁵ vgl. Albers, Breitschuh & Lohmeyer 2012

2.5.4 Zwischenfazit

Prozessmodelle sind in der Produktentstehung von zentraler Bedeutung, da sie den Dreh- und Angelpunkt interdisziplinärer Handlungssysteme darstellen, an welchem die unterschiedlichen Perspektiven und Kompetenzen der einzelnen Beteiligten zusammenlaufen.

Das iPeM verbindet verschiedene Verständnisse von Produktentstehungsprozessen, indem es die Sichten von Projektmanagement (Planung, Steuerung und Kontrolle) und Entwicklungsunterstützung (Problemlösung und Wissensgenerierung) in einem Modell zusammenführt. Es stellt mit der Aktivitätenmatrix die beständige Basis eines gemeinsamen Begriffs- und Verständnismodells dar und definiert dabei die relevanten Prozessbausteine für die sequenzielle Repräsentation des zeitlichen Ablaufs im Phasenmodell.

Das iPeM ermöglicht durch die Trennung von Aktivitäten und Phasen den Umgang mit der Einzigartigkeit und Individualität von Entwicklungsprozessen. Beispielsweise können Iterationen als erneut durchzuführende bzw. bereits durchgeführte Abfolge von Aktivitäten entlang des Zeitstrahls realistischer abgebildet werden, als in anderen Vorgehens- und Prozessmodellen.

Die Unterteilung in Referenz-, Implementierungs- und Anwendungsmodelle erlaubt zudem eine klarere Differenzierung des Modellzwecks. Referenzmodelle beschreiben unternehmens- oder branchenspezifische Archetypen von Prozessen und erfüllen somit den Zweck Prozesswissen wiederverwendbar abzubilden. Implementierungsmodelle dahingegen dienen der produktspezifischen Planung von Entwicklungsprozessen und verfolgen somit den Zweck der Prozessvorgabe. Anwendungsmodelle wiederum sollen Aufschluss über den tatsächlichen Prozessablauf geben sollen.

Das Ressourcensystem im iPeM beinhaltet neben Kapital und Arbeitsmitteln insbesondere die Mitarbeiter als zentrale Elemente eines Handlungssystems. Die integrierte Ressourcenplanung und -steuerung des iPeM erlaubt dabei die Zuordnung einer zur Aktivität passenden Mitarbeiter-Ressource (Fit-Beziehung), die Bereitstellung dieser Ressource zum richtigen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess (Flow-Beziehung) und die synergetische Verteilung der Ressource (in ihrer Funktion als Wissensträger) auf mehrere Aktivitäten (Sharing-Beziehung).

Zusammenfassend stellt das iPeM aufgrund seiner integrativen Betrachtung von Produktentstehungsprozessen sowie der starken Berücksichtigung von iterativer Wissensgewinnung und adaptiver Prozessplanung und -steuerung ein geeignetes Rahmenwerk für die Erforschung menschenzentrierter Entwicklungsaspekte bereit.

2.6 Handhabung von Anforderungen

2.6.1 Anforderungsbegriff

Ein Produktentstehungsprozess beginnt mit der Äußerung eines Bedarfs, den es durch die Entwicklung eines physischen Objekts zu befriedigen gilt. Dabei wird der zumeist informal beschriebene Bedarf sondiert und zu einer formalen Repräsentation weiterentwickelt, die im Allgemeinen als Produktbeschreibung, Spezifikation oder aber, wie in den meisten Fällen, als Anforderung bezeichnet wird¹⁴⁶.

Der Begriff der Anforderung wird durch die VDI-RICHTLINIE 2221¹⁴⁷ allgemein definiert als eine qualitative und/oder quantitative Festlegung von Eigenschaften oder Bedingungen für ein Produkt. Ausgehend von dieser übergeordneten Definition des Begriffs werden Anforderungen in eine Vielzahl unterschiedlicher Kategorien gegliedert. Eine Auswahl möglicher Unterteilungen zeigt die folgende Auflistung:

- Forderungen und Wünsche¹⁴⁸
- Kundenanforderungen und funktionale Anforderungen¹⁴⁹
- Technisch-wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen¹⁵⁰
- Qualitative und quantitative Anforderungen¹⁵¹
- Explizite und implizite Anforderungen¹⁵²
- Vorgegebene und selbsterkannte Anforderungen¹⁵³
- Problemorientierte und lösungsorientierte Anforderungen¹⁵⁴

KICKERMANN¹⁵⁵ definiert eine Anforderung umfassender als eine Vorgabe, deren Erfüllung den zielgerichteten Verlauf des jeweiligen Entwicklungsprozesses steuert und/oder Eigenschaften des betreffenden Produktes bestimmt. Als Steuerungsgröße sind Anforderungen folglich durchgängig in den Produktentstehungsprozess eingebunden, wodurch sich einzelne Forschungsbereiche zur Anforderungs-klärung, -handhabung, -strukturierung und -modellierung herausentwickelt haben, die sich entgegen der Definition durch die VDI-Richtlinie 2221 nicht nur mit der Festlegung von Produkteigenschaften, sondern vielmehr mit dem gesamten „Lebenszyklus von Produkthanforderungen“ auseinandersetzen.

¹⁴⁶ vgl. Darlington & Culley 2002

¹⁴⁷ vgl. VDI 2221, 1993, S.39

¹⁴⁸ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.215

¹⁴⁹ vgl. Suh 1999

¹⁵⁰ vgl. Ehrlenspiel 2007, S.372

¹⁵¹ vgl. Kruse 1996, S.11

¹⁵² vgl. Ehrlenspiel 2007, S.368

¹⁵³ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.1

¹⁵⁴ vgl. Restrepo & Christiaans 2003

¹⁵⁵ vgl. Kickermann 1995, S.23

2.6.2 Anforderungserfassung

Die Anforderungserfassung behandelt die methodische Unterstützung zur Identifikation von Anforderungen. Als methodische Hilfsmittel werden in diesem Zusammenhang in der Regel Checklisten, Fragelisten und Leitlinien empfohlen, wobei die **Hauptmerkmalsliste** nach PAHL¹⁵⁶ sowie die **Suchmatrix** nach FRANKE¹⁵⁷ im deutschsprachigen Raum zu den bekanntesten Ansätzen zählen. EHRENSPIEL¹⁵⁸ betont aber, dass darüber hinaus insbesondere Gespräche mit den verschiedenen Interessensvertretern (Stakeholder) notwendig sind, um ein Vergessen von Anforderungen oder deren fehlerhafte Festlegung zu vermeiden. Als zentrale Quelle von Anforderungen gilt dabei grundsätzlich der Kunde bzw. der Markt.

Ein weiteres in der Praxis etabliertes Vorgehen besteht in der Textanalyse von Dokumenten, wie z.B. Entwicklungsaufträgen. Die Entwicklungs- bzw. Konstruktionsabteilung steht dabei vor dem Problem, die lösungs- und gestaltbeeinflussenden Produktspezifikationen zu erkennen und nach Möglichkeit mit quantitativen Angaben zu formulieren und zu dokumentieren¹⁵⁹. LINDEMANN¹⁶⁰ weist jedoch darauf hin, dass Dokumente generell mit „gesundem Menschenverstand“ und einer kritischen Grundhaltung zu hinterfragen sind. Wird im Auftragstext eine eindeutige Abweichung von bekannten Informationen erkannt, muss dieser Widerspruch mit dem Kunden besprochen werden.

COOPER, WOOTTON & BRUCE¹⁶¹ stellen ein generisches Vorgehensmodell zur Anforderungserfassung auf, welches zwischen den drei aufeinander aufbauenden Stufen der Informationsakquise und -erzeugung, der Informationstransformation und der Anforderungserzeugung unterscheidet (vgl. Bild 2-27). Im ersten Schritt werden zunächst relevante Informationsquellen, wie z.B. Stakeholder, identifiziert und diese dann unter Berücksichtigung interner und externer Einflüsse, d.h. vor dem Hintergrund individueller Ansichten und Wahrnehmungen, zur Informationsakquise herangezogen. Im zweiten Schritt bildet sich auf Basis der akquirierten Informationen beim Anforderungsermittler ein individuelles Verständnis des Anforderungskollektivs. Im Fall mehrerer Anforderungsermittler kann in einem Abstimmungsprozess, z.B. durch Diskussionen ein gemeinsames Verständnis aufgebaut werden. Ausgehend davon folgt im dritten Schritt die Definition der Anforderungen, die es wiederum gemeinsam abzustimmen gilt.

¹⁵⁶ vgl. Pahl 1972

¹⁵⁷ vgl. Franke 1975

¹⁵⁸ vgl. Ehrlenspiel 2007, S.374

¹⁵⁹ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.213

¹⁶⁰ vgl. Lindemann 2009, S.97

¹⁶¹ vgl. Cooper, Wootton & Bruce 1998

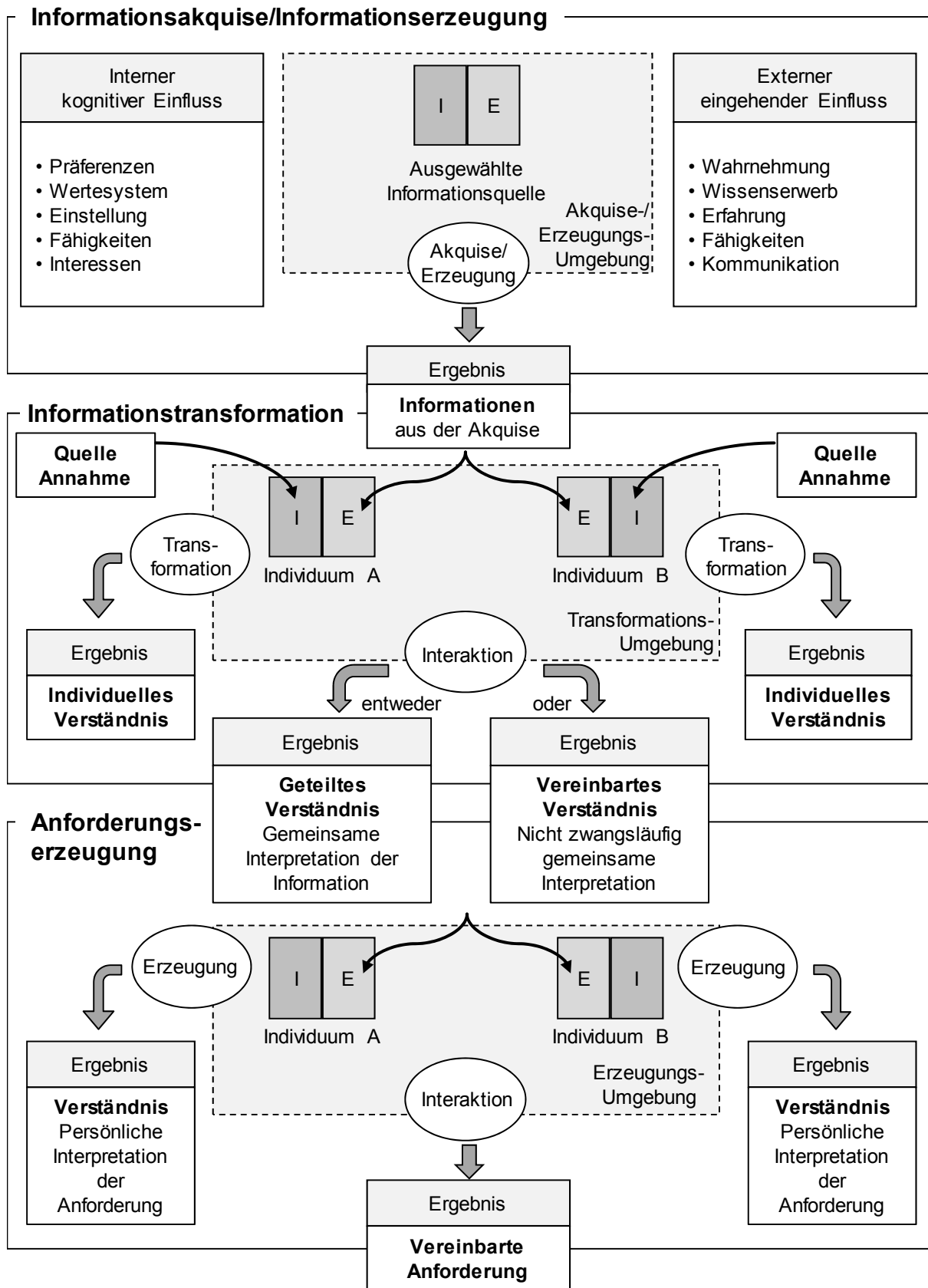


Bild 2-27: Prozessmodell der Anforderungserfassung nach COOPER, WOOTTON & BRUCE¹⁶²

¹⁶² vgl. Cooper, Wootton & Bruce 1998

AHRENS¹⁶³ untersucht in ihrer Forschungsarbeit insgesamt neun verschiedene wissenschaftliche Ansätze hinsichtlich ihrer Unterstützung bei der Anforderungserfassung. Zum Vergleich der ausgewählten Ansätze definiert sie Bewertungskriterien in den sechs Dimensionen: Kunde, Transformation, Konkretisierung, Handhabung, Wettbewerb und Flexibilität (vgl. Tabelle 2-2). AHRENS¹⁶⁴ schlussfolgert aus den Analyseergebnissen, dass die Ansätze, die den meisten Kriterien der Kundendimension und sämtlichen Kriterien der Transformationsdimension gerecht werden, stets in der Handhabungsdimension die größten Schwächen zeigen. Umgekehrt weisen die in der Handhabungsdimension herausragend beurteilten Ansätze zumeist Defizite in der Kundendimension auf. AHRENS¹⁶⁵ vermutet die Ursache für diese differenzierte Fokussierung in kulturellen Unterschieden:

- *„US-amerikanische Ansätze lassen sich grundsätzlich auf Neukonstruktionen übertragen. Der Kunde als wichtigster Faktor für den Erfolg einer Produktentwicklung in der Marktwirtschaft steht hier deutlich im Vordergrund sämtlicher Betrachtungen.*
- *Die in Europa und vor allem in Deutschland erarbeiteten Ansätze sind dagegen eher auf die Zusammenstellung der technischen Anforderungen ausgerichtet. Der Grund dafür ist, dass mit deren möglichst vollständiger Zusammenstellung zeitraubenden Iterationen zur Behebung von Fehlern, die auf mangelnde Aufgabenklärung zurückzuführen sind, effektiv entgegengewirkt werden kann.“*

Als weitere Ursache sollte hier jedoch auch der Grad der Formalisierung betrachtet werden. Die „**Stimme des Kunden**“ unterscheidet sich zumeist stark von der „knappen und präzisen Formulierung eines gewünschten Sachverhalts in der **Sprache des Konstrukteurs**“¹⁶⁶. Entsprechend der dargestellten Ergebnisse scheint eine einmalige, unidirektionale Transformation von Kundenanforderungen in technische Anforderungen als effizient umsetzbar, eine kontinuierliche, bidirektionale Transformation, wie sie bei einer effektiven Handhabung von Kundenanforderungen notwendig wäre, gestaltet sich jedoch als aufwendig und schwierig.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Anforderungserfassung, welcher von AHRENS nicht betrachtet wird, ist die Eignung der methodischen Ansätze zur Unterstützung interdisziplinärer Entwicklungstätigkeiten.

¹⁶³ vgl. Ahrens 2000, S.11ff.

¹⁶⁴ vgl. Ahrens 2000, S.110

¹⁶⁵ vgl. Ahrens 2000, S.112

¹⁶⁶ vgl. Ehrlenspiel 2007, S.365

Tabelle 2-1: Übersicht der Dimensionen zur Anforderungserfassung nach AHRENS¹⁶⁷

Dimen-sion	Erläuterung	Wert	Kriterium bzw. Merkmal für die Wertvergabe
Kunde(n)	Erfassen von Kundenanforderungen	0	Das Erfassen von Kundenanforderungen wird nicht berücksichtigt.
		1	Das Erfassen von Kundenanforderungen erfolgt indirekt, z.B. über den Umweg der Marketingabteilung. Der direkte Kundenkontakt fehlt.
		2	Beim Erfassen von Kundenanforderungen werden die Kunden direkt einbezogen.
		3	Das Erfassen von Kundenanforderungen erfolgt im Rahmen von Kundengesprächen.
		4	Interaktive Produktentwicklung mit dem Kunden.
Transformation	Übersetzen der Kundenanforderungen in technische Anforderungen	0	Das Übersetzen der Kundenanforderungen in technische Anforderungen wird nicht berücksichtigt.
		1	Kundenanforderungen werden zum besseren Verständnis analysiert.
		2	Das Übersetzen der Kundenanforderungen in technische Anforderungen erfolgt methodisch.
Konkretisierung	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	0	Das Klären der Aufgabenstellung wird nicht bzw. nur unvollständig berücksichtigt.
		1	Das Präzisieren der Anforderungen ist, sofern möglich und sinnvoll, durch qualitative und quantitative Zielvorgaben vorgesehen.
		2	Das Zusammenstellen der benötigten Anforderungen wird durch methodische Hilfsmittel unterstützt.
		3	Die Anforderungen werden zusätzlich hinsichtlich der Notwendigkeit ihrer Umsetzung in Forderungen und Wünsche unterschieden.
		4	Als Wunsch spezifizierte Anforderungen werden weiterhin hinsichtlich der Notwendigkeit ihrer Umsetzung differenziert.
Handhabung	Anforderungshandhabung	0	Die Handhabung von Anforderungen wird nicht berücksichtigt.
		1	Die Anforderungen werden entsprechend ihrer inhaltlichen Zugehörigkeit geordnet.
		2	Zusätzlich ist die einzelne Anforderung bzw. die Anforderungsliste leicht änderbar.
		3	Die Vorgehensweise zur Anforderungserfassung und -handhabung ist für eine IT-Unterstützung geeignet.
Wettbewerb	Beachten des Wettbewerbs	0	Die technischen Lösungen der Wettbewerber werden nicht berücksichtigt.
		1	Die technischen Lösungen der Wettbewerber werden analysiert.
		2	Die Anforderungserfüllung von existierenden Lösungen wird analysiert und verglichen.
		3	Die Anforderungsgewichtung wird zusätzlich zur Anforderungserfüllung von existierenden Lösungen eingesetzt.
Flexibilität	Flexibilität der Vorgehensweise	1	Die Vorgehensweise ist hauptsächlich für Anpassungskonstruktionen geeignet.
		2	Die Vorgehensweise ist grundsätzlich für alle Konstruktionsarten geeignet sowie allgemein anpassbar.

¹⁶⁷ vgl. Ahrens 2000, S.11

Im Kontext hochgradig interdisziplinärer Produktentstehungsprozesse spricht JUNG¹⁶⁸ nicht von Anforderungserfassung, sondern von **Anforderungsklä rung**. Er betont damit den Aspekt, dass Anforderungen fachdisziplinübergreifend vereinbart werden müssen. Insbesondere das gemeinsame Verständnis expliziter Anforderungen spielt in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle.

GRÖßER¹⁶⁹ untersucht im Rahmen seiner Forschungsarbeit beispielweise die fachdisziplinübergreifende Anforderungsermittlung in der Zusammenarbeit von Marketing und Konstruktion. Die zentralen Probleme beschreibt er dabei folgendermaßen:

- Unidisziplinär orientierte, d.h. technisch-naturwissenschaftlich oder kaufmännisch orientierte, Anforderungsermittler haben oft nur ihre Anforderungen an das Produkt im Auge und sind nicht in der Lage, einen anderen Blickwinkel zu akzeptieren.
- Terminologische Barrieren verhindern oder erschweren häufig die Verständigung bei der Ermittlung von Produkthanforderungen zwischen Marketing und Produktplanung auf der einen und Produktentwicklung und Konstruktion auf der anderen Seite.
- Unterstützungsformen der Anforderungserfassung (Suchmatrix, Frageliste, Checkliste etc.) berücksichtigen keine problem- bzw. bearbeiterspezifischen Aspekte.

JUNG¹⁷⁰ sieht ähnliche Schwierigkeiten im interdisziplinären Umfeld der Entwicklung medizintechnischer Produkte. Anforderungen werden mitunter gar nicht erst erkannt oder aber in ihrer Notwendigkeit unterschätzt. Des Weiteren erschweren die unterschiedlichen Terminologien die konkrete Formulierung von Anforderungen. Die Hauptursache dafür wird darin begründet, dass vorhandene Methoden der Anforderungserfassung vor allem den inneren Dialog des Ingenieurs unterstützen, dieser innere Dialog in interdisziplinären Projekten jedoch nicht ausreichend ist, da relevantes Wissen auf verschiedene Personen verteilt ist.

WARD, SHEFELBINE & CLARKSON¹⁷¹ ergänzen diese Einschätzung. Ausgehend von einer Untersuchung zur Anforderungserfassung stellen sie fest, dass Kommunikationsschwierigkeiten z.B. zwischen dem Management, dem Marketing und der Entwicklung in einer Vielzahl inkorrekt er Anforderungen resultieren. Als ein

¹⁶⁸ vgl. Jung 2006, S.3f.

¹⁶⁹ vgl. Größer 1992, S.19

¹⁷⁰ vgl. Jung 2006, S.64

¹⁷¹ vgl. Ward, Shefelbine & Clarkson 2003

besonders kritischer Faktor wird hier die unzureichende Dokumentation von Begründungen für Anforderungen genannt, da so die Identifikation inkorrektur Anforderungen entscheidend erschwert wird. Weiter wird festgestellt, dass einige Anforderungen eher den Charakter „frühzeitiger Vermutungen“ besitzen. Diese Anforderungen sind daher unbedingt zu aktualisieren, werden aufgrund von unzureichender Kennzeichnung aber meist vergessen und folglich bis zum Abschluss der Entwicklung unverändert beibehalten.

JUNG¹⁷² schlägt daher eine **iterative Anforderungsklärun**g vor, bei welcher *„im Verlauf der Entwicklung und der damit zunehmenden Konkretisierung der Lösung für das Entwicklungsproblem das System selbst, aber vor allem das Anforderungssystem detailliert und erweitert werden“*. Als System wird hier die vollständige systemtechnische Repräsentation des Produktes mit seinen beeinflussenden Nachbarsystemen bezeichnet, während das Anforderungssystem die weitgehend vollständig formulierten und definierten sowie zu ihrem Ursprung rückverfolgbaren Anforderungen beinhaltet.

Im Zusammenhang mit der Erfassung und Handhabung von Anforderungen wurden zahlreiche empirische Untersuchungen durchgeführt, welche die Notwendigkeit einer iterativen Anforderungsklärun g untermauern. Dabei erstreckt sich das Spektrum der Forschungsprojekte von der Beobachtung einzelner Konstrukteure, über die Analyse von Dokumenten studentischer Entwicklungsteams, bis hin zu Interviews mit Ingenieuren aus der industriellen Praxis.

HANSEN und ANDREASEN¹⁷³ untersuchen die Erfassung und Handhabung von Produkthanforderungen mittels der Analyse von Spezifikationsdokumenten, die innerhalb mehrerer Projekte durch verschiedene studentische Entwicklungsteams erarbeitet wurden. Sie stellen dabei fest, dass die u.a. von ROOZENBURG und DORST¹⁷⁴ vertretende Ansicht, nach der alle Anforderungen bereits vor der Lösungssuche vollständig und eindeutig verständlich vorliegen müssen, nicht umsetzbar ist, da ein Großteil der Anforderungen nur in Abhängigkeit von ausgewählten Lösungen definiert werden kann. In der Studie zeigt sich, dass gerade durch eine zunächst unvollständige Spezifikation, welche lediglich die Beschreibung der grundlegenden Erwartungen und der zentralen Funktionen beinhaltet, die Erkundung des Lösungsraums und die Synthese neuartiger Lösungsideen maßgeblich unterstützt wird.

¹⁷² vgl. Jung 2006, S.97

¹⁷³ vgl. Hansen & Andreasen 2007

¹⁷⁴ vgl. Roozenburg & Dorst 1991

Auch CHAKRABARTI, MORGENSTERN & KNAAB¹⁷⁵ stellen klar, dass viele Anforderungen erst durch die Analyse von entwickelten Lösungen entstehen. Sie stützen ihre Aussagen auf die Beobachtung einzelner Konstrukteure bei der eigenständigen Bearbeitung einer mehrstündigen Entwicklungsaufgabe. Ihre Studie zeigt, dass auch erfahrene Entwickler eine relativ große Anzahl an Anforderungen entweder gar nicht oder zumindest doch unzureichend erfüllen. Das grundlegende Problem wird dabei im Verstehen der Anforderungen hinsichtlich ihrer Verbindungen zu anderen Anforderungen und hinsichtlich ihrer relativen Wichtigkeit gesehen.

DARLINGTON und CULLEY¹⁷⁶ erkennen, ausgehend von Interviews mit mehreren Entwicklungsingenieuren in drei verschiedenen Industrieunternehmen, dass entlang des Entwicklungsprozesses nicht nur der Reifegrad des Produktes, sondern auch der Reifegrad der dazugehörigen Anforderungen kontinuierlich zunimmt. Diese Evolution von Anforderungen innerhalb eines Projekts wird durch eine vergleichbare Studie von ALMEFELT et al.¹⁷⁷ bestätigt. Auf Basis von 24 Interviews mit erfahrenen Entwicklern eines schwedischen Automobilherstellers stellen sie fest, dass Anforderungen im Verlauf der Produktentwicklung geändert, hinzugefügt und neu priorisiert werden. Die Ursache für die Änderungen von Anforderungen wird dabei durch die folgenden Faktoren beschrieben:

- Wissen, das in der Entwicklungsarbeit gewonnen wird (z.B. durch Tests)
- Konflikte zwischen Anforderungen
- Technische Schwierigkeiten, die die Erfüllung hoher Anforderungen verhindern
- Synergiepotentiale, die z.B. Funktionsintegrationen ermöglichen
- Unerwartete Vorgaben zur Kosteneinsparung
- Neue Gesetze und Vorschriften
- Unerwartete Veränderung der Wettbewerbssituation oder der Kundenwünsche

Auf Basis der vorgestellten Forschungsergebnisse ist grundsätzlich festzuhalten, dass ausgehend von der dargelegten Diversität und Dynamik von Anforderungen deren Erfassung und Handhabung mitunter nicht nur komplex, sondern oftmals auch überaus unsicherheitsbehaftet ist. Folglich ist es naheliegend, die allgemeinen Ansätze der Systemtheorie und der Modelltheorie heranzuziehen, um wissenschaftliche Ansätze zur Strukturierung und Modellierung von Anforderungen zu entwickeln.

¹⁷⁵ vgl. Chakrabarti, Morgenstern & Knaab 2004

¹⁷⁶ vgl. Darlington & Culley 2004

¹⁷⁷ vgl. Almfelt, Berglund, Nilsson & Malmqvist 2006

2.6.3 Anforderungsstrukturierung

Die Strukturierung von Anforderungen ist der Prozess, in welchem Anforderungen klassifiziert und geordnet werden sowie eine möglichst weitgehende Analyse der vorherrschenden Relationen erfolgt¹⁷⁸. Als **Anforderungsklassifikation** bezeichnet KICKERMANN¹⁷⁹ die Zuordnung einer Anforderung zu einer Klasse innerhalb einer zuvor definierten Gliederungsstruktur, wobei er hier als grundlegende Klassifikationskriterien Dringlichkeit (Forderung/Wunsch), Quantifizierbarkeit (qualitativ/quantitativ), Begrenzbarkeit (Punkt-/Mindest-/Höchst-/Bereichsforderung) und Beeinflussbarkeit (interne/externe Anforderung) sieht.

Darüber hinaus ist in der Literatur eine Vielzahl weiterer Klassifikationsvorschläge zu finden. KRUSCHE¹⁸⁰ identifiziert auf Basis einer umfassenden Analyse von wissenschaftlichen Ansätzen zur Einteilung von Anforderungen die folgenden übergeordneten Anforderungsklassen:

- Anforderungen, die sich direkt an zu erfüllende Funktionen richten
- Anforderungen, die direkt auf die Gestaltung des Produktes wirken (abmessungs-, anordnungs- und werkstoffbestimmende Anforderungen¹⁸¹)
- Anforderungen, die abgeleitet werden (d.h. Anforderungen, die erst im Verlauf der Entwicklung identifiziert werden)
- Anforderungsmerkmale, die sich auf Hauptmerkmale beziehen
- Anforderungen, die sich hinsichtlich des Lösungsfindungsprozesses (in lösungsbestimmende oder lösungseinschränkende Anforderungen) unterscheiden lassen
- Anforderungen, die sich hinsichtlich der Verbindlichkeit unterscheiden

Die Strukturierung von Anforderungen kann nach JÖRG¹⁸² in zwei unterschiedlichen Arten erfolgen. Die vertikale Anforderungsstrukturierung beschreibt die Verfeinerung und Konkretisierung der Anforderungen im Lauf der Entwicklung, d.h. die Dynamik während des Entwicklungsprozesses. Die horizontale Anforderungsstrukturierung setzt die Anforderungen untereinander in Bezug und beschreibt die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten, wozu auch eine Überprüfung zwischen Anforderung und Lösung gehört.

¹⁷⁸ vgl. Krusche 2000, S.27f.

¹⁷⁹ vgl. Kickermann 1995, S.28. bzw. S.64ff.

¹⁸⁰ vgl. Krusche 2000, S.66ff.

¹⁸¹ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.306

¹⁸² vgl. Jörg 2005, S.20

Zur **vertikalen Anforderungsstrukturierung** wird zumeist die Verwendung einer Anforderungsliste empfohlen. Die Anforderungsliste ist nach der VDI-RICHTLINIE 2221¹⁸³ definiert als die schriftlich formulierte Sammlung der Anforderungen an ein Produkt. Die Anforderungsliste wird aufgrund einer Aufgabenstellung zu Beginn des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses erarbeitet und während dieses Prozesses ständig auf dem neusten Stand gehalten. PAHL/BEITZ¹⁸⁴ erklären, dass die Anforderungen so weit als möglich durch Zahlenangaben präzisiert werden sollen. Wo das nicht möglich ist, müssen verbale Aussagen möglichst klar formuliert werden. Die Anforderungsliste soll somit ein internes Verzeichnis aller Forderungen und Wünsche in der Sprache der Abteilungen sein, welche die Konstruktion durchzuführen haben.

Ebenfalls nach PAHL/BEITZ¹⁸⁵ muss die Anforderungsliste grundsätzlich dem Prinzip der Verbindlichkeit und Vollständigkeit gehorchen. Weiter heißt es aber, dass die Anforderungsliste zu Beginn grundsätzlich vorläufig ist, dass sie wächst und dass sie sich mit der Produktentwicklung ändert. Der Versuch alle denkbaren Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt von Beginn an zu formulieren, wird auch hier als nicht möglich erachtet. KICKERMANN¹⁸⁶ weist darauf hin, dass eine sorgfältig gepflegte Anforderungsliste ein hohes Maß an Dynamik entwickelt. Die Gründe sieht er zum einen in der Anforderungsexpansion, d.h. in der Aufspaltung einer Anforderung in mindestens zwei Anforderungen, die eine weitere Präzisierung, Konkretisierung oder Erweiterung im Hinblick auf den Forderungsinhalt darstellen. Zum anderen liegt ein Grund im iterativen Vorgehen, d.h. Anforderungen werden im Rahmen der Konkretisierung des Produktes bei unter Umständen mehrfachen Iterationsschritten verfeinert und korrigiert.

KRUSCHE¹⁸⁷ untersucht im Rahmen seiner Forschung rund 50 existierende Anforderungslisten mit über 2000 enthaltenen Anforderungen. Als wesentliche Schwachstellen identifiziert er dabei, dass (1) die Zusammenhänge zwischen den Anforderungen nicht erkennbar sind, (2) nur wenige Anforderungen auf den zu erfüllenden Zweck einer Konstruktion abzielen, (3) das zu einer Anforderung zugehörige Wissen nicht ausreichend definiert ist und (4) die gewählte Gliederung der Anforderungsliste für den weiteren Lösungsprozess nicht zweckdienlich ist, da sich beispielsweise wichtige von (zunächst) weniger wichtigen Anforderungen schlecht unterscheiden lassen.

¹⁸³ vgl. VDI 2221,1993, S.10

¹⁸⁴ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.215

¹⁸⁵ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.226

¹⁸⁶ vgl. Kickermann 1995, S.19

¹⁸⁷ vgl. Krusche 2000, S.18

Die **horizontale Anforderungsstrukturierung**, also die Abbildung der Relationen zwischen Anforderungen, kann grundsätzlich in Form hierarchischer Baumstrukturen oder nichthierarchischer Netzstrukturen erfolgen (vgl. Bild 2-28).

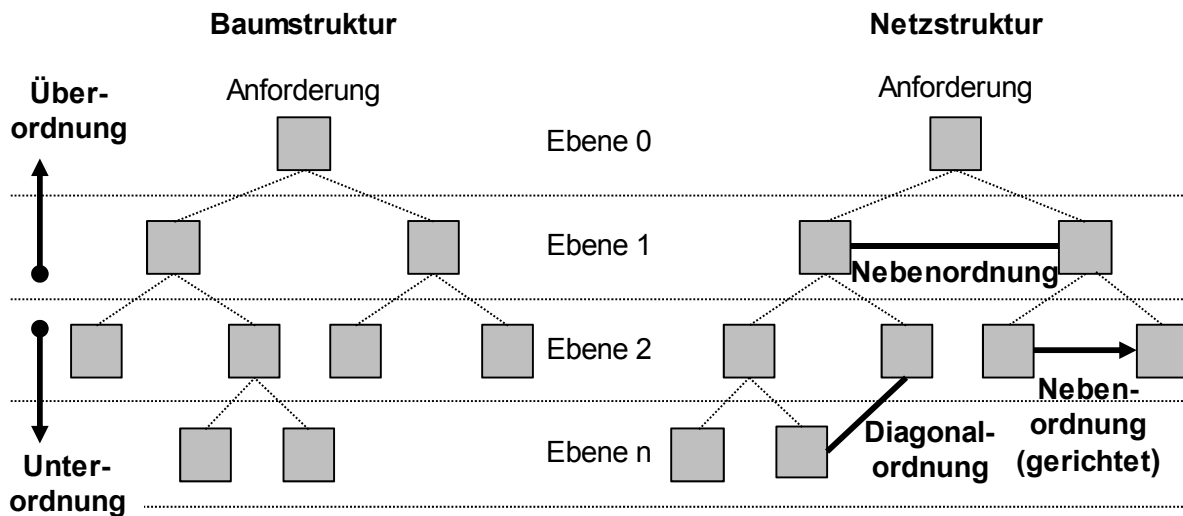


Bild 2-28: Baumstruktur und Netzstruktur von Anforderungen nach GEBAUER¹⁸⁸

KRUSE¹⁸⁹ unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen zwei Arten von Beziehungen. Die Strukturbeziehungen bilden die Anforderungshierarchie, wobei es hier, in der Betrachtung von oben nach unten, zur Konkretisierung, Spezialisierung, Dekomposition und Variation von Anforderungen kommen kann. Die Semantikbeziehungen dahingegen bilden durch Quer- und Diagonalverweise eine Netzstruktur. Sie kennzeichnen ob zwei Anforderungen (1) sich ausschließend, (2) konkurrierend oder (3) unterstützend zueinander stehen.

KRUSE¹⁹⁰ sieht eine hohe Anzahl sich ausschließender Beziehungen als Indikator für eine mangelhaft abgestimmte Struktur, was die Entwicklung erschwert, da Lösungen immer wieder kollidieren können. Er fordert daher diese Anforderungen zu überprüfen und ihre Anzahl entlang des Entwicklungsprozesses auf null zu reduzieren. Weiter wird dargelegt, dass eine große Menge konkurrierender Beziehungen viele Iterationsschleifen in der Entwicklung erwarten lassen, eine Lösung des Problems aber prinzipiell möglich ist. Viele unterstützende Beziehungen zeugen letztendlich von einem gut abgestimmten Anforderungsprofil. Gleichzeitig kann dies aber auf ein eng abgestimmtes Anforderungsnetz deuten, das auf Veränderungen mitunter sehr empfindlich reagiert.

¹⁸⁸ vgl. Gebauer 2001, S.48

¹⁸⁹ vgl. Kruse 1996, S.78ff.

¹⁹⁰ vgl. Kruse 1996, S.96ff.

Eine Netzstruktur kann grundsätzlich nicht nur als Graph sondern auch als Matrix abgebildet werden. Einer der bekanntesten Ansätze zur **matrixbasierten Strukturierung** von Anforderungen ist das Quality Function Deployment (QFD) und das darin enthaltene House of Quality (HoQ)¹⁹¹. Insbesondere DANNER¹⁹² nutzt den QFD-Ansatz für die Übersetzung von Kundenanforderungen in technische Anforderungen und darüber hinaus für die entsprechende Priorisierung der notwendigen Prozesse in Planung und Entwicklung.

Eine weitere Möglichkeit zur Anforderungsstrukturierung bietet die Verwendung von Design Structure Matrices (DSM)¹⁹³. EBEN und LINDEMANN¹⁹⁴ geben eine Übersicht zu Strukturkriterien, mit deren Hilfe eine matrixbasierte Analyse von Anforderungsnetzwerken vorgenommen werden kann (vgl. Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Strukturkriterien in Anforderungsnetzwerken nach EBEN und LINDEMANN¹⁹⁵

Strukturkriterium	Erklärung	Bedeutung
Aktivität	Verhältnis eingehender zu ausgehenden Relationen	Die Aktivität steht für die Intensität des Einflusses der Anforderung auf eine andere.
Passivität	Verhältnis ausgehender zu eingehenden Relationen	Eine stark passive Anforderung wird durch viele andere beeinflusst. Das kann eine Quelle für Unsicherheit sein, z.B. hinsichtlich der Änderungswahrscheinlichkeit.
Kritikalität	Produkt aus Aktiv- und Passivsumme	Eine Anforderung mit hoher Kritikalität (wird) beeinflusst durch eine hohe Anzahl anderer Anforderungen. Aufgrund der hohen Bedeutung im System, sollte dieser eine hohe Priorität gegeben werden.
Erreichbare Knoten	Anzahl der Knoten, die direkt oder über mögliche Pfade erreichbar sind	Einfluss der Anforderung auf andere innerhalb des gesamten Anforderungsmodells; Auswirkung ihrer Änderung
Gelenkknoten	Einzelner Knoten, der zwei Teilmengen verbindet	Die Anforderung verbindet ansonsten unabhängige Teilmengen von Anforderungen. Diese Anforderung kann z.B. eine wichtige Schnittstelle oder Wechselwirkung im betrachteten System sein.
Start	Nur ausgehende Relationen	Die Anforderung besitzt Einfluss auf viele andere Pfade, evtl sogar das ganze System.
Ende	Nur eingehende Relationen	Die Anforderung besitzt keinen direkten Einfluss auf andere Anforderungen und kann daher ohne Auswirkung geändert werden.
Isolierter Knoten	Keine ein- und ausgehenden Relationen	Die Anforderung kann unabhängig von anderen Anforderungen betrachtet werden.

¹⁹¹ vgl. Akao 1990

¹⁹² vgl. Danner 1996, S.102

¹⁹³ vgl. Steward 1981

¹⁹⁴ vgl. Eben & Lindemann 2010

¹⁹⁵ vgl. Eben & Lindemann 2010

2.6.4 Anforderungsmodellierung

Die Anforderungsmodellierung unterscheidet sich von der Anforderungsstrukturierung insofern, als dass zusätzlich zu den Relationen innerhalb der Anforderungsdomäne zum einen der Präzisionsprozess der Anforderungen über den Entwicklungsprozess hinweg abgebildet und zum anderen die Vernetzung des Anforderungsmodells mit anderen Partialmodellen dargestellt und verarbeitet werden muss¹⁹⁶.

Diese **Partialmodelle** sind so konzipiert, dass sie diejenigen Elemente zusammenfassen, die sehr eng miteinander verknüpft sind. Die Beziehungen zwischen den Elementen sind innerhalb eines Partialmodells daher eher komplex und zwischen den verschiedenen Partialmodellen relativ einfach. Die Partialmodelle stellen somit Entwurfsbereiche dar, die weitestgehend unabhängig voneinander bearbeitet werden können und trotzdem die Integrität des Gesamtmodells gewährleisten¹⁹⁷.

RUDE¹⁹⁸ untergliedert ein Produktmodell beispielsweise in vier Partialmodelle für Anforderungen, Funktionen, Prinzipien und Gestaltung. Bild 2-29 zeigt die Überlappungen der Partialmodelle, wobei die Schnittmengen der Modelle die Beziehungen zwischen deren Elementen repräsentieren. KLÄGER¹⁹⁹ unterscheidet an dieser Stelle zwischen partialmodellimmanenten und partialmodellübergreifenden Relationen.

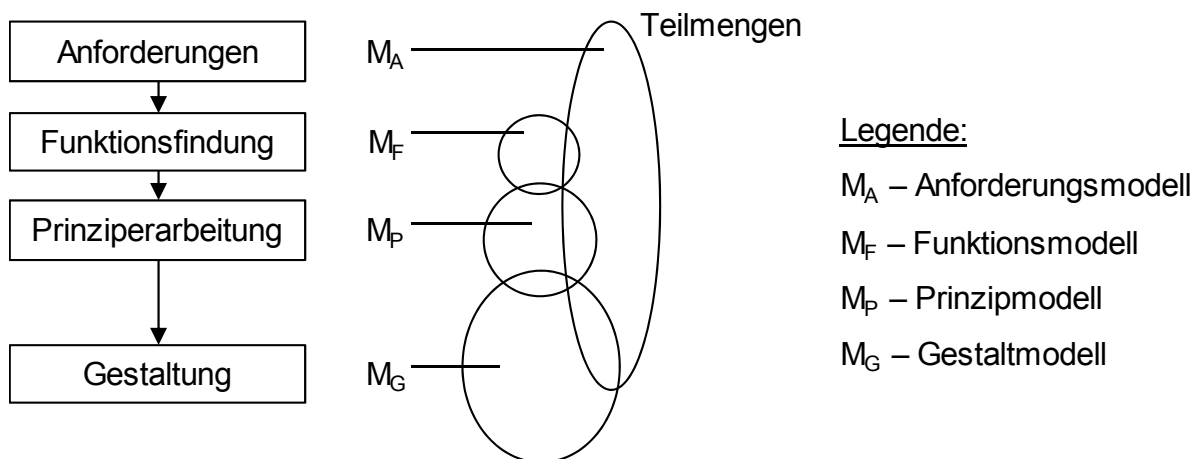


Bild 2-29: Partialmodelle des integrierten Produktmodells nach RUDE²⁰⁰

¹⁹⁶ vgl. Humpert 1995, S.65

¹⁹⁷ vgl. von Both 2004, S.65

¹⁹⁸ vgl. Rude 1998, S.179

¹⁹⁹ vgl. Kläger 1993, S.147f.

²⁰⁰ vgl. Rude 1998, S.179

STECHERT²⁰¹ definiert im Rahmen seiner Forschungsarbeit zur Anforderungsmodellierung ein Rahmenwerk mit insgesamt elf unterschiedlichen Partialmodellen, die entsprechend Bild 2-30 miteinander interagieren. Es ist ersichtlich, dass das Anforderungsmodell eine zentrale Rolle einnimmt, da es das einzige Modell ist, das in Beziehung zu sämtlichen anderen Partialmodellen steht.

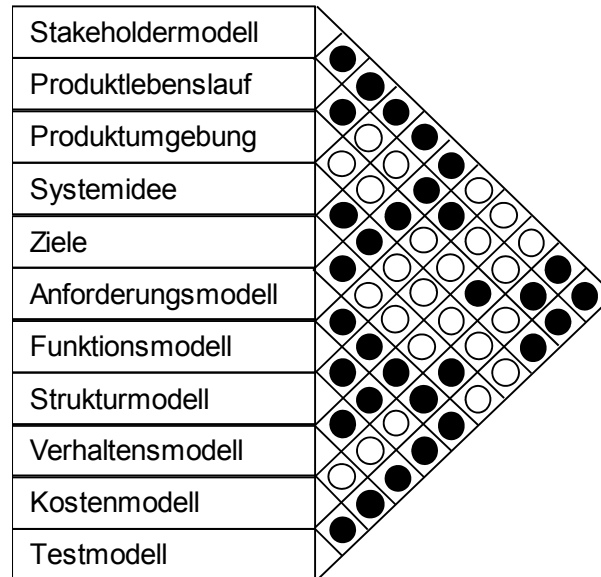


Bild 2-30: Einflussmatrix der Partialmodelle nach STECHERT²⁰²

Zur Modellierung der einzelnen Partialmodelle greift STECHERT auf die **Systems Modeling Language (SysML)** zurück. Die SysML ist eine Modellierungssprache, die aus der in der Softwareentwicklung weit verbreiteten Unified Modeling Language (UML) hervorgegangen ist. SysML versteht sich als eine an das Systems Engineering angepasste UML, d.h. es sollen nicht nur Software-Aspekte, sondern auch mechanische und elektrotechnische Aspekte modelliert werden können²⁰³.

STECHERT²⁰⁴ sieht die Vorteile der SysML darin, dass sie einen gut dokumentierten Ansatz zur Modellierung auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus und aus unterschiedlichen Sichtweisen heraus darstellt. Er erläutert, dass UML und SysML inzwischen an vielen Universitäten gelehrt werden, so dass davon auszugehen ist, dass die Einführungsbarrieren wesentlich geringer ausfallen als bei einer neu entwickelten akademischen Notation. Als größter Nachteil der SysML wird der starke Fokus auf die Bedürfnisse der Software- und Elektronikentwicklung genannt. Nach STECHERT kann dieser Nachteil aber durch eine geeignete Methodik und eigens dafür erarbeitete Profile mit neuen Stereotypen bewältigt werden.

²⁰¹ vgl. Stechert 2010, S.42ff.

²⁰² vgl. Stechert 2010, S.44

²⁰³ vgl. Weilkiens 2006, S.157

In Bild 2-31 ist ein SysML-Anforderungsdiagramm nach STECHERT²⁰⁵ dargestellt, das einige ausgewählte Objekte des Anforderungsmodells zeigt. Die Anforderungsobjekte sind als <<requirement>> gekennzeichnet. Bei den Anforderungen auf der linken Seite ist eine partialmodellimmanente, hierarchische Anforderungsstruktur zu erkennen. Des Weiteren bildet sich durch die Querbeziehungen zwischen Anforderungen (z.B. Typ <<trace>>) eine partialmodellimmanente Netzstruktur aus. Die Relation zum Antrieb (Typ <<block>>) und die Relation zur Beschickung (Use Case) sind Beziehungen zu anderen Partialmodellen, d.h. in diesem Fall Beziehungen zu einer Baugruppe und einem Anwendungsfall. Die Begründung der Anforderung (Typ <<rationale>>) besitzt lediglich den Charakter einer Notiz.

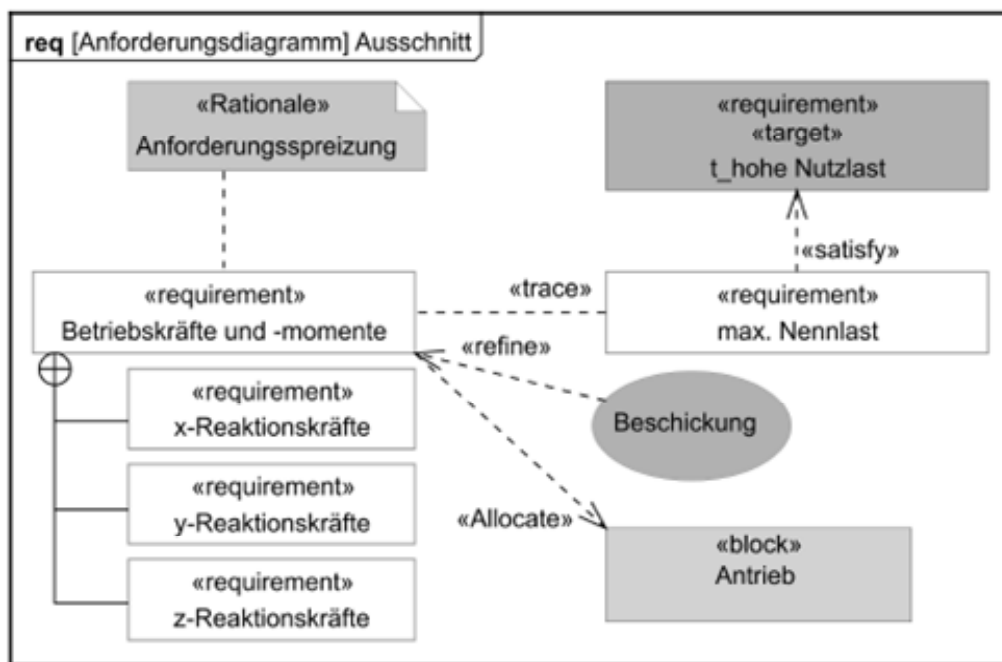


Bild 2-31: SysML-Anforderungsdiagramm nach STECHERT²⁰⁶

Trotz des Erfolges der UML in der Softwareentwicklung und trotz des Potentials, das SysML zur Anforderungsmodellierung von mechatronischen Systemen bietet, gilt es zu beachten, dass es grundlegende Unterschiede zwischen diesen beiden Produktentwicklungen gibt. DARLINGTON und CULLY²⁰⁷ schreiben in diesem Zusammenhang, dass im Gegensatz zur Softwareentwicklung bei der Entwicklung von maschinenbaulichen Produkten die Zuordnung von Problem und Lösung nicht allein durch logische Zusammenhänge beschrieben werden kann und zudem die Beschreibung der Lösung niemals die Lösung selbst darstellen wird.

²⁰⁴ vgl. Stechert 2010, S.45ff.

²⁰⁵ vgl. Stechert 2010, S.45ff.

²⁰⁶ vgl. Stechert 2010, S.84

²⁰⁷ vgl. Darlington & Culley 2002

2.6.5 Zwischenfazit

Eine Anforderung wird im Allgemeinen als eine durch einen Wert oder einen Wertebereich festgelegte Beschreibung eines einzelnen Produktmerkmals verstanden. Anforderungen dienen jedoch nicht nur der Festlegung von Produkteigenschaften, sondern werden auch als Steuerungsgrößen für den Produktentwicklungsprozess eingesetzt.

Die aufgeführten Studien zur Handhabung von Anforderungen zeigen, dass es nicht möglich ist, alle Anforderungen bereits vor der Lösungssuche vollständig und eindeutig verständlich zu definieren, da ein Großteil der Anforderungen nur in Abhängigkeit von ausgewählten Lösungen bestimmt werden kann. Folglich wird mit einer zunächst unvollständigen Spezifikation begonnen, welche lediglich die Beschreibung der grundlegenden Erwartungen und der zentralen Funktionen beinhaltet. Im Verlauf des Produktentstehungsprozesses werden dann Anforderungen hinzugefügt und neu priorisiert. Dies ist zumeist begründet in neu gewonnenem Wissen sowie zusätzlich erkannten Chancen und Risiken, aber auch im Auftreten unerwarteter Ereignisse, wie z.B. veränderten Randbedingungen.

Die betrachteten Forschungsarbeiten zu den Bereichen der Anforderungserfassung, Anforderungsstrukturierung und Anforderungsmodellierung zeigen zudem, dass die Handhabung von Anforderungen eine vielschichtige Herausforderung darstellt, bei welcher es eine Großzahl verschiedener Aspekte zu berücksichtigen gilt.

Die Erfassung von Anforderungen befasst sich mit dem Identifizieren, dem Explizieren und dem Transformieren von Anforderungen. Hier gilt es die expliziten und impliziten Erwartungen des Kunden sowie die Ansprüche der beteiligten Stakeholder zunächst zu erkennen und dann in expliziter und idealerweise auch konsistenter Form zu dokumentieren. Insbesondere bei der Transformation, also der Übersetzung von Kundenanforderungen in technische Anforderungen, besteht ein hohes Risiko, wesentliche Informationsinhalte zu verlieren oder sie zu verfälschen.

Die Strukturierung von Anforderungen verfolgt den Zweck, Wechselwirkungen zwischen Anforderungen aufzudecken. Es soll dabei nicht nur erkannt werden, welches besonders wichtige Anforderungen, also Anforderungen mit einer hohen Priorität sind, zusätzlich sollen auch Auswirkungen der Änderung einer Anforderung abgeschätzt werden können. In der Anforderungsmodellierung werden zudem Relationen zu anderen Partialmodellen, z.B. Funktions- oder Baugruppenmodellen, berücksichtigt. Eine zentrale Herausforderung der formalisierten Modellierung dieser Relationen besteht jedoch darin, dass bei der Entwicklung von maschinenbaulichen Produkten (im Gegensatz zur Softwareentwicklung) die Zuordnung von Problem und Lösung nicht allein durch logische Zusammenhänge beschrieben werden kann.

2.7 Handhabung von Zielsystemen

2.7.1 Zielbegriff

In der Konstruktionslehre und der Entwicklungsmethodik herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass die Lösung technischer Aufgaben durch zu erreichende Ziele und durch einschränkende Bedingungen bestimmt wird²⁰⁸. Anders steht es um die Definition des Zielbegriffs sowie dessen Abgrenzung zum Anforderungsbegriff.

LINDEMANN²⁰⁹ betont, dass bei der Entwicklung eines erfolgreichen Produktes eine Vielzahl von Entwicklungszielen erreicht werden muss. Zu den allgemeinen Entwicklungszielen zählt er dabei u.a. Termine, Ressourcenplanung und teamspezifischen Ziele. Sobald sich diese Entwicklungsziele auf das zu entwickelnde Produkt und den dafür notwendigen Entwicklungsprozess beziehen, handelt es sich nach LINDEMANN um Anforderungen.

EHRENSPIEL²¹⁰ bezeichnet Ziele als Soll-Vorstellungen des Auftraggebers (z.B. Kunde, Vertrieb oder Unternehmer). Ziele, so schreibt er, haben einen Aufforderungscharakter und können unscharf sein. Die Konstruktion formuliert diese Ziele in Anforderungen (Solleigenschaften) um, um sie für sich in einer Anforderungsliste bearbeitbar zu machen. Dieses Verständnis wird durch Bild 2-32 verdeutlicht. Anforderungen sind demzufolge eine Teilmenge von Zielen. Ferner ist zu berücksichtigen, dass Anforderungen über Ziele und Bedingungen verknüpft und durch Ziele und Bedingungen begründet sind.

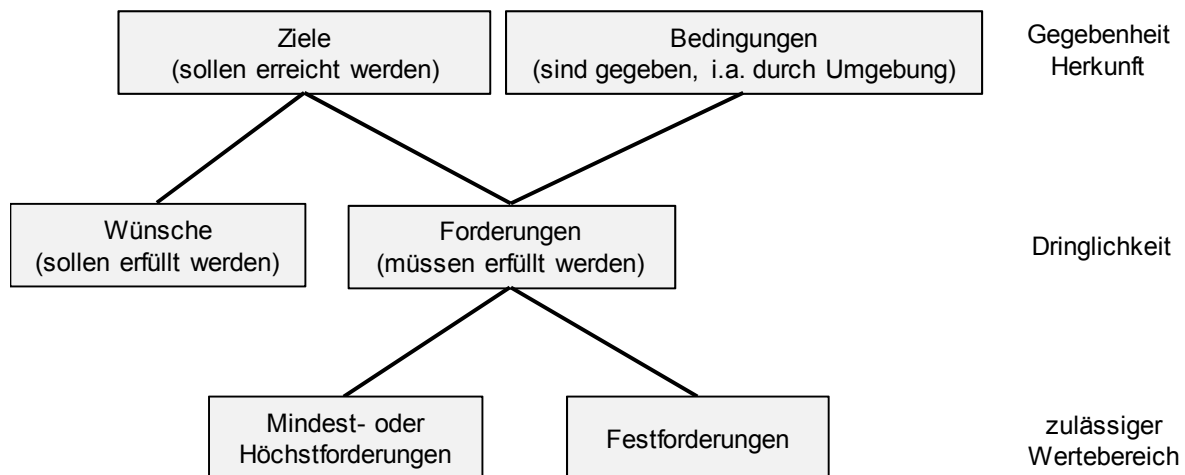


Bild 2-32: Abgrenzung von Anforderungs- und Zielbegriff nach VDI-RICHTLINIE 2247²¹¹

²⁰⁸ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.57

²⁰⁹ vgl. Lindemann 2009, S.95

²¹⁰ vgl. Ehrlenspiel 2007, S.89

²¹¹ vgl. VDI-Richtlinie 2247, 1994, S.47

Auch CROSS²¹² unterscheidet zwischen Zielen (engl.: objectives) und Anforderungen (engl.: requirements). Dabei werden Ziele als erweiterbare oder auch veränderbare Formulierungen des Produktzwecks verstanden, wohingegen Anforderungen ein präzise einschränkender Charakter zugesprochen wird.

Im Systems Engineering nach HABERFELLNER et al.²¹³ sind Ziele definiert als Aussagen darüber, was mit einer zu gestaltenden Lösung und auf dem Weg zu dieser Lösung erreicht bzw. vermieden werden soll. Um die Lösungssuche steuern zu können, müssen Ziele erarbeitet und formuliert werden sowie den am Prozess Beteiligten bekannt und von ihnen akzeptiert sein. EILETZ²¹⁴ sieht daher die Notwendigkeit im Rahmen der Zielbildung und Zielvereinbarung – über die bewusste Auswahl von Anforderungen aus der Summe der Anforderungen sämtlicher Anforderungssteller hinaus – sowohl eine Abwägung der Anforderungen auf Basis der Kenntnis und Einschätzung der Marktgegebenheiten und Kundenverhaltensweisen, als auch eine Antizipation zukünftiger Anforderungen vorzunehmen. Er definiert Ziele daher als gemeinsam vereinbarte zukünftige Soll-Zustände, die durch aktives Handeln erstrebt oder vermieden werden (vgl. Bild 2-33).

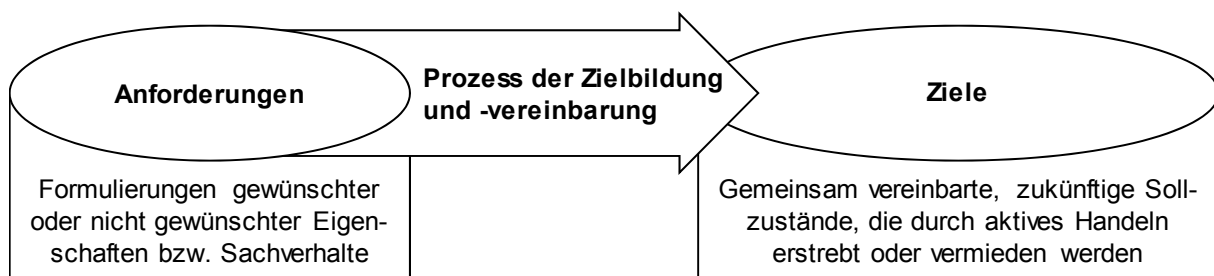


Bild 2-33: Abgrenzung von Anforderungs- und Zielbegriff nach EILETZ²¹⁵

Damit bindet EILETZ in seine Definition psychologische Aspekte des Zielbegriffs mit ein. So wird beispielsweise in der Arbeitspsychologie nach HACKER²¹⁶ ein Ziel als die bewusste gedankliche Vorwegnahme des angestrebten Ergebnisses einer Handlung einschließlich der Vornahme zu dessen Verwirklichung definiert. Entscheidend ist hierbei, dass Ziele nicht unmittelbar von außen, also etwa im Sinne von Vorgaben, auf das Handeln wirken. Ziele werden vielmehr im Ergebnis der aktiven geistigen Auseinandersetzung des Menschen mit äußeren Handlungsbedingungen gebildet. DÖRNER²¹⁷ bezeichnet Ziele daher auch als „**Leuchtfener für das Handeln**“.

²¹² vgl. Cross 2008, S.77, S.105

²¹³ vgl. Haberfellner, de Weck, Fricke & Vössner 2012, S.219

²¹⁴ vgl. Eiletz 1999, S.12

²¹⁵ vgl. Eiletz 1999, S.12

²¹⁶ vgl. Hacker 2005, S.47

²¹⁷ vgl. Dörner 2000, S.74

Das Erreichen von Zielen und Anforderungen wird in der Produktentwicklung grundsätzlich durch solche, den Handlungsspielraum einschränkende Randbedingungen erschwert. Als klassische **Randbedingungen** bezeichnen CLARKSON und ECKERT²¹⁸ auf der Projektebene etwa Zeit- und Kostenvorgaben oder auf der Unternehmensebene produktbezogene Qualitäts- und Sicherheitsansprüche.

MUSCHIK²¹⁹ unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen exogenen und endogenen Randbedingungen. Dabei sind exogene Randbedingungen durch das Entwicklungsumfeld (z.B. Wirtschaft, Politik, Gesellschaft und Umwelt) und das Marktumfeld (z.B. Kunde und Wettbewerb) bestimmt. Endogene Randbedingungen dahingegen entstammen dem Umfeld des eigenen Unternehmens (z.B. Unternehmensstrategie und Ressourcenverfügbarkeit).

BADER²²⁰ führt in diesem Kontext den Begriff der *Prämisse* ein. Er definiert ihn als eine bei der Entwicklung zwingend zu beachtende Bedingung, die sich aus einem Ziel ergibt, das von anderen verantwortet wird und nicht selbst umgesetzt werden kann. Randbedingungen können folglich zwar ermittelt, aber nicht eigenständig definiert oder geändert werden.

Ausgehend von den dargestellten Sichtweisen werden im Rahmen dieser Arbeit die Begriffe *Ziel*, *Anforderung* und *Randbedingung* entsprechend der folgenden Definitionen verwendet.

Definition 2-1: Ziel (engl.: objective)

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 2-2: Anforderung (engl.: requirement)

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 2-3: Randbedingung (engl.: constraint)

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.

²¹⁸ vgl. Clarkson und Eckert 2005

²¹⁹ vgl. Muschik 2011, S.26

²²⁰ vgl. Bader 2007, S.13

2.7.2 Zielformulierung

In der industriellen Praxis werden Ziele zumeist als Fließtext in Form von Lasten- und Pflichtenheften formuliert. Nach der VDI-RICHTLINIE 2519²²¹ wird das **Lastenheft** vom (internen oder externen) Auftraggeber erstellt. Es soll darin das WAS und WOFÜR der Entwicklung beschrieben werden. Das **Pflichtenheft** dahingegen wird nach Auftragserteilung vom Auftragnehmer erstellt. Hier soll das WIE und WOMIT geklärt und durch den Auftraggeber genehmigt werden. Das Pflichtenheft gilt dann als verbindliche Vereinbarung für die Abwicklung des Projektes (vgl. Bild 3-34).

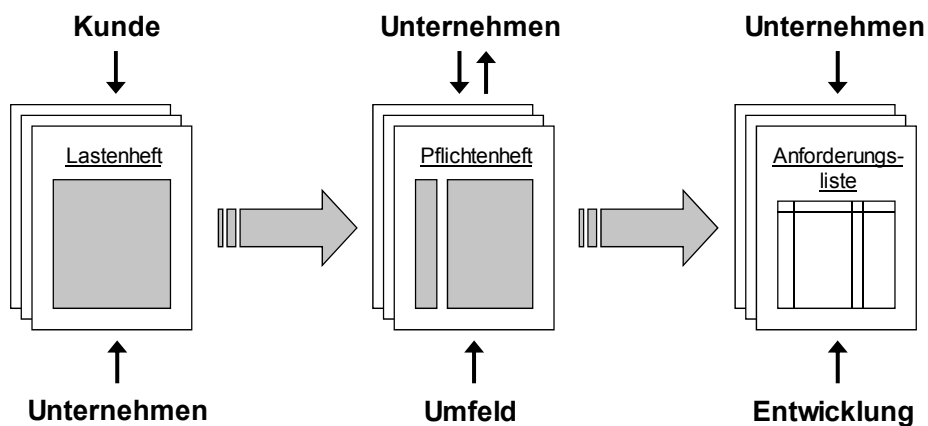


Bild 2-34: Abgrenzung von Lastenheft, Pflichtenheft und Anforderungsliste nach KRUSE²²²

In einigen Unternehmen wurde der Begriff des Pflichtenhefts durch den der Produktspezifikation ersetzt. Insbesondere bei der Entwicklung mechatronischer Produkte werden Ziele in der **Produktspezifikation** auch durch die Formulierung von Anwendungsfällen (use cases) und Testfällen (test cases) definiert. Anwendungsfälle beschreiben Szenarien für die zukünftige Nutzung eines zu entwickelnden Produktes. Es werden dazu verschiedene Handlungsabläufe von unterschiedlichen Akteuren in unterschiedlichen Situationen durchdacht, um so Erwartungen der Nutzer erfassen, Kundenbedürfnisse identifizieren und wechselnde Randbedingungen, wie z.B. Temperaturverhältnisse, berücksichtigen zu können²²³. Testfälle beschreiben Verfahren für die Validierung von Produkteigenschaften. Das Testobjekt, die sogenannte Unit Under Test (UUT)²²⁴, wird in virtuellen, physischen oder aber gekoppelten Prüfverfahren hinsichtlich der Funktionserfüllung bzw. der Qualität der Funktionserfüllung untersucht. Da die UUT nicht zwangsläufig das gesamte Produkt, sondern vielfach zunächst nur einzelne Komponenten oder Baugruppen umfasst, ist es auch üblich, Teilsystem-Spezifikationen zu formulieren.

²²¹ vgl. VDI-Richtlinie 2519, 2001

²²² vgl. Kruse 1996, S.113

²²³ vgl. Cross 2008, S.60f.

²²⁴ vgl. Albers & Düser 2010

In der Literatur wird die Formulierung von Zielen durch eine Vielzahl von Forderungen umschrieben. So sollen beispielsweise nach DORAN²²⁵ Ziele grundsätzlich „smart“, d.h. spezifisch, messbar, akzeptiert, realistisch und terminiert formuliert werden. EILETZ²²⁶ identifiziert im Rahmen einer umfassenden Literaturanalyse allgemeine Forderungen an die Zielformulierung, die mitunter jedoch im klaren Widerspruch zu einander stehen. Er beschreibt dies wie folgt:

- **operational** aber **lösungsneutral**: Ein zu starkes Beharren auf eindeutigen, messbaren, detaillierten Zielen kann zu einer starken Lösungsfixierung und damit zu einer unnötigen Einschränkung des kreativen Freiraums führen.
- **widerspruchsfrei, machbar** versus **anspruchsvoll**: Die Forderung nach konfliktfreien Zielen steht im Widerspruch zum Bestreben, Kompromisse zunächst zu vermeiden und eine gewisse Zielanspannung für die Suche nach innovativen Lösungen zu erhalten. Geht der Anspruchsgehalt andererseits zu weit, kann eine nicht erkennbare Erreichbarkeit eine demotivierende bis hin zu einer lähmenden Wirkung bei den für die Erreichung Zuständigen erzeugen.
- **vollständig, eindeutig** versus **rechtzeitig**: Die Forderung nach einem vollständigen, eindeutigen, redundanzfreien und gewichteten Zielsystem würde bedeuten, dass Ziele erst sehr spät festgelegt werden könnten. Ein durch zu späte Festlegung von Zielen verursachter Zeitverlust kann nur begrenzt durch überproportionalen finanziellen und kapazitiven Aufwand aufgeholt werden. Wohingegen eine zu frühe Festlegung der Ziele zu einer mangelnden Zielgenauigkeit und zu zwischenzeitlich notwendigen Zieländerungen aufgrund zwischen-zeitlich geänderter Rahmenbedingungen führen kann.

Nach EILETZ²²⁷ ist die Vorstellung, dass klare Ziele vorgegeben sind und während des kompletten Produktentwicklungsprozesses, unabhängig von den im Laufe des Projekts erlangten Erkenntnissen, konstant bleiben können, mit der Realität nicht übereinstimmend. Zu Beginn des Entwicklungsprozesses müssen Annahmen getroffen werden, die mit Unsicherheiten und Risiken verbunden sind. Der wachsende Einblick in die verfügbaren Lösungsalternativen, deren Kosten, neue oder fehlende Realisierungsmöglichkeiten und Konsequenzen, führen laufend zur Konkretisierung, können aber auch die Revision ursprünglicher Ziele erfordern. Demnach ist die Zielpräzisierung selbst, im Sinne einer iterativen Zielentwicklung, Inhalt des Produktentstehungsprozesses²²⁸.

²²⁵ vgl. Doran 1981

²²⁶ vgl. Eiletz 1999, S.24f.

²²⁷ vgl. Eiletz 1999, S.25

²²⁸ vgl. Hacker 2002, S.15

Des Weiteren ist der Zweck der Zielformulierung zu beachten. BADKE-SCHAUB und FRANKENBERGER²²⁹ untersuchten diesbezüglich in mehreren Fallstudien den Vorgang der Zielanalyse und Zielentscheidung, den sie auch als Zielelaboration bezeichnen. Sie identifizieren dabei drei **Reichweiten der Zielelaboration** (strategisch, taktisch und operativ), die sich hinsichtlich Inhalt, Planungshorizont und Auflösungsgrad stark unterscheiden (vgl. Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Reichweiten der Zielelaboration nach BADKE-SCHAUB und FRANKENBERGER²³⁰

	strategisch	taktisch	operativ
Fallbeispiel	Produktstrategie-sitzung	Lastenheftworkshop	Klärung einer Anforderung bzgl. einer Funktion
Inhalt	Abstimmung zw. Produktlinien (inhaltlich, zeitlich)	Funktionalität des Produktes	Klärung einzelner aktueller Anforderungen
Planung	Geplant, regelmäßige Termine	Geplant, einmaliger Termin	Ad hoc, geringe bis keine Planung
Auflösungsgrad	Eher grob: Konzentration auf Kunden- oder Zielgruppen	Mittel bis fein: Vereinbarung wesentlicher Anforderungen	Fein: Festlegung konkreter quantitativer Zielkriterien
Führung	Mehrere Hierarchieebenen	Wenig hierarchisch	Kaum hierarchisch, Entwickler und Gruppenleiter
Gruppenform	Heterogen, interdisziplinär, mehrere Ebenen	Eher homogene Großgruppe	Homogene Dyade

HABERFELLNER et al.²³¹ weisen darauf hin, dass die Zielformulierung dem Prinzip der eingeschränkten Objektivität unterliegt, d.h. dass Ziele sich immer aus einer Kombination von Fakten (objektiv) und deren Wertung (subjektiv) zusammensetzen.

In diesem Zusammenhang unterscheidet HACKER²³² grundlegend zwischen dem formulierten Arbeitsauftrag und dessen tatsächlicher psychischer Übernahme als Arbeitsaufgabe. Er legt dar, dass der Entwickler in Abhängigkeit von Wissensstand, Erfahrungen, Fähigkeiten, Einstellungen und Motivlagen einen Arbeitsauftrag individuell als Arbeitsaufgabe redefiniert. Diese **Redefinition** umfasst die Interpretation der Zielformulierung, so dass die individuell verstandene Zielsetzung von der ursprünglich beabsichtigten abweichen kann.

²²⁹ vgl. Badke-Schaub & Frankenberger 2004, S.77ff.

²³⁰ vgl. Badke-Schaub & Frankenberger 2004, S.81

²³¹ vgl. Habermellner, de Weck, Fricke & Vössner 2012, S.227

²³² vgl. Hacker 2005

2.7.3 Zielsysteme

ALBERS²³³ beschreibt, dass insbesondere bei der Entwicklung komplexer Produkte Ziele nicht unabhängig voneinander betrachtet werden dürfen. Es gilt dabei, sowohl die inhaltlichen Wechselwirkung von Zielen wie auch deren relative Wertigkeit zueinander zu berücksichtigen. Die Ziele einer Produktentstehung bilden somit eine systemische, sich dynamisch verändernde Struktur, die als Zielsystem bezeichnet wird. Das Zielsystem ist als informatorische Basis einer Entwicklung zu verstehen.

Der Begriff des Zielsystems wurde maßgeblich geprägt durch die frühen Arbeiten zur Systemtechnik von ZANGEMEISTER, ROPOHL und PATZAK²³⁴. Ein Zielsystem wird darin beschrieben als Zielhierarchie, die durch Ziel-Mittel-Relationen erweitert werden kann. Aktuelle Forschungsarbeiten betrachten ein Zielsystem dahingegen als vernetzte Struktur vielfältiger Abhängigkeiten. Ferner wird inzwischen berücksichtigt, dass nicht alle Ziele, sondern nur explizit vorliegende Ziele abgebildet und miteinander verknüpft werden können. Zudem hat der dynamische Charakter des Zielsystems zur Folge, dass dieses nur zu einem definierten Zeitpunkt gültig ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Zielsystem daher wie folgt definiert.

Definition 2-4: Zielsystem (engl.: system of objectives)

Ein Zielsystem beinhaltet alle expliziten Ziele eines zu entwickelnden Produktes, einschließlich derer Abhängigkeiten und Randbedingungen, innerhalb eines definierten Interessenbereichs (d.h. innerhalb eines System-of-Interest) zu einem bestimmten Zeitpunkt (vgl. Bild 2-35).

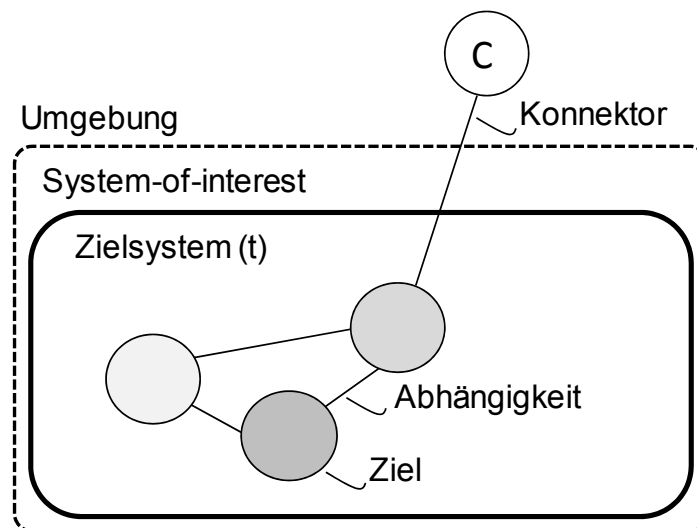


Bild 2-35: Charakteristik eines Zielsystems nach ALBERS et al.²³⁵

²³³ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

²³⁴ vgl. Zangemeister 1973, S.102; Ropohl 1975, S.60; Patzak 1982, S.169

²³⁵ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

Definition 2-5: Initiales Zielsystem (engl.: initial system of objectives)

Ein initiales Zielsystem beinhaltet die ersten grundlegenden Ziele. Es wird zu Beginn des Produktentstehungsprozesses in der Aktivität Projektierung erstellt. Das initiale Zielsystem entspricht meist dem Lasten-/Pflichtenheft bzw. der Produktspezifikation.

Das initiale Zielsystem wird von OERDING²³⁶ umschrieben als eine Grundkonfiguration von vagen Zielen, deren kontinuierliche Spezifikation Kernbestandteil jeder Produktentstehung ist. Zu Beginn einer Produktentstehung liegen zielrelevante Informationen zumeist ungeordnet vor oder fehlen vollständig. OERDING²³⁷ versteht Produktentstehung daher auch als das Sammeln, Zusammenführen und Interpretieren von Informationen; erst auf diese Weise entsteht Wissen, das allerdings wiederum nur begrenzt externalisiert und formalisiert werden kann.

Von zentraler Bedeutung bei der Zielsystementwicklung ist daher nicht nur die Aktivität der Projektierung, sondern insbesondere auch die Aktivität der Validierung, in welcher durch ein schrittweises, iteratives Vorgehen Erkenntnis gewonnen wird und so im Produktentstehungsprozess getroffene Annahmen bestätigt oder widerlegt werden können (vgl. Bild 2-36).

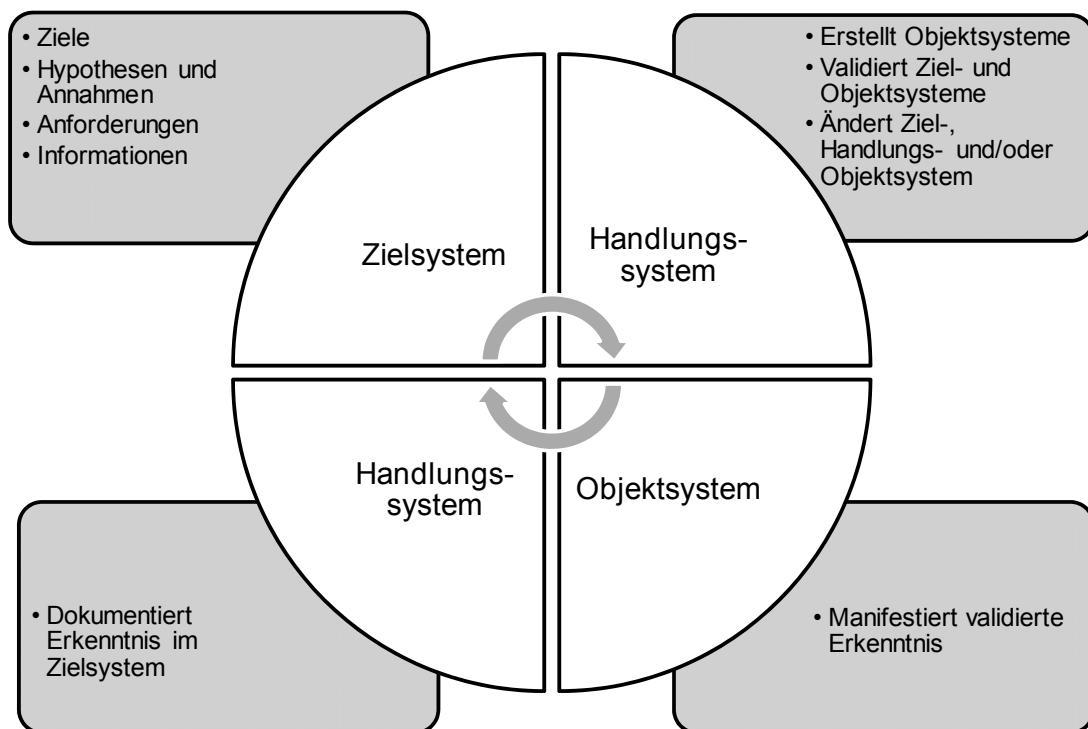


Bild 2-36: Erkenntnisgewinn durch Validierung nach OERDING²³⁸

²³⁶ vgl. Oerding 2009, S.133

²³⁷ vgl. Oerding 2009, S.77

²³⁸ vgl. Oerding 2009, S.107

2.7.4 Zielsystementwicklung

MUSCHIK²³⁹ untersucht im Rahmen einer umfassenden empirischen Studie die Entwicklung von Zielsystemen bei einem großen deutschen Automobilhersteller. Sie beschreibt, dass bei der Entstehung von Fahrzeugen unterschiedliche Fachabteilungen unterschiedliche Zielgrößen verantworten, wobei es zumeist eine zentrale, koordinierende Abteilung gibt. Grundlage für die Herleitung der jeweiligen Zielwerte sind der Neuheitsgrad des zu entwickelnden Produktes sowie Informationen und Wissen aus Vorgängerprojekten, wobei Menge und Inhalt von Informationen bzw. Wissen projektspezifisch variieren. Aus Sicht von langjährigen Mitarbeitern des Unternehmens hat die Prozesskomplexität durch die gestiegene Produktkomplexität so stark zugenommen, dass bei der Bildung von Zielen und Zielsystemen heutzutage ein entsprechend gewachsener Bedarf an Entscheidungen besteht.

Laut MUSCHIK²⁴⁰ werden diese **Entscheidungen** auf verschiedenen Hierarchieebenen gefällt, begonnen mit dem individuellen Mitarbeiter über die Fachabteilungen bis hin zu Gremiensitzungen mit Beteiligung der Vorstandsebene. Die entsprechende Ebene ergibt sich aus den Ergebnissen von Abstimmungen auf niedrigerer Ebene bzw. aus der Tragweite der Entscheidung für das Gesamtprodukt. MUSCHIK merkt hier an, dass abteilungsübergreifende Entscheidungen zu höherer Widersprüchlichkeit führen können. Problematisch bei Entscheidungen sind die hochgradige Vernetzung der Ziele im Zielsystem sowie die fehlende Transparenz zu den Gründen einzelner Ziele. Darüber hinaus wird die unsicherheitsbedingte dynamische Veränderung von Informationen bzw. Zielen im Zielsystem als weitere zentrale Schwierigkeit betrachtet. Obwohl der Zielbildungsprozess von den Entwicklern mitunter als undurchsichtig empfunden wird, werden zusätzliche Standardisierungsmaßnahmen als nur bedingt sinnvoll erachtet, da wechselnde Rahmenbedingungen und häufig unscharf vorliegende Informationen durch individuelle Vorgehensweisen und den Einsatz von Vorwissen kompensiert werden.

MUSCHIK beschreibt ferner, dass zur Sammlung von Informationen externe Quellen (u.a. Fachliteratur, Veröffentlichungen, Internet, externe persönliche Kontakte) und interne Dokumente (u.a. Datenbanken bzw. ebenfalls persönliche Kontakte) genutzt werden. Dabei werden für die Zielsystementwicklung Informationen aus dem Umfeld (Technologieentwicklung, Wettbewerbsanalyse und -prognose, Gesetze) sowie Informationen aus dem Unternehmen (aktuelle Zielwerte, Technologien, Ziel-/Serienwerte des Vorgängers, Kosten-/ Zeitplanung) benötigt.

²³⁹ vgl. Muschik 2011, S.85ff.

²⁴⁰ vgl. Muschik 2011, S.99ff.

Im Rahmen der Studie wurden insgesamt siebzehn Entwickler verschiedener Hierarchiestufen aufgefordert den Zustand der vorliegenden Informationen, d.h. deren **Messbarkeit** (qualitativ/quantitativ) sowie deren **Belastbarkeit** (unsicher/belastbar), in Abhängigkeit von der Zeit zu skizzieren (vgl. Bild 2-37).

Alle Entwickler beschreiben, dass zunächst vorrangig qualitative Informationen gesammelt werden, die dann hinsichtlich ihrer Abhängigkeiten und Randbedingungen analysiert und erst in diesem Prozess gegebenenfalls quantifizierbar werden. Analog dazu nimmt die Belastbarkeit der Informationen kontinuierlich zu, da im Prozess schrittweise Wissen und Verständnis um das Zielsystem aufgebaut werden. Der von Entwickler B skizzierte sinusförmige Verlauf der Belastbarkeit wird durch im Prozess neu getroffene Entscheidungen begründet, welche die erneute Überprüfung der Informationen hinsichtlich ihrer Belastbarkeit erfordert.

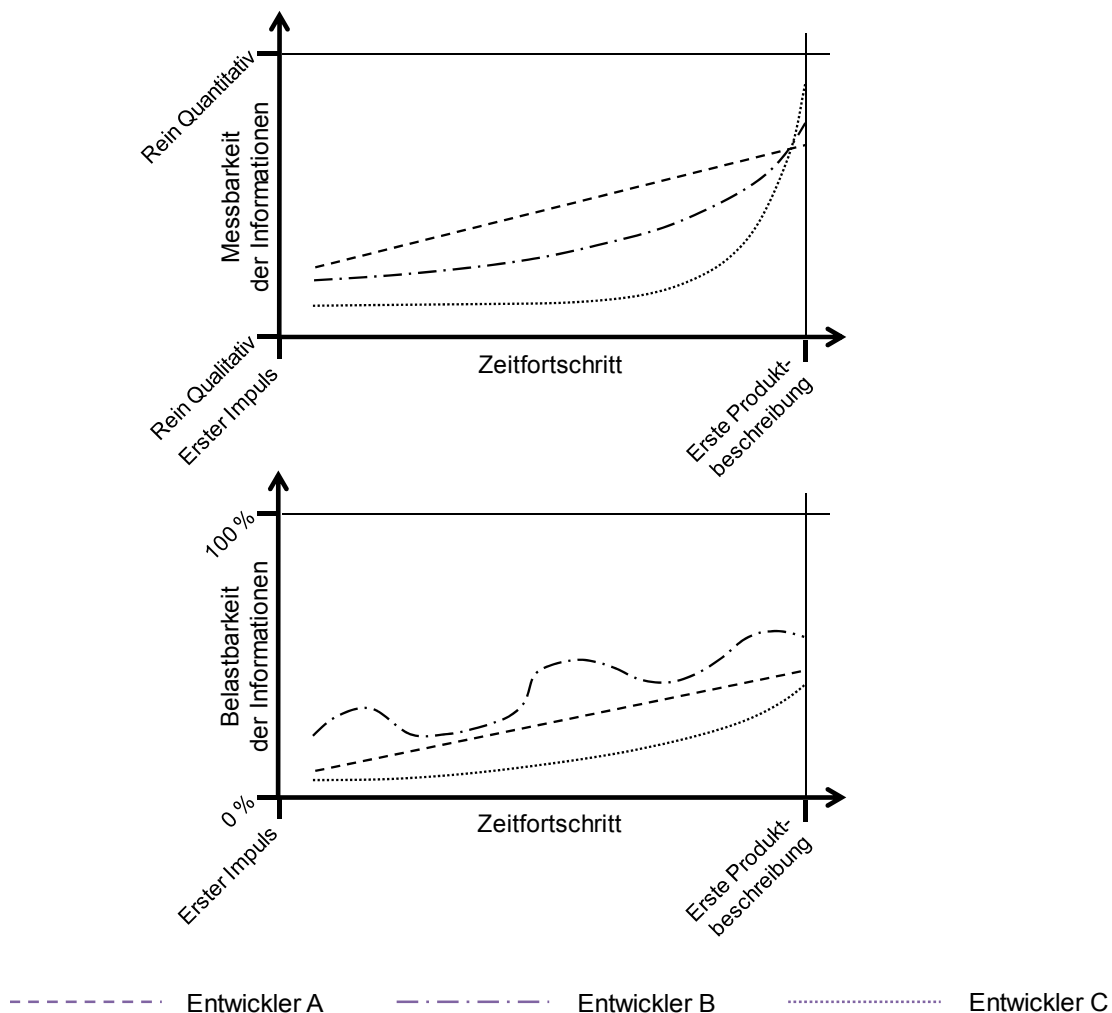


Bild 2-37: Beurteilung der Informationsqualität bei der Zielsystembildung²⁴¹

²⁴¹ vgl. Muschik 2011, S.102

Auf Basis der gesammelten Untersuchungsergebnisse leiten ALBERS et al.²⁴² den folgenden Handlungsbedarf für eine verbesserte Unterstützung der Zielsystementwicklung ab:

- In Entscheidungssituationen sollte die Zielhierarchie inkl. Vernetzungen und die relevante Informationsbasis in angemessener Detailtiefe transparent dargestellt werden sowie Unsicherheiten explizit bewertet und ausgewiesen werden.
- Vorwissen muss als wesentlicher Bestandteil der Entscheidungsfindung wahrgenommen werden und kann nicht vollständig durch Systematik und Standardisierung ersetzt werden. Mit steigender Hierarchieebene ist das Vorwissen des Entscheiders zunehmend zur Kompensation von Unsicherheit bzw. fehlendem Detailwissen in der Entscheidungssituation geeignet. Wissen und Informationen aus Vorgängerprojekten sollte verfügbar gemacht werden.
- Eine ausgewogene Vorgehensweise der Mitarbeiter zwischen Systematik und Vorwissen sollte unterstützt werden. Die einzelnen Arbeitsschritte der Mitarbeiter sollten nur soweit standardisiert werden, dass Unsicherheit und Änderungen in Projektanforderungen flexibel durch Vorwissen kompensiert werden können. Zeitpunkte zum Ergebnisabgleich und deren Form sollten festgelegt werden, um eine Abstimmung zu ermöglichen und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen.
- Eine durchgängige Transparenz und Verfügbarkeit von Informationen sollte angestrebt werden. Dabei sollte die Informations- und Wissensverarbeitung durch die Einführung von Methoden und Werkzeugen unterstützt werden, die sich flexibel an sich dynamisch ändernde Rahmenbedingungen anpassen können und die Möglichkeit bieten, unterschiedliche Zustände von Informationen und Vernetzungen (unterschiedliche Belastbarkeits-/Messbarkeitsgrade) flexibel zuzuordnen.

ALBERS et al. adressieren mit diesen Forderungen insbesondere menschenzentrierte Aspekte der Zielsystementwicklung. Entwickler in der Industrie denken, entscheiden und handeln tagtäglich auf Basis unsicherheitsbehafteter Information. Im Umgang mit dieser Unsicherheit kommen sowohl das individuelle Vorwissen, als auch die systematische Gewinnung relevanten Wissens zum Einsatz. Ferner sollte die durchgängige Abbildung von Zielabhängigkeiten zwar rechnerbasiert erfolgen, die Bereitstellung muss dabei aber auf die vielfältigen Situationen und Sichtweisen der Entwickler abgestimmt sein, um in der Industrie akzeptiert zu werden.

²⁴² vgl. Albers, Muschik & Ebel 2010

2.7.5 Zwischenfazit

Ziele sind, im Gegensatz zu Anforderungen, nicht von außen definierte Vorgaben. Ziele werden vielmehr im Ergebnis der aktiven geistigen Auseinandersetzung des Menschen mit äußeren Handlungsbedingungen gebildet. Dabei ist grundlegend zu unterscheiden zwischen der explizit formulierten Zielsetzung und deren tatsächlicher psychischer Übernahme. Der Entwickler nimmt in Abhängigkeit von seinem Wissensstand, seinen Erfahrungen, Fähigkeiten, Einstellungen und Motiven eine explizite Zielsetzung subjektiv wahr und redefiniert diese individuell. In der Folge besteht die Möglichkeit, dass die individuell verstandene Zielsetzung in einem geringen oder aber hohen Maße von der ursprünglich beabsichtigten abweicht.

Die Ziele einer Produktentstehung bilden eine systemische, sich dynamisch verändernden Struktur, die als Zielsystem bezeichnet wird. Ein Zielsystem beinhaltet dabei alle expliziten Ziele, einschließlich deren Abhängigkeiten und Randbedingungen, innerhalb eines definierten Interessensbereichs zu einem bestimmten Zeitpunkt. Ein Zielsystem ist als informatorische Basis einer Entwicklung zu verstehen. Von zentraler Bedeutung bei der Zielsystementwicklung ist daher nicht nur die Aktivität der Projektierung, sondern insbesondere auch die Aktivität der Validierung, in welcher durch ein schrittweises, iteratives Vorgehen Erkenntnis gewonnen wird und so im Produktentstehungsprozess getroffene Annahmen bestätigt oder widerlegt werden können.

Es ist zu erkennen, dass sowohl die Synthese als auch die Analyse eines Zielsystems stark durch den entwickelnden Menschen und seinen individuellen Umgang mit Unsicherheit geprägt ist. Eine zentrale Herausforderung besteht hier in der Kommunikation von Zielen, d.h. dem Prozess, in welchem ein gemeinsames Problemverständnis erarbeitet wird und so eine geteilte Zielvorstellung entstehen kann.

Die Synthese des Zielsystems stellt einen Abstimmungs- und Einigungsprozess dar, in welchem auf Basis eines unsicherheitsbehafteten Wissensstandes entschieden wird, welche Ziele in welcher Form zu definieren sind. Dieser Prozess ist somit durch das individuelle Problemverständnis und daraus abgeleitete Annahmen bestimmt, die sich möglicherweise als falsch herausstellen. In interdisziplinären Entwicklungsprojekten besteht zudem das Problem, dass relevantes Wissen auf verschiedene Personen verteilt ist und dass unterschiedliche Terminologien die Verständigung und somit auch die Einigung erschweren. Bei der Analyse des Zielsystems werden die Ziele und ihre Abhängigkeiten auf Basis von individuellem Vorwissen interpretiert. Dieser Prozess wird dabei erschwert durch die hochgradige Vernetzung der Ziele sowie die oftmals fehlende Transparenz zu den Gründen einzelner Ziele.

3 Zielsetzung der Arbeit

3.1 Berücksichtigung individueller Denk- und Handlungsabläufe

Eine menschenzentrierte Konstruktions- und Entwicklungsmethodik benötigt Modelle, die den denkenden und handelnden Mensch tatsächlich als zentrales Element des Systems der Produktentstehung abbilden. Dabei gilt es zum einen das Vorwissen und die Erfahrungen des Entwicklers zu berücksichtigen. Zum anderen sind auch weitere personenspezifische Aspekte, wie z.B. ein subjektives Problem- und Aufgabenverständnis oder ein individuelles Vorstellungsvermögen beim Vorausdenken neuer Lösungen mit in die Betrachtung einzubeziehen. Durch die Berücksichtigung der individuellen Denk- und Handlungsabläufe des Entwicklers kann Produktentstehung als sozio-technisches System abgebildet werden, das die technischen und wirtschaftlichen Aspekte des Produktes mit den individuellen Wissens-elementen und Vorstellungen des Entwicklers verknüpft.

Nicht nur die Entwicklung des Produktes und seiner Komponenten, sondern auch der Umgang mit Entwicklungszielen ist stark geprägt von individuellen Denk- und Handlungsabläufen. Ein Ziel, im Verständnis einer bewussten gedanklichen Vorwegnahme eines zukünftigen Soll-Zustands, entsteht zunächst gedanklich und kann erst durch eine Handlung explizit werden. Explizierte Ziele werden durch den Entwickler wieder individuell aufgenommen und beeinflussen so sein weiteres Denken und Handeln. Dabei sind stark verkürzte Darstellungen von Zielen, wie z.B. Anforderungslisten, zwar einfach zu handhaben, genügen jedoch nicht mehr, um den Ansprüchen komplexer und unsicherheitsbehafteter Produktentstehungsprozesse gerecht zu werden. Es gilt daher zu klären, wie sich Ziele entlang dieser Prozesse weiterentwickeln und zu welchem Zweck diese expliziert werden.

Das ZHO-Modell stellt hier einen Ansatz dar, der nicht nur die dynamische Entwicklung von Zielen berücksichtigt. Das Modell stellt zudem das Handlungssystem, also das denkende und handelnde System, in den Mittelpunkt seiner Betrachtung (Prinzip der indirekten Wechselwirkung). Das ZHO-Modell bietet somit eine geeignete Basis für ein menschenzentriertes Modell.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung eines Modells, das den Menschen einschließlich seines Wissen und seines Vorstellungsvermögens als Zentrum des Produktentstehungsprozesses versteht und so individuelle Denk- und Handlungsvorgänge bei der Entwicklung von Zielen und Objekten abbilden kann.

3.2 Berücksichtigung epistemischer Unsicherheit

Die Diversität und Dynamik heutiger Produktentstehungsprozesse führt zu Unsicherheit, d.h. zu Wissens- und Definitionslücken, in der Entwicklung. Durch die Berücksichtigung von Unsicherheit in Produktentstehungsprozessen erklärt sich, weshalb die Aufgaben- und Problemstellung nicht bereits zu Beginn einer Entwicklung vollständig definiert werden kann. Ziele können zunächst nur so genau und nur so vollständig beschrieben werden, wie es der aktuelle Wissensstand zulässt. Erst mit dem kontinuierlichen Zugewinn an fallspezifischem Wissen können diese Ziele verfeinert und durch Hinzunahme weiterer Ziele ergänzt werden. Folglich ist die Veränderung von Zielen entlang des Prozesses nicht als Ausnahme, sondern als Regelfall zu betrachten.

Epistemische Unsicherheit bezeichnet den Anteil der Unsicherheit, welcher sich durch Wissensgewinn verringern lässt. Fallspezifisches Wissen wird dabei durch Validierung gewonnen, d.h. um Wissenslücken und daraus folgend auch Definitionslücken, schließen zu können, müssen zunächst virtuelle und physische Modelle möglicher Lösungen entwickelt und dann in Validierungsaktivitäten geprüft werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse erlauben nicht nur Rückschlüsse auf die Eignung der jeweiligen Lösung, sondern ergänzen auch das Wissen um das bestehende Problem. Folglich geht das Verständnis des Problems mit dem Verständnis der Lösung einher.

Das ZHO-Modell stellt hier einen Ansatz dar, der die wechselseitige Abhängigkeit von Problem und Lösung durch die Verknüpfung von Zielsystem und Objektsystem abbildet. Erst durch die gleichwertige Kopplung der beiden Systeme kann ein Produkt zielgerichtet entwickelt werden (Prinzip der doppelten Kontingenz). Dabei können Ziele zunächst vage formuliert und dann entlang des Produktentstehungsprozesses detailliert und spezifiziert werden. Das ZHO-Modell bietet somit eine geeignete Basis für ein Modell, das die epistemische Unsicherheit in der Entwicklung berücksichtigt.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung eines Modells, das die Unsicherheit, d.h. die Wissens- und Definitionslücken, in Produktentstehungsprozessen berücksichtigt. Das Modell soll einerseits den Wissensgewinn durch Validierungsaktivitäten (Schließen von Wissenslücken), andererseits aber auch die Konkretisierung des Zielsystems (Schließen von Definitionslücken) darstellen und so die kontinuierliche Verringerung der Unsicherheit in der Entwicklung abbilden.

3.3 Berücksichtigung iterativer Entwicklungsprozesse

Eine häufig genannte Kritik im Zusammenhang mit entwicklungsmethodischen Vorgehens- und Prozessmodellen besteht darin, dass der Verlauf von Produktentstehungsprozessen zumeist als linear-sequentiell abgebildet wird, obwohl der reale Prozess in höchstem Maße iterativ verläuft. Eine Iteration tritt dabei nicht als Rücksprung in eine vorhergehende Phase auf, sondern vielmehr als ein Fortschritt im Wissen um Problem und Lösung. Iterationen sind somit notwendige Bestandteile von Produktentstehungsprozessen, die durchaus von entscheidendem Wert für die jeweilige Entwicklung sind und daher nicht unüberlegt als kosten- und zeitaufwendige Wiederholungen abgetan werden dürfen.

Auch in Bezug auf die Handhabung von Zielen und Anforderungen sprechen sich die aktuellen wissenschaftlich Arbeiten vermehrt für eine iterative Aufgabenklärung aus, die fortlaufend und in Abhängigkeit der zunehmenden Konkretisierung der Lösung erfolgt. In Abhängigkeit von neu gewonnenem Wissen können ausstehende Entscheidungen getroffen und so bestehende Ziele präzisiert sowie zusätzliche Ziele definiert werden. Die Zielpräzisierung wird somit, im Sinne einer iterativen Zielentwicklung, selbst Inhalt des Produktentstehungsprozesses.

Das ZHO-Modell stellt hier einen Ansatz dar, der bereits in seinen Ursprüngen als iterativer Regelkreis dargestellt ist. Dabei gleicht das Handlungssystem Ziel- und Objektsystem miteinander ab und setzt für den Fall, dass eine Abweichung vorliegt, die Entwicklung des Ziel- oder Objektsystems weiter fort. Das ZHO-Modell stellt den Produktentstehungsprozess somit als iterativen Verlauf von Analyse (Abgleich von Ziel- und Objektsystem) und Synthese (Entwicklung von Ziel- oder Objektsystem) dar. Die genauen Wechselwirkungen zum Handlungssystem sind bislang jedoch nicht explizit beschrieben. So bleibt beispielsweise unklar, in welchem Fall zunächst das Zielsystem und in welchem Fall doch zuerst das Objektsystem weiterzuentwickeln ist. Nichtsdestotrotz bietet das ZHO-Modell somit eine geeignete Basis für ein Modell, das den iterativen Prozessverlauf in der Produktentstehung berücksichtigt.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung eines Modells, das den iterativen Verlauf des Produktentstehungsprozesses abbildet. Iterationen sollen dabei nicht als vermeidbare Ausnahmen, sondern als für den kontinuierlichen Wissensgewinn notwendige Prozessfortschritte dargestellt werden. Durch das Modell sollen zudem die iterative Weiterentwicklung von Ziel- und Objektsystem ebenso wie der Abgleich der beiden Systeme durch das Handlungssystem beschrieben werden.

4 Forschungsdesign

4.1 Forschungshypothesen

Die Basis des Forschungsdesigns wird durch die in diesem Kapitel definierten Forschungshypothesen gebildet. Die Hypothesen stellen dabei zentrale Annahmen dar, auf welchen die folgenden Untersuchungen aufbauen. Ziel dieser Arbeit ist dabei nicht, die aufgeführten Hypothesen zu bestätigen oder zu widerlegen. Vielmehr soll durch die Forschungshypothesen dargelegt werden, unter welchen Voraussetzungen die im Folgenden aufgestellten Forschungsfragen untersucht werden sollen.

Die erste, zweite und dritte Forschungshypothese stimmen mit den in Kapitel 2.4 beschriebenen zentralen Hypothesen nach ALBERS überein.

Forschungshypothese 1:

Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell.

Forschungshypothese 2:

Auf den Grundlagen der Systemtheorie lässt sich eine Produktentstehung als die Überführung eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem beschreiben.

Forschungshypothese 3:

Die Validierung ist die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess.

Diese Hypothesen werden entsprechend der in Kapitel 3 ausgeführten Zielsetzung der Arbeit um drei weitere Forschungshypothesen ergänzt.

Forschungshypothese 4:

Der denkende und handelnde Mensch ist das zentrale Element des Systems der Produktentstehung.

Forschungshypothese 5:

Der stetige Zugewinn von fallspezifischem Wissen führt zu einer kontinuierlichen Verringerung von Unsicherheit.

Forschungshypothese 6:

Unsicherheitsbehaftete Produktentstehungsprozesse beinhalten notwendigerweise Iterationen.

4.2 Forschungsfragen

Ein weiteres Element des Forschungsdesigns besteht in der Definition der im Rahmen dieser Arbeit zu behandelnden Forschungsfragen. Die ersten drei Forschungsfragen leiten sich dabei aus der zuvor beschriebenen Zielsetzung der Arbeit ab. Es sollen hier zunächst bestehende Ansätze untersucht werden, wobei insbesondere die jeweiligen Aspekte zum Umgang mit Zielen zu betrachten sind.

Forschungsfrage 1:

Welche wissenschaftlichen Ansätze bestehen zur Erklärung individueller Denk- und Handlungsabläufe? Welche Rückschlüsse erlauben diese Ansätze auf die Synthese und Analyse von Zielsystemen?

Forschungsfrage 2:

Welche wissenschaftlichen Ansätze bestehen zur Erklärung der kontinuierlichen Verringerung von Unsicherheit? Welche Rückschlüsse erlauben diese Ansätze auf die Synthese und Analyse von Zielsystemen?

Forschungsfrage 3:

Welche wissenschaftlichen Ansätze bestehen zur Erklärung des iterativen Verlaufs von Produktentstehungsprozessen? Welche Rückschlüsse erlauben diese Ansätze auf die Synthese und Analyse von Zielsystemen?

Aufbauend auf den Erkenntnissen, die bei der Untersuchung der ersten drei Forschungsfragen gewonnen werden, soll (auch unter Verwendung des Stands der Forschung sowie der Forschungshypothesen) ein Modell entwickelt werden, das die Faktoren Mensch, Wissen und Prozess entsprechend der Zielsetzung berücksichtigt. Das Modell selbst gilt es in einem weiteren Untersuchungsschritt zu prüfen und zu bewerten. Es ergeben sich somit zwei weitere Forschungsfragen, die im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden sollen.

Forschungsfrage 4:

Wie gestaltet sich ein menschenzentriertes Modell, das die kontinuierliche Verringerung von Unsicherheit als iterativen Prozess abbildet? Können die zuvor gewonnenen Erkenntnisse zur Synthese und Analyse von Zielsystemen bestätigt werden?

Forschungsfrage 5:

Kann der Zweck des entwickelten Modells anhand realer Entwicklungsprojekte bestätigt werden? Welche Verbesserungen und Verfeinerungen des Modells sind notwendig, um den Zweck des Modells bestätigen zu können?

4.3 Forschungsvorgehen

Das in dieser Arbeit durchgeführte Forschungsvorgehen gliedert sich in vier aufeinander aufbauende Untersuchungsschritte (vgl. Bild 4-1). Die Struktur orientiert sich dabei an dem von BLESSING und CHAKRABARTI²⁴³ vorgeschlagen Rahmenwerk der Design Research Methodology (DRM), in welchem zunächst (1) die Zielsetzung der Forschungsarbeit spezifiziert, dann (2) ein vertieftes Verständnis des betrachteten Untersuchungsbereichs aufgebaut, folgend (3) der eigene Ansatz zur Unterstützung der Produktentstehung erarbeitet und schließlich (4) der entwickelte Ansatz umgesetzt und bewertet wird. Im Folgenden werden die vier Untersuchungsschritte kurz erläutert und die darin angewendeten Forschungsmethoden vorgestellt.

In der **Vorstudie** wird der grundlegende Stand der Forschung gesichtet und aufbereitet. Die Vorstudie bildet die Basis der nachfolgenden Untersuchungsschritte, d.h. die dort behandelten Inhalte dienen der Ausrichtung und Bewertung der weiteren Forschungsarbeit. Als Forschungsmethode wird hier die Literaturrecherche verwendet. Ein wesentliches Ergebnis der Vorstudie besteht darin, die vorliegende Ausgangssituation darzulegen, entsprechenden Handlungsbedarf aufzuzeigen und daraus die Forschungsziele der Arbeit abzuleiten. Die Inhalte und Ergebnisse der Vorstudie wurde bereits in Kapitel 2 und Kapitel 3 vorgestellt.

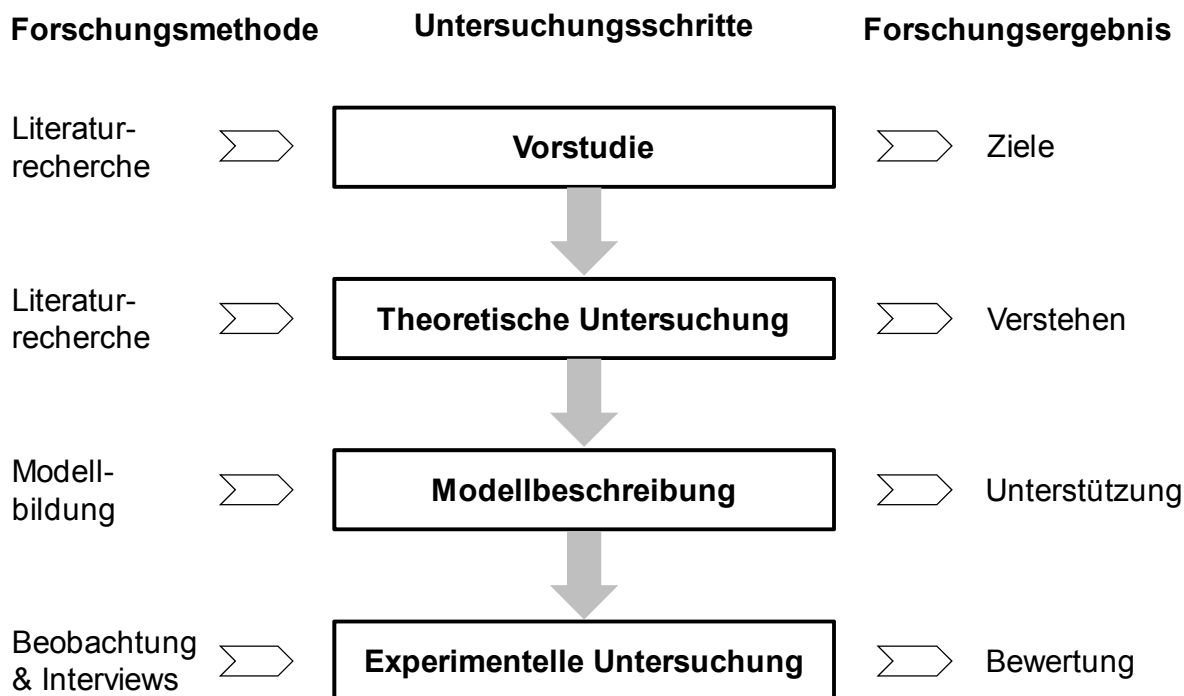


Bild 4-1: Untersuchungsschritte und verwendete Forschungsmethoden in dieser Arbeit

²⁴³ vgl. Blessing & Chakrabarti 2009, S.15

Die **theoretische Untersuchung** umfasst eine vertiefte Literaturrecherche zu den in der Vorstudie identifizierten Handlungsfeldern, die von BLESSING und CHAKRABARTI²⁴⁴ auch als „Areas of Relevance and Contribution“ bezeichnet werden. Während die vorangegangene Literaturrecherche zum Zweck einer Situationsanalyse und Problemeingrenzung durchgeführt wurde, werden nun bestehende Lösungsansätze untersucht und miteinander verglichen. Von besonderer Bedeutung ist hier die Untersuchung inhaltlicher Überschneidungen der verschiedenen Ansätze, um so ein Gesamtbild des betrachteten Forschungsbereichs entwickeln zu können.

Die Literaturrecherche beinhaltet neben Planung, Durchführung und Aufbereitung zudem den Schritt der Auswertung, der auch in der theoretischen Untersuchung in Form eines Zwischenfazits ausgeführt wird. Dem Zwischenfazit kommt hier die Aufgabe zu, die neu gewonnenen Erkenntnisse zusammenzufassen und in den Kontext der Arbeit einzuordnen. Das wesentliche Ziel der theoretischen Untersuchung ist es, ein ganzheitliches Verständnis des betrachteten Bereichs aufzubauen und so den folgenden Schritt der Modellentwicklung vorzubereiten. Die theoretische Untersuchung dient der Beantwortung der Forschungsfragen 1, 2 und 3.

Die **Modellentwicklung** umfasst die wissenschaftliche Ausarbeitung eines eigenen Ansatzes. Entsprechend der allgemeinen Modelltheorie gilt es, bei der Modellbildung das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal des Modells zu berücksichtigen. Folglich ist bei der Beschreibung des Modells nicht nur zu erläutern, welchen Realitätsbereich das Modell und seine einzelnen Elemente repräsentieren. Es soll zudem auch bestimmt werden, welchen Zweck das Modell erfüllt und wer der Nutzer des Modells ist. Dies ist auch dazu notwendig, um das zentrale Ergebnis der Modellentwicklung herauszuarbeiten, welches darin besteht zu erklären, welche Form der Unterstützung das Modell in der Produktentstehung leistet und unter welchen Randbedingung diese Unterstützung erfolgen soll. Die Modellentwicklung dient der Beantwortung der Forschungsfrage 4.

Die **experimentelle Untersuchung** umfasst die Anwendung des Modells in realen Produktentstehungsprozessen sowie eine anschließende Bewertung und Reflexion. Zur Untersuchung von Entwicklungsprojekten in der Praxis nennt AHMED²⁴⁵ die in Tabelle 4-1 aufgeführten Forschungsmethoden. Um hier die drei Aspekte Mensch, Wissen und Prozess ausreichend berücksichtigen zu können, wird für die experimentelle Untersuchung eine Kombination aus teilnehmender Beobachtung und semi-strukturierter Interviews durchgeführt.

²⁴⁴ vgl. Blessing & Chakrabarti 2009, S.63ff.

²⁴⁵ vgl. Ahmed 2007

Eine **teilnehmende Beobachtung**²⁴⁶ beinhaltet, dass der Beobachter selbst Teil des zu beobachtenden Geschehens wird. Der entscheidende Vorteil dieser Forschungsmethode besteht darin, dass der Beobachter, sofern er als aktiver Bestandteil des Geschehens akzeptiert wird, Einblicke in die Entwicklung erhält, die ihm als Außenstehendem verschlossen bleiben würden. Es muss hier jedoch berücksichtigt werden, dass der Beobachter mit seiner Teilnahme am Geschehen dessen natürlichen Ablauf durch eigene Initiativen und Aktivitäten beeinflusst.

In **semi-strukturierten Interviews**²⁴⁷ werden spezifische Fragen vorbereitet, die dem Interviewten jedoch Raum für ausführliche Antworten bieten. Zudem dürfen auch Fragen gestellt werden, die zunächst nicht vorgesehen waren. Semi-strukturierte Interviews erlauben so einen Kompromiss einer gut vorbereiteten aber dennoch flexiblen Gesprächsführung. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber vollstrukturierten Interviews besteht darin, dass hier beidseitig Rückfragen möglich sind und so ein geringeres Risiko für das Auftreten von Missverständnissen besteht.

Das primäre Ergebnis der experimentellen Untersuchung besteht in der Bewertung des zuvor entwickelten Modells. Es soll dabei zum einen geprüft werden, ob die erwartete Unterstützung auch wirklich gegeben wird. Zum anderen soll in Erfahrung gebracht werden, wie das Modell verbessert bzw. verfeinert werden kann. Die theoretische Untersuchung dient der Beantwortung der Forschungsfrage 5.

Tabelle 4-1: Eignung von Forschungsmethoden in der Entwicklungspraxis nach AHMED²⁴⁸

Forschungs- methoden	Prozess	Umgebung	Produkt	Dokumentation	Beteiligte
Dokumenten- analyse	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein
Interview	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
Diskurs- analyse	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
Beobachtung	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
Teilnehmende Beobachtung	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
Protokoll- analyse	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja

²⁴⁶ vgl. Bortz & Döring 2006, S.267

²⁴⁷ vgl. Bortz & Döring 2006, S.238f.

²⁴⁸ vgl. Ahmed 2007

5 Theoretische Untersuchung

In diesem Kapitel wird eine Auswahl wissenschaftlicher Ansätze untersucht, die sich im Kontext der Produktentstehung mit den individuellen Denk- und Handlungsabläufen des Entwicklers (Faktor Mensch), dem Umgang mit epistemischer Unsicherheit (Faktor Wissen) und dem iterativen Verlauf von Entwicklungen (Faktor Prozess) befassen.

Zum Faktor Mensch werden der Ansatz der mentalen Modelle sowie die Theorie des reflexiven Handelns untersucht. Die grundlegende Idee **mentaler Modelle** besteht darin, dass der Mensch in seinem Kopf Modelle von Objekten oder Situationen der realen Welt aufbaut und mental weiterentwickelt. Diese Modelle erlauben es ihm, neue Informationen schnell aufzunehmen und erste Voraussagen mit geringem mentalem Aufwand zu treffen. Durch mentale Modelle ist es dem Menschen somit möglich, neuartige Situationen besser begründen, erklären und einschätzen zu können. Das **reflexive Handeln** beschreibt zudem, dass der Mensch seine Handlungen direkt im Handeln analysiert und bewertet. Das Ergebnis dieser kontinuierlichen Analyse und Bewertung führt dazu, dass der Mensch die Zielsetzung seines Handelns anpasst und somit sein weiteres Handeln reguliert.

Mit dem Faktor Wissen wird zum einen der Aufbau der Wissensbasis im Produktentstehungsprozess, zum anderen die Forschung zur co-evolutionären Entwicklung betrachtet. Die Untersuchung der **Wissensbasis** umfasst dabei insbesondere den prozessbegleitenden Zugewinn von fallspezifischem Wissen, durch welchen Wissenslücken geschlossen werden und so Unsicherheit kontinuierlich verringert werden kann. Der entwicklungswissenschaftliche Ansatz der Co-Evolution beinhaltet die in wechselseitiger Abhängigkeit ablaufende Definition und Exploration von **Problem- und Lösungsraum**. In diesem Zusammenhang wird auch die C-K-Theorie untersucht, welche Wissen und Konzepte co-evolutionär miteinander verknüpft.

Der Faktor Prozess umfasst die Untersuchung des Verständnisses von **Analyse und Synthese** im Kontext der Modellierung von Produktentstehungsprozessen. Den zentralen Betrachtungsgegenstand bilden hier die elementaren Prozessmodelle von PATZAK und LAWSON. Aufbauend darauf werden mit der TOTE-Einheit und dem PDCA-Zyklus grundlegende Ansätze zur Beschreibung von **Iterationen** in Produktentstehungsprozessen vorgestellt. Abschließend wird auch unter Betrachtung aktueller Modelle, wie dem „Unified Innovation Process Model“, erläutert, weshalb Iterationen nicht nur unvermeidbar, sondern mitunter auch von essentieller Notwendigkeit für die Reduzierung epistemischer Unsicherheit sind.

5.1 Faktor Mensch – Individuelle Denk- und Handlungsabläufe

5.1.1 Mentale Modelle

Der Ansatz mentaler Modelle basiert auf der Annahme, dass der Mensch mentale Kopien von Objekten oder Situationen der realen Welt in seinem Kopf erstellt und dort weiterentwickelt. Die wissenschaftlichen Ursprünge des Ansatzes werden dem Philosophen und Psychologen KENNETH CRAIK²⁴⁹ zugesprochen. Seiner Ansicht nach erschafft der menschliche Verstand „kleinskalige Modelle“ der äußeren Realität, durch welche es möglich ist, eigene Handlungsalternativen vor auszudenken, um unter Verwendung von Erfahrungswissen auf das bestgeeignete Vorgehen in einer gegenwärtigen oder zukünftigen Situation schließen zu können.

Der Begriff **Mentales Modell** wurde aufbauend auf dem Ansatz von CRAIK durch den Kognitionswissenschaftler JOHNSON-LAIRD geprägt. Mentale Modelle bezeichnen hier komplexe Gedächtnisrepräsentationen, deren Struktur der korrespondierenden Situation in der realen Welt – so wie sie wahrgenommen oder begriffen wird – entspricht²⁵⁰. Dabei versteht JOHNSON-LAIRD²⁵¹ mentale Modelle insbesondere als dynamische Repräsentationen. Seine Untersuchungen zeigen, dass mentale Modelle niemals fertiggestellt sind, sondern kontinuierlich erweitert und verfeinert werden.

Nach HACKER²⁵² ist die inhaltliche Struktur mentaler Modelle (im Sinne von operativen Abbildsystemen) nur im Zusammenhang mit den Sachverhalten beschreibbar, welche sie abbilden. Mentale Modelle von Arbeitsaufgaben umfassen also Repräsentationen von Zielen, Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele sowie Ausführungsbedingungen dieser Maßnahmen. Mentale Modelle sind dynamisch, d.h. die Inhalte mentaler Modelle können sich in Abhängigkeit von Lernerfahrungen verändern. Da sie jedoch Referenzpunkte für das menschliche Handeln darstellen, sollten sie zumindest zeitweise invariant sein²⁵³.

BADKE-SCHAUB et al.²⁵⁴ sehen die zentrale Idee mentaler Modelle darin begründet, dass Menschen interne Arbeitsmodelle der Welt konstruieren, die es ihnen erlauben, neue Informationen schnell aufzunehmen und erste Voraussagen mit minimalem mentalem Aufwand zu treffen. Mentale Modelle verhelfen dem Menschen somit dazu, neuartige Situationen besser begründen, erklären und einschätzen zu können. Für gewöhnlich verwenden Menschen mehrere mentale Modelle simultan.

²⁴⁹ vgl. Craik 1943, S.61

²⁵⁰ vgl. Johnson-Laid 1983, S.156

²⁵¹ vgl. Johnson-Laid 1983, S.179

²⁵² vgl. Hacker 2005, S.193f.

²⁵³ vgl. Müller 2007, S.52f.

²⁵⁴ vgl. Badke-Schaub, Neumann, Lauche & Mohammed 2007

Während sich die frühen Forschungsarbeiten zu mentalen Modellen auf die Untersuchung individueller mentaler Modelle begrenzten, wird der Ansatz heutzutage vermehrt dazu genutzt, Kommunikations- und Kooperationsstrukturen in Gruppen und Teams zu erklären. Dabei findet insbesondere die **Theorie der geteilten mentalen Modelle** Verwendung. Nach BADKE-SCHAUB et al.²⁵⁵ sind geteilte mentale Modelle (engl.: shared mental models) charakterisiert als Wissens- oder Glaubensstrukturen, die von den Mitgliedern eines Teams geteilt werden. Sie ermöglichen dabei den Teammitgliedern, Erklärungen und Erwartungen richtig zu formulieren und ihre Handlungen, einschließlich der Anpassung ihres Verhaltens, entsprechend ihrer Aufgabe und der anderen Teammitglieder zu koordinieren.

Bestätigt wird diese Ansicht durch die Ergebnisse einer aktuellen Untersuchung von JONES et al.²⁵⁶, in welcher der Zweck von mentalen Modellen durch die folgenden Punkte charakterisiert wird:

- Für das Erkennen von Gemeinsamkeiten und Unterschieden in den Ansichten mehrerer Interessensvertreter.
- Für die Integration unterschiedlicher Perspektiven und die Entwicklung eines übergeordneten Systemverständnisses.
- Für die Entstehung einer gemeinsamen Repräsentation eines Systems und somit für die Verbesserung von Entscheidungsprozessen.
- Für die Identifikation und die Überwindung von Wissensgrenzen und -hürden.
- Für die Entwicklung belastbaren Wissens und somit für die Unterstützung von Einigungsprozessen bei unstrukturierten Problemen und komplexen Systemen.

In der Gruppen- und Teamarbeit kommt es folglich zu einer Überlagerung von mentalen Modellen, d.h. zu einem Abgleich von individuellen Wahrnehmungen, Verständnissen und Vorhersagen bezüglich einer gemeinsamen bzw. geteilten Situation. Nach ALBERS et al.²⁵⁷ können dabei durch den interaktiven Austausch von individuellem Wissen geteilte mentale Modelle, im Sinne von gemeinsamen Begriffs- und Verständnismodellen, entwickelt werden. Geteilte mentale Modelle sollen jedoch nicht nur als die Überlagerung mehrerer Ebenen gemeinsamen Wissens oder die Summe mehrerer individueller mentaler Modelle verstanden werden, sondern als die synergetische, funktionale Bündelung der mentalen Leistungsfähigkeit eines Teams, repräsentiert durch Gleichheit, Überlappung und Ergänzung²⁵⁸.

²⁵⁵ vgl. Badke-Schaub, Neumann, Lauche & Mohammed 2007

²⁵⁶ vgl. Jones, Ross, Lynam, Perez & Leitch 2011

²⁵⁷ vgl. Albers, Turki & Lohmeyer 2012

²⁵⁸ vgl. Langan-Fox, Anglim & Wilson 2004

NEUMANN, BADKE-SCHAUB und LAUCHE²⁵⁹ unterscheiden in Anlehnung an einen Klassifizierungsansatz nach CANNON-BOWERS et al.²⁶⁰ daher auch zwischen vier Kategorien von geteilten mentalen Modellen (vgl. Bild 5-1). Um effektiv und effizient arbeiten zu können, muss ein Entwicklungsteam neben dem gemeinsamen Verständnis der Aufgabenstellung auch geteilte mentale Modelle zum Vorgehen im Problemlösungsprozess aufbauen und zudem um die Kompetenzen und Präferenzen der einzelnen Teammitglieder wissen.

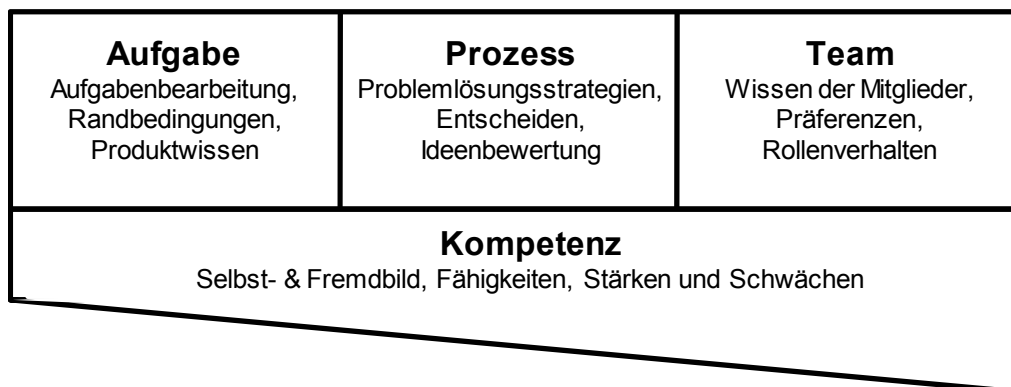


Bild 5-1: Kategorien geteilter mentaler Modelle nach NEUMANN, BADKE-SCHAUB & LAUCHE²⁶¹

Ausgehend von dieser Einteilung untersuchen BIERHALS, KOHLER & BADKE-SCHAUB²⁶² im Rahmen einer empirischen Studie den Einfluss und die Entwicklung von geteilten mentalen Modellen in multidisziplinären Projektteams. Als wesentliche Schlussfolgerungen der Untersuchung wird aufgezeigt, dass ein Handlungsbedarf insbesondere im Setzen prozessorientierter Ziele besteht. Des Weiteren wird empfohlen, die Mitglieder multidisziplinärer Teams für die unterschiedlichen disziplinspezifischen Perspektiven der anderen Teammitglieder zu sensibilisieren.

Im Zusammenhang mit geteilten mentalen Modellen gibt STEMPFLE²⁶³ darüber hinaus zu bedenken, dass mentale Modelle keine exakten Abbildungen des zu bearbeitenden Problems sind – in vielen Fällen resultiert aus der mangelnden Verfügbarkeit relevanter Informationen, aus Gründen einer begrenzten menschlichen Verarbeitungskapazität und aus Gründen unterschiedlicher motivationaler Relevanz verschiedener Inhalte ein eingeschränktes, partiell fehlerbehaftetes und damit ungenaues mentales Modell. Dass Gruppen nicht selten Fehler machen, kann in vielen Fällen aus defizitären mentalen Modellen der Gruppe heraus erklärt werden.

²⁵⁹ vgl. Neumann, Badke-Schaub & Lauche 2006

²⁶⁰ vgl. Cannon-Bowers, Salas & Coverse 1993

²⁶¹ vgl. Neumann, Badke-Schaub & Lauche 2006

²⁶² vgl. Bierhals, Kohler & Badke-Schaub 2007

²⁶³ vgl. Stempfle 2004

Auch BIRKHOFFER UND JÄNSCH²⁶⁴ verwenden mentale Modelle zur Erklärung der Interaktionen von Individuen in der Produktentwicklung. Sie gehen dabei davon aus, dass mentale Modelle Informationen über Objekte, Prozesse, Strategien oder Motivationen enthalten, die situativ zu strukturierten Mustern, Schemata, Konzepten oder Bildern zusammengesetzt werden. Im zwischenmenschlichen Interaktionsprozess werden dazu zunächst individuelle mentale Modelle auf Basis subjektiv wahrgenommener Information gebildet, die dann intersubjektiv miteinander verglichen und schließlich situationsspezifisch integriert, geändert, erweitert oder angepasst. Der Vergleich mentaler Modelle bedarf dabei der **externen Repräsentation** durch z.B. Sprache oder Zeichnungen (vgl. Bild 5-2).

Im Kontext der Produktentstehung werden zur externen Repräsentation auch verstärkt virtuelle und physische Modelle verwendet. Aufgrund der hohen Dynamik mentaler Modelle bieten sich hier externe Repräsentationen an, die besonders zeit- und kosteneffizient aufgebaut werden können und idealerweise mit der gedanklichen Flexibilität Schritt halten können. RÖMER et al.²⁶⁵ sprechen sich daher insbesondere für nicht-digitale Repräsentationen, wie z.B. Skizzen und einfache Holz-, Draht- oder Papiermodelle aus, um individuelles und gemeinsames Denken und Verstehen sowie die Bildung geteilter mentaler Modelle zu unterstützen.

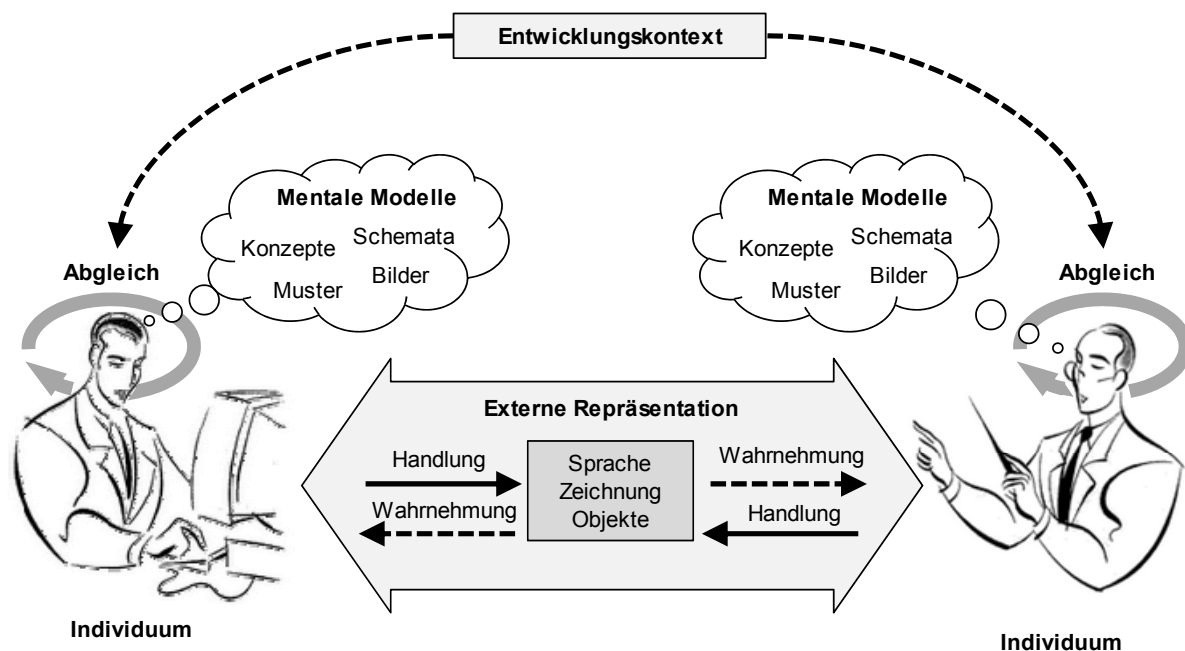


Bild 5-2: Interaktion durch externe Repräsentation nach BIRKHOFFER und JÄNSCH²⁶⁶

²⁶⁴ vgl. Birkhofer & Jänsch 2003

²⁶⁵ vgl. Römer, Pache, Weißhahn, Lindemann & Hacker 2001

²⁶⁶ vgl. Birkhofer & Jänsch 2003

Aber auch aufwendige externe Repräsentationen sind in der Produktentstehung von zentraler Bedeutung. STACEY und LAUCHE²⁶⁷ beschreiben hier insbesondere den Einsatz rechnergestützter Berechnungs- und Simulationsmodelle, um beispielsweise mechanische oder thermische Belastungen abschätzen zu können, oder auch die Verwendung von Rapid Prototyping, um die vorausgedachte Funktionalität an zum Teil seriennahen Elementen und Baugruppen überprüfen zu können.

SACHSE und LEINERT²⁶⁸ verstehen externe Repräsentationen generell als **materialisierte Form des geistigen Handels**, die den Menschen in den folgenden Formen unterstützen sollen:

- Analyse- und Bewertungshilfe (Prüfen mentaler Modelle)
- Lösungshilfe (Erzeugen neuer mentaler Modelle)
- Kommunikationshilfe (Austausch mentaler Modelle)

Darüber hinaus bieten externe Repräsentationen die Möglichkeit, das Arbeitsgedächtnis zu entlasten. Nach MILLER²⁶⁹ ist das Arbeitsgedächtnis auf etwa sieben gleichzeitig verfügbare Informationseinheiten, sogenannte Chunks, begrenzt. Durch externe Repräsentationen werden relevante Informationseinheiten ausgelagert und somit kognitive Kapazitäten zur weiteren Entwicklung mentaler Modelle freigegeben.

Trotz der Unterstützung durch externe Repräsentationen stellt der intersubjektive Austausch mentaler Modelle eine Herausforderung dar. ECKERT²⁷⁰ bezeichnet die eingeschränkten Möglichkeiten zur Kommunikation dieser Form von Wissen auch als den **Flaschenhals der Entwicklung**. Sie legt dar, dass die Beschreibung konkreter Produktkomponenten und -eigenschaften bereits schwer genug ist, wenn das gefertigte Produkt tatsächlich vorliegt. Bereits hier birgt Sprache grundsätzlich das Risiko von Mehrdeutigkeit und auch Skizzen sind aufgrund der verkürzten Darstellung immer unterschiedlich zu interpretieren. Ebenso wenig kann durch lange und detaillierte Erklärungen ein vollständig gemeinsames Verständnis entstehen. ECKERT²⁷¹ betont, dass es zwar möglich ist ein Bild entsprechend einer Beschreibung zu erkennen, es aber nicht möglich ist, ein Bild auf Basis einer Beschreibung exakt nachzuzeichnen. Doch eben dies ist Gegenstand der Produktentwicklung: das von einem Entwickler gebildete mentale Modell eines Produktes muss in ein reales Produkt überführt werden.

²⁶⁷ vgl. Stacey & Lauche 2005

²⁶⁸ vgl. Sachse & Leinert 2002

²⁶⁹ vgl. Miller 1956

²⁷⁰ vgl. Eckert 1997, S.60

²⁷¹ vgl. Eckert 1997, S.80

5.1.2 Reflexives Handeln

Die Theorie des reflexiven Handelns (engl. reflective practice) wurde durch den MIT-Professor DONALD A. SCHÖN²⁷² begründet und kontinuierlich fortentwickelt. Die Theorie gilt als wesentlicher Beitrag zur Forschung an komplexen Problemlösungsprozessen. Dort hat sie sich als menschenzentrierter Ansatz, der auch Erfahrung und Intuition berücksichtigt, konträr zu den auf Rationalität und Logik basierenden Problemlösungstheorien von HERBERT A. SIMON²⁷³ positioniert. Die beiden Ansätze beinhalten ein grundlegend unterschiedliches Verständnis von Produktentwicklung, weshalb sie auch, wie in Bild 5-3 dargestellt, als Paradigmen bezeichnet werden.

Die Kernidee des reflexiven Handelns besteht in der Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Entwickler die Beschreibung einer Entwicklungsaufgabe immer subjektiv und im Kontext der aktuellen Situation interpretiert. Ausgehend davon entscheidet er, welche weitere Aktivität durchzuführen ist. Das Ergebnis dieser Aktivität wird erneut interpretiert und bestimmt so die Auswahl der nächsten Aktivität. Diese kontinuierliche Reflexion im Handeln, die von SCHÖN²⁷⁴ auch als **reflection-in-action** bezeichnet wird, bestimmt das Voranschreiten im Produktentstehungsprozess.

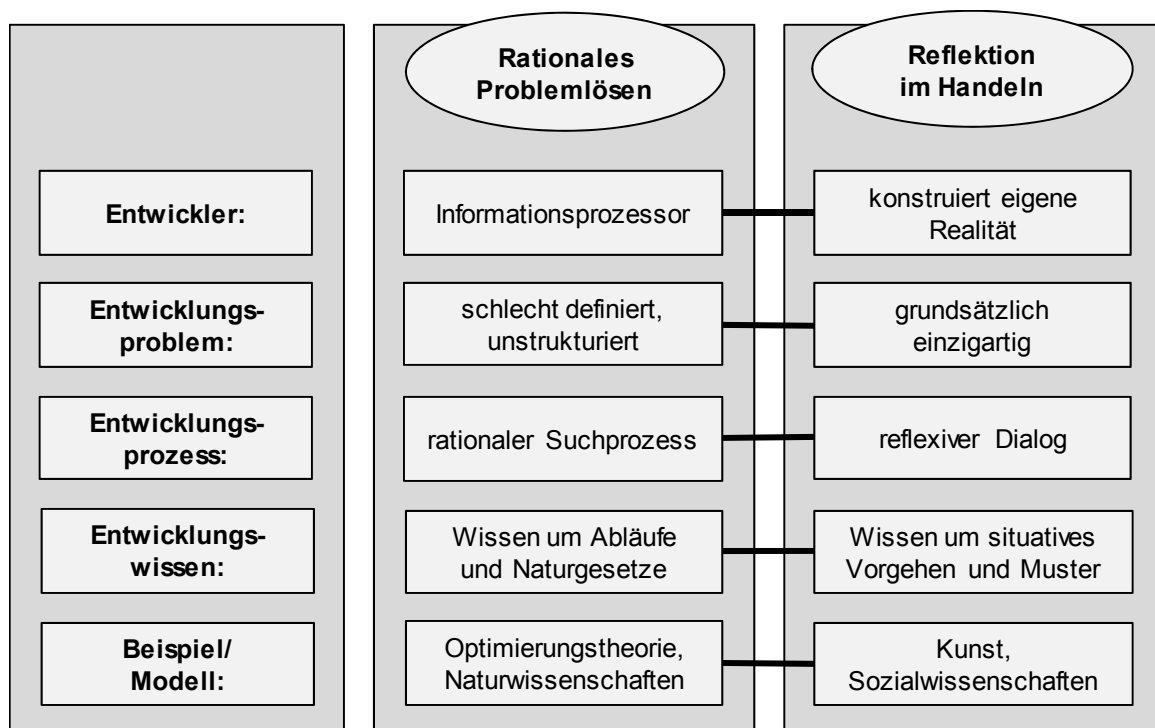


Bild 5-3: Vergleich der Paradigmen von SIMON und SCHÖN (nach DORST & DIJKHUIS²⁷⁵)

²⁷² vgl. Schön 1983

²⁷³ vgl. Simon 1981

²⁷⁴ vgl. Schön 1987, S.36

²⁷⁵ vgl. Dorst & Dijkhuis 1995

Nach SCHÖN²⁷⁶ passt die Ansicht, dass ein Entwickler seine eigene Situation maßgeblich mitbestimmt, nicht in das Wissenschaftsbild der technischen Rationalität. Zwar ist es richtig, dass Entwickler vollständig definierte Probleme durch ein sequentiell strukturiertes Vorgehen effizient lösen können, allerdings sind die alltäglichen Probleme in der Praxis zumeist eher durch Unsicherheit, Einzigartigkeit und Zielkonflikte bestimmt. Dies bedeutet, dass das Lösen technischer Probleme immer abhängig von einem Problemverständnis ist, das nicht durch die technische Aufgabenstellung vorgegeben, sondern erst durch die Bedingungen und Folgen der eigenen Entwicklung im Prozess schrittweise aufgedeckt wird²⁷⁷.

DORST und VALKENBURG²⁷⁸ greifen die Theorie des reflexiven Handelns in ihrer Forschungsarbeit auf und untergliedern den dort beschriebenen Prozess in die folgenden vier Schritte (vgl. Bild 5-4):

- Benennen (engl.: naming), d.h. die in der Entwicklungssituation relevanten Probleme werden benannt.
- Begrenzen (engl.: framing), d.h. die benannten Probleme werden in einen Entwicklungsrahmen eingeordnet.
- Bewegen (engl.: moving), d.h. innerhalb der Begrenzung wird sich in eine Lösungsrichtung bewegt.
- Reflektieren (engl.: reflecting), d.h. die gemachte Bewegung und der gewählte Rahmen werden bewertet.

Sofern das Problem nicht zufriedenstellend gelöst wurde, wird aus der Reflexion eine neue oder zumindest angepasste Benennung, Begrenzung oder Bewegungen abgeleitet.

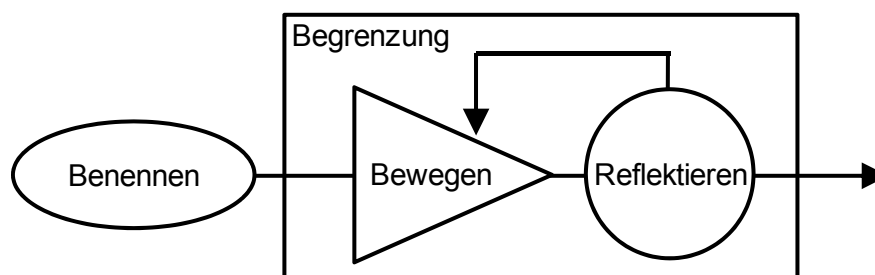


Bild 5-4: Reflexives Handeln nach DORST & VALKENBURG²⁷⁹

²⁷⁶ vgl. Schön 1987, S.6

²⁷⁷ vgl. Schön 1987, S.42

²⁷⁸ vgl. Dorst & Valkenburg 1998

²⁷⁹ vgl. Dorst & Valkenburg 1998

Nach CROSS²⁸⁰ liegt ein wesentliches Merkmal des reflexiven Handelns in dem Verständnis begründet, dass der Vorgang des Begrenzens sich nicht auf den Beginn eines Produktentstehungsprozesses beschränkt, sondern im Verlauf der Aufgabenbearbeitung immer wieder, also periodisch, auftritt.

CROSS führt mehrere Protokollstudien auf, die belegen, dass Entwickler Ziele und Randbedingungen prozessbegleitend anpassen und ändern. Er erklärt, dass die Entwickler dabei zumeist versuchen, so lang wie möglich am gewählten Wirkprinzip festzuhalten, auch wenn bei der detaillierten Ausgestaltung der favorisierten Lösung Schwierigkeiten auftreten. Es wird weiter geschildert, dass zum Teil sogar ausschließlich durch eine Änderung von Zielen und Randbedingungen mit den auftretenden Schwierigkeiten umgegangen werden kann, ohne dabei das grundlegende Wirkprinzip wechseln zu müssen. REYMEN²⁸¹ bezeichnet diese **kontinuierliche Redefinition des Entwicklungsrahmens** auch als „frame shift“.

Der Prozess des Begrenzens wird auch dadurch erschwert, dass das Handeln in der Produktentstehung zumeist auf mehrere Ziele zugleich gerichtet ist. DÖRNER²⁸² bezeichnet dies als „polytelisches Handeln“. Er führt aus, dass die Fähigkeit, die eigenen Ziele zum Objekt der Reflexion zu machen – also über die eigenen Ziele nachzudenken – wohl die Voraussetzung dafür ist, dem sich unmittelbar aus konkreten Mangelzuständen ergebenden Ziel zusätzlich noch Neben- und Fernziele hinzuzufügen, die sich mitunter gar nicht auf aktuelle Mangelzustände beziehen, sondern lediglich auf Mangelzustände die als möglich antizipiert werden.

Ein weiteres wesentliches Merkmal des reflexiven Handelns wird von EDER und HUBKA²⁸³ genannt. Sie erläutern, dass reflexives Handeln nicht durch die Verwendung von Algorithmen erfolgt, sondern vielmehr durch Heuristiken und flexible Handlungsleitfäden bestimmt ist: Reflexives Handeln kann folglich nicht automatisiert durchgeführt werden. Einer der Gründe hierfür besteht darin, dass „reflection-in-action“ die Reflexion einer Handlung beinhaltet, ohne dass die Handlung selbst dabei unterbrochen wird. REYMEN²⁸⁴ beschreibt in diesem Zusammenhang, dass insbesondere dann, wenn ein Handlungsergebnis in positiver oder negativer Weise überrascht (d.h. eine Situation eintritt, die der gebildeten Erwartung nicht entspricht), im gegenwärtigen Handeln über vergangenes Handeln nachgedacht und so zukünftiges Handeln beeinflusst wird.

²⁸⁰ vgl. Cross 2004

²⁸¹ vgl. Reymen 2003

²⁸² vgl. Dörner 1994 nach Wallmeier 2001, S.118

²⁸³ vgl. Eder & Hubka 2004

²⁸⁴ vgl. Reymen 2003

Nach SACHSE²⁸⁵ wird Denken folglich nicht einfach vom Handeln und Handeln nicht einfach vom Denken begleitet. Denken ist auch nicht auf einen inneren und Handeln nicht auf einen äußeren Vorgang reduziert. Denken und Handeln stellen dahingegen eine unabänderliche und notwendige Einheit dar, die SACHSE als **Denkhandeln** bezeichnet (vgl. Bild 5-5).

HACKER²⁸⁶ erklärt, dass diese Einheit aus Denken und Handeln intentionale Tätigkeiten umfasst, die stets interne, mentale Schritte (z.B. Schlussfolgern, Entscheiden oder Vorstellen) und externe, psychomotorische (z.B. Sprech-, Schreib- oder Zeichen-) Schritte beinhalten. Er nennt in diesem Zusammenhang eine Reihe psychologischer Untersuchungen, die zeigen, dass im Prozess der Entwicklung interne Schritte aus Verkürzungen und Verinnerlichungen ursprünglich externer Vorgänge entstehen und die Umkehrbarkeit der Internalisierung insbesondere bei Schwierigkeiten im Umgang mit abstrakten Problemen auftritt. Der wiederholte Wechsel von internem und externem Vorgehen kann somit als Merkmal komplexer Problemlöseprozesse betrachtet werden, wobei das externe Vorgehen nicht einfach als gedächtnisentlastende Fixierung intern verfertigter Ideen zu verstehen ist, sondern als Teil der Ideenerzeugung.

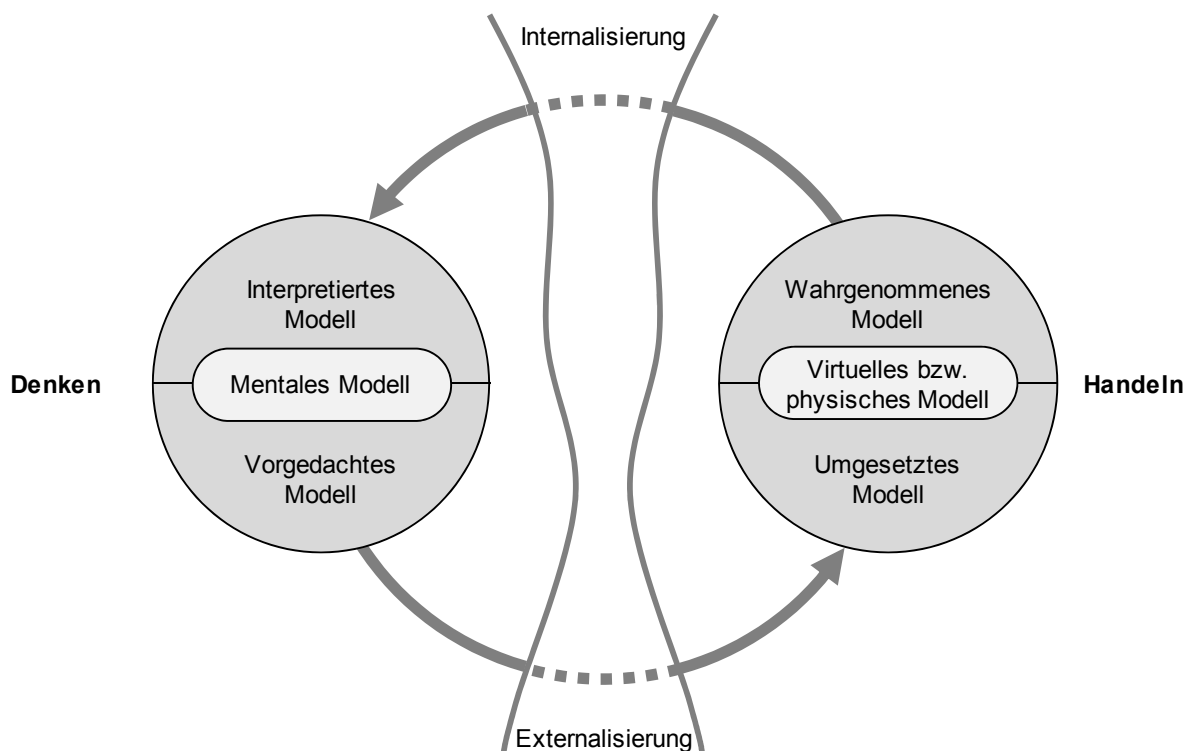


Bild 5-5: Denkhandeln: Einheit aus Denken und Handeln²⁸⁷

²⁸⁵ vgl. Sachse 2006

²⁸⁶ vgl. Hacker 2002

²⁸⁷ eigene Darstellung in Anlehnung an Rutz 1985, S.55

5.1.3 Zwischenfazit

Der Ansatz der mentalen Modelle stellt einen der grundlegenden Bausteine für eine menschenzentrierten Modellierung dar. Ausgehend von der Annahme, dass der Mensch auf Basis seines individuellen Wissens sowie der Wahrnehmung und Interpretation seiner derzeitigen Situation interne Modelle aufbaut und weiterentwickelt, kann geschlussfolgert werden, dass ein wesentlicher Anteil der Entwicklung im Kopf des Entwicklers, also auf einer individuellen und mentalen Ebene, stattfindet. Ein menschenzentriertes Modell muss folglich in der Lage sein, diese mentale Ebene als zentralen Bestandteil des Handlungssystems abzubilden.

Mentale Modelle werden vom Entwickler sowohl bei der Entwicklung des Problem- und Zielverständnisses als auch bei der Entwicklung möglicher Lösungen verwendet. Diese Modelle beinhalten somit vorgedachte Elemente des Zielsystems sowie vorgedachte Elemente des Objektsystems. Die externe Repräsentation mentaler Modelle, z.B. in Form von Sprache und Schrift oder aber in Form von virtuellen und physischen Modellen, dient dabei zum einen der Entlastung des menschlichen Arbeitsgedächtnisses. Zum anderen ist sie aber auch erforderlich, um eigene Ideen oder Ansichten kommunizieren und so mit anderen teilen zu können.

Zur Beschreibung der gegenseitigen Wechselwirkungen von internen und externen Modellen bietet die Theorie des reflexiven Handelns eine geeignete wissenschaftliche Basis. Die in der Reflexion enthaltene direkte Kopplung von Denken und Handeln verbindet innere und äußere Entwicklungsabläufe. Dabei umfasst, das reflexive Handeln nicht nur Syntheseschritte im Sinne eines mentalen Vorausdenkens und externen Repräsentierens, sondern beschreibt zudem, wie die Analyse expliziter Ziele und Objekte das individuelle Denken und Handeln beeinflusst.

Die Erkenntnis, dass ein Entwickler die Beschreibung einer Entwicklungsaufgabe immer subjektiv und im Kontext der aktuellen Situation interpretiert, zeigt die Wichtigkeit einer mit den Randbedingungen vernetzten und zudem erweiterbaren Repräsentation von Zielen, die grundsätzlich vor dem Hintergrund eines gemeinsamen Ziel- und Problemverständnisses erfolgen sollte. Der Ansatz beschreibt weiter, dass durch die Analyse einer gerade entstehenden Lösung – also einer direkten mentalen Validierungsaktivität – neues fallspezifisches Wissen gewonnen werden kann, das die individuelle Zielsetzung ergänzt, verfeinert oder verändert und so den folgenden Handlungsschritt beeinflusst. Die Theorie des reflexiven Handelns erklärt somit auf Basis individueller Denk- und Handlungsabläufe das kontinuierliche Voranschreiten im Produktentstehungsprozess.

5.2 Faktor Wissen – Umgang mit epistemischer Unsicherheit

5.2.1 Wissen und Wissensbasis

Produktentstehung ist eine wissensintensive Tätigkeit. Wissen existiert dabei ausschließlich in den Köpfen von Individuen und gibt diesen die Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen und Handlung auszurichten; all das, was außerhalb des Menschen gespeichert und vermittelt wird, sind (nur) Informationen und Daten²⁸⁸.

Auch nach NORTH²⁸⁹ kann Wissen nur **personengebunden** existieren. Folglich ist der Mensch in der Lage, explizite Informationen (z.B. in Form von Sprache, Text oder Bildern) aufzunehmen, auf Basis seiner Vorkenntnisse und Erfahrungen in einen individuellen Kontext einzubinden und so zu Wissen zu verknüpfen. Dies bedeutet auch, dass es nicht möglich ist, Wissen vollständig zu explizieren. Jeder Vorgang des Explizierens erfolgt über Informationen (z.B. in Form von Sprache, Text oder Bildern), die nur begrenzt die individuellen Vorstellungen und Verständnisse repräsentieren können. Expliziertes Wissen besitzt folglich immer Modellcharakter, d.h. es umfasst einen entsprechend eines bestimmten Zwecks verkürzten Informationsgehalt.

Das Verständnis, dass Wissen nur personengebunden vorliegen kann, schließt nicht aus, dass mehrere Personen einer Gruppe über ähnliches oder sogar gleiches Wissen verfügen. Nach STEMPFLE²⁹⁰ macht eben die Gesamtheit des Wissens und der Annahmen, die allen Gruppenmitgliedern gemeinsam sind, das geteilte mentale Modell der Gruppe aus. Während einige Bestandteile des mentalen Modells schriftlich fixiert oder in anderer Form vergegenständlicht sein können, sind andere Bestandteile nur in Form von Gedächtnisinhalten verfügbar. Das mentale Modell enthält dabei sowohl sicheres Faktenwissen wie auch ungesicherte Hypothesen, die mit gewissen Wahrscheinlichkeiten oder Plausibilitäten versehen sind.

Definition 5-1: Wissen (engl.: knowledge)

Wissen bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge²⁹¹.

²⁸⁸ vgl. Ahmed, Bracewell & Kim 2005

²⁸⁹ vgl. North 2011, S.37

²⁹⁰ vgl. Stempfle 2004

²⁹¹ vgl. Probst, Raub & Romhardt 2010, S.23

Nach ALBERS und SAUTER²⁹² ist in der Produktentstehung insbesondere **fallspezifisches Wissen**, also das Wissen, das in einem bestimmten Produktentstehungsprozess zusätzlich zum allgemeinen Domänenwissen benötigt wird, von zentraler Bedeutung. Fallspezifisches Wissen zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass es (1) kontinuierlich revidiert, (2) permanent als verbesserungsfähig angesehen, (3) prinzipiell nicht als Wahrheit, sondern als Ressource betrachtet wird und (4) untrennbar mit Nichtwissen gekoppelt ist²⁹³. Der Umgang mit fallspezifischem Wissen ist deshalb grundsätzlich mit den Risiken von Unsicherheiten verbunden.

In der Entwicklung ergeben sich somit unsicherheitsbehaftete Situationen, die auch als Nicht-Routinesituationen oder kritische Situationen bezeichnet werden. Sie sind zumeist die Folge von Komplexität und begründen sich insbesondere darin, dass nicht bereits zu Beginn eines Produktentstehungsprozesses alle relevanten Information und Spezifikationen vorliegen. Es gilt daher zunächst mit den bestehenden **Wissens- und Definitionslücken** umzugehen und diese durch den kontinuierlichen Gewinn von Wissen sowie das schrittweise Treffen von Entscheidungen prozessbegleitend zu schließen²⁹⁴.

Entscheidungen im Produktentstehungsprozess erfordern demnach Domänenwissen wie auch fallspezifisches Wissen, das aber zum einen auf eine Vielzahl beteiligter Personen verteilt ist und zum anderen zunächst eventuell nur in Form von Annahmen und Schätzungen vorliegt. Eine Produktentstehung beginnt folglich mit einer stark vom entsprechenden Handlungssystem geprägten Wissensbasis²⁹⁵, die im Prozessverlauf insbesondere um fallspezifisches Wissen erweitert wird, so dass hier Entscheidungen getroffen und Definitionslücken geschlossen werden können.

Definition 5-2: Wissensbasis (engl.: state of knowledge)

Wissensbasis bezeichnet die Menge an Domänenwissen und fallspezifischem Wissen, welches innerhalb des Handlungssystems eines bestimmten Produktentstehungsprozesses bereitsteht. Da Wissen immer personengebunden ist, kann die Wissensbasis durch Erkenntnisgewinn oder aber durch die Integration zusätzlicher Personen (z.B. Kunden oder Fachspezialisten) in das Handlungssystem zielgerichtet erweitert werden²⁹⁶. Sie umfasst darüber hinaus die Daten und Informationsbestände, auf welchen individuelles und organisationales Wissen aufbaut²⁹⁷.

²⁹² vgl. Sauter 2012, S.42f.

²⁹³ vgl. Willke 1998

²⁹⁴ vgl. Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

²⁹⁵ vgl. Strohschneider 1990, S.65

²⁹⁶ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

²⁹⁷ vgl. Probst, Raub & Romhardt 2010, S.23

Fallspezifisches Wissen kann nur durch fallspezifische Informationen aufgebaut werden. Hierbei gestaltet sich die Informationssammlung in unsicherheitsbehafteten Situationen als schwierig, da sich Informationsnachfrage, Informationsangebot und Informationsbedarf zumeist nicht decken (vgl. Bild 5-6). Informationsnachfrage bezieht sich dabei auf die Informationen, nach denen gesucht wird, Informationsangebot umfasst die Informationen, auf die zugegriffen werden kann und Informationsbedarf beschreibt die Menge an Informationen, die in diesem spezifischen Fall tatsächlich benötigt werden.

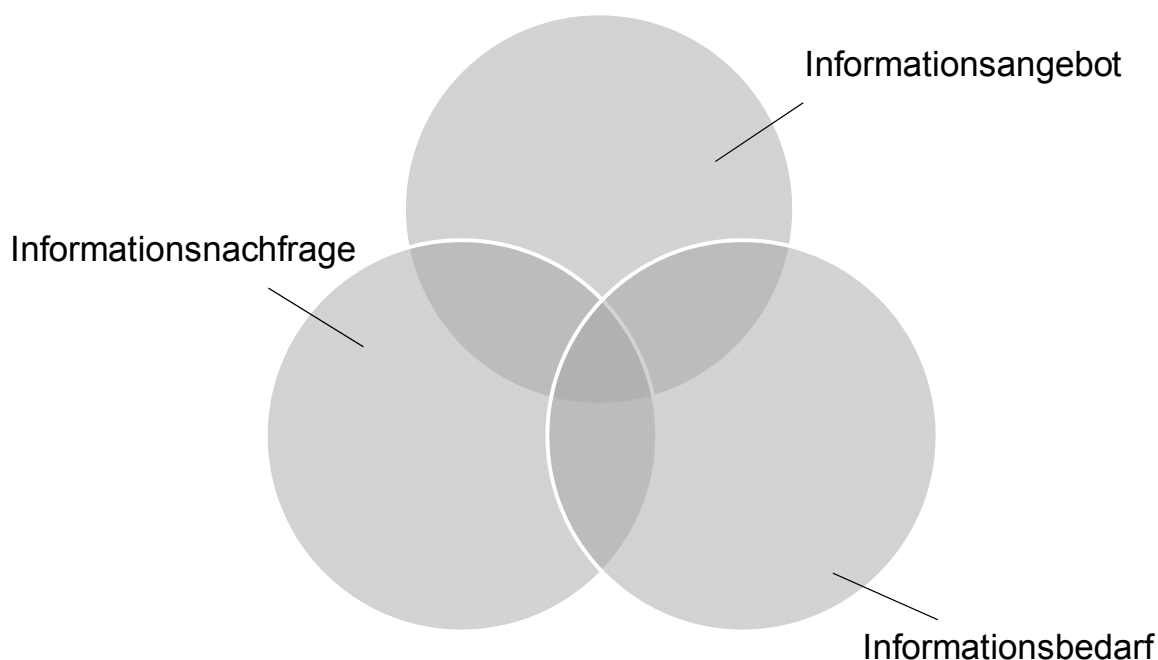


Bild 5-6: Informationsnachfrage, -angebot und -bedarf nach PICOT und FRANCK²⁹⁸

Um einen größeren Deckungsbetrag der drei aufgeführten Bereiche erzielen zu können, muss einerseits die Informationsnachfrage stärker auf den Informationsbedarf ausgerichtet werden. Hieraus ergeben sich die Notwendigkeit wie auch die hohe Bedeutung einer kontinuierlichen Situationsanalyse und Problemeingrenzung. Andererseits gilt es insbesondere das Angebot an Informationen entsprechend des fallspezifischen Bedarfs zu erweitern. Nach ALBERS²⁹⁹ erfolgt der hier notwendige **Informationsgewinn durch Validierungsaktivitäten**, in welchen virtuelle, physische oder auch kombiniert virtuell-physische Modelle gebildet und analysiert werden.

²⁹⁸ vgl. Picot & Franck 1988

²⁹⁹ vgl. Albers 2010

In einer Studie von DAALHUIZEN, BADKE-SCHAUB und BATILL³⁰⁰ werden sechzehn Entwicklungsingenieure aus sechs verschiedenen Unternehmen zum Umgang mit unsicherheitsbehafteten Situationen befragt. In der Untersuchung werden neun grundlegende Handlungsweisen identifiziert, durch welche die Wissensbasis erweitert und so Unsicherheit vermindert werden kann (vgl. Bild 5-7).

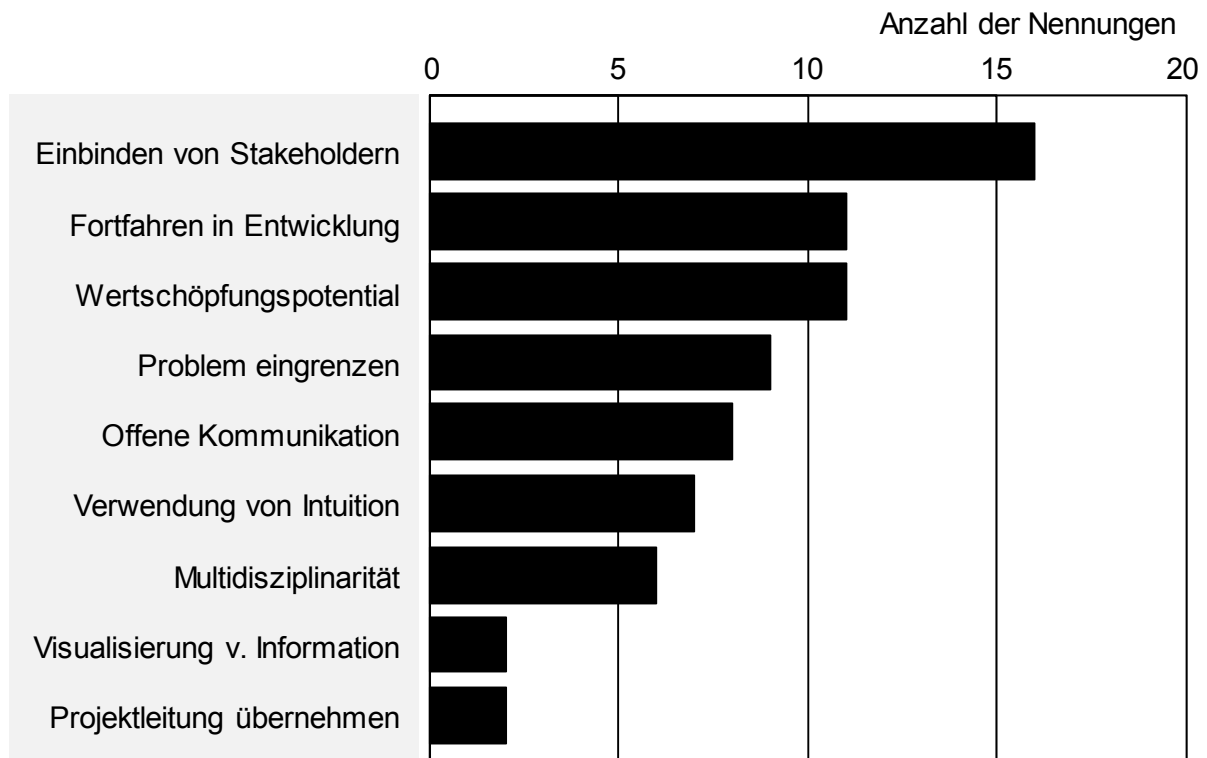


Bild 5-7: Umgang mit Unsicherheit in der Produktentwicklung³⁰¹

Im Folgenden werden die einzelnen Handlungsweisen zum Umgang mit Unsicherheit kurz vorgestellt³⁰²:

Einbinden von Stakeholdern: Viele Situationen umfassen die Zusammenarbeit und Kommunikation mit verschiedenen Stakeholdern unterschiedlicher Interessensbereiche. Dies verursacht aufgrund von kognitiven Distanzen zwischen den mentalen Modellen der Stakeholder oftmals Kommunikationsprobleme, so dass das Entwicklungsproblem in sehr verschiedener Art und Weise verstanden wird. In diesen Fällen versuchen Entwickler die Stakeholder, mit dem Ziel ein gemeinsames Problemverständnis zu erlangen, in den Produktentstehungsprozess miteinzubinden.

³⁰⁰ vgl. Daalhuizen, Badke-Schaub & Batill 2009

³⁰¹ vgl. Daalhuizen, Badke-Schaub & Batill 2009

³⁰² vgl. Daalhuizen, Badke-Schaub & Batill 2009

Fortfahren in der Entwicklung: Entwickler befinden sich oftmals in Situationen, in denen Ziele nur weich definiert sind und der Lösungsraum in der Folge entsprechend groß ist. In diesen Fällen bedienen sich Entwickler verschiedener Strategien, wie z.B. dem Hinzuziehen von Kollegen (andere Wahrnehmung und Interpretation, zusätzliches Wissen) oder dem Bilden physikalischer Modelle (externe Repräsentation mentaler Modelle, Erkenntnisgewinn durch Validierung).

Argumentation über Wertschöpfungspotential: Viele Nicht-Routinesituationen entstehen auf der strategischen Ebene. In diesen Fällen ist es erforderlich, den potentiellen Wert einer Lösung aufzuzeigen, auch wenn diese noch weiterzuentwickeln und nicht vollständig vorauszusagen ist. In diesen Situationen gilt es für den Entwickler seine Lösung im Zusammenhang mit der Marktsituation des jeweiligen Geschäftsbereichs zu präsentieren und den strategischen Mehrwert (z.B. durch die Modellierung des Produktprofils) herauszustellen.

Eingrenzen des Problems: Komplexe Entwicklungsprobleme sind oftmals nicht vollständig zu erfassen. Dies verursacht vage Ziel- und Problembeschreibungen, erschwert die Kommunikation und führt mitunter auch zu Fehlern. Entwickler versuchen daher, das Problem explizit einzugrenzen. Oftmals geschieht dies gemeinsam mit dem Kunden, so dass das geteilte mentale Modell eines Entwicklungsrahmens entstehen kann, welches als abgestimmte Basis für die Entscheidungsfindung im gesamten Projekt und damit als Referenz für die Entwicklung dient.

Aufbau einer offenen Kommunikationskultur: Entwicklungsprojekte sind vermehrt geprägt durch Interdisziplinarität, unscharfe Zielsetzungen sowie hohen Zeit- und Kostendruck. Dies verursacht Situationen, in welchen verfügbare Informationen sich oftmals als mehrdeutig, widersprüchlich oder auch einfach als falsch erweisen. Entwickler versuchen daher eine Kultur zu etablieren, in welcher diese Informationen kritisch hinterfragt und hinsichtlich ihrer Belastbarkeit bewertet werden können.

Verwendung von Intuition: Viele Situationen erfordern das Treffen von Entscheidungen, ohne dass das Entwicklungsproblem zuvor vollständig verstanden wurde. Die Ursache dafür kann z.B. in Zeitdruck oder auch in unvollständiger und mehrdeutiger Information liegen. In diesen Fällen versuchen Entwickler bekannte Muster zu finden, um das Problem intuitiv eingrenzen und Entscheidungen abzuleiten zu können. Die Verwendung von Intuition führt zumeist zu einer Änderung des Problemverständnisses (inklusive der damit verbundenen Vor- und Nachteile).

Multidisziplinarität: Viele Entwicklungsprobleme sind komplex aufgrund ihrer Vielschichtigkeit, die aus der gleichzeitigen und wechselseitigen Berücksichtigung von z.B. Anwenderverhalten, Wettbewerb, Technologie und Umwelt resultiert. In diesen Situationen versuchen Entwickler ein besseres Verständnis des Problems zu

gewinnen indem sie in multidisziplinären Teams zusammenarbeiten (andere Wahrnehmung und Interpretation, zusätzliches Wissen).

Visualisierung von Information: Entwicklungsprobleme und auch Lösungen können im Produktentstehungsprozess oftmals nicht explizit durch Sprache bzw. Text beschrieben werden. Dies kann zu Schwierigkeiten in der Kommunikation mit verschiedenen Stakeholdern führen. Informationen werden daher zumeist visualisiert (externe Repräsentation mentaler Modelle), um so entweder das Problem besser beschreiben oder aber die Lösung besser darstellen zu können.

Projektleitung übernehmen: Manchen im Team bearbeiteten Projekten mangelt es an hierarchischer Struktur. Dies kann zwar ein angenehmes Teamklima fördern, es können aber auch Situationen entstehen, in denen niemand die Gesamtverantwortung übernimmt. In diesen Fällen versuchen Entwickler die Projektleitung zu übernehmen und eine passende Projektstruktur zu etablieren.

Die identifizierten Handlungsweisen können entsprechend Bild 5-8 den zuvor beschriebenen Möglichkeiten, die Wissensbasis zu erweitern, zugeordnet werden. Dazu zählen (1) die Einbindung zusätzlicher Personen ins Handlungssystem, (2) die Situationsanalyse und Problemeingrenzung und (3) die kontinuierliche Validierung. Lediglich die Handlungsweise „Projektleitung übernehmen“ entspricht keinem der drei genannten Punkte, da hier keine Erweiterung der Wissensbasis erfolgt, sondern vielmehr die bestehende Wissensbasis nutzbar gemacht werden soll.

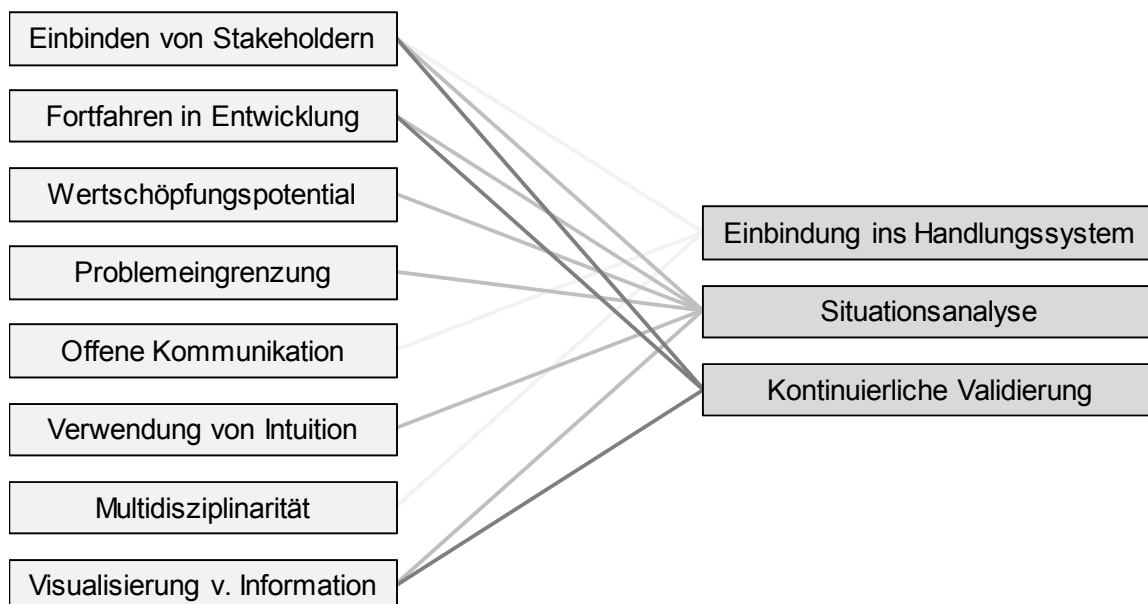


Bild 5-8: Handlungsweisen zur Erweiterung der Wissensbasis

5.2.2 Problem- und Lösungsraum

Wissen entsteht im Handeln und Wissen reguliert das Handeln. HACKER³⁰³ beschreibt, dass jedoch nur ein Teil des Wissens einer Person wirklich handlungsregulierend ist. Das Abgrenzen dieses handlungswirksamen Wissens gestaltet sich dabei als schwierig, da tatsächlich handlungsregulierendes Wissen nicht für sich allein, sondern nur gekoppelt mit Zielen und Absichten das Handeln reguliert. MÜLLER³⁰⁴ führt in diesem Zusammenhang auf, dass explizit formulierte Arbeitsaufträge erst durch ihre mentale Repräsentation handlungswirksam werden. Das bedeutet, dass in Abhängigkeit vom Wissensstand, von den Erfahrungen, Fähigkeiten, Einstellungen und Motiven einer Person Arbeitsaufträge individuell als Arbeitsaufgaben redefiniert werden, um eine Handlungsfähigkeit zu erreichen.

Folglich werden in der Produktentstehung explizit formulierte Anforderungen und Randbedingungen (Informationen), wie sie z.B. in Lasten-/Pflichtenheften und Anforderungslisten auftreten, durch den Entwickler subjektiv wahrgenommen, interpretiert und zu einem individuellen mentalen Modell von Zielen und Handlungsspielräumen (Wissen) verknüpft. Die **subjektive Redefinition** von dokumentengebundenen Zielinformationen spielt insbesondere in zwischenmenschlichen Prozessen, wie z.B. bei der Delegation oder der Teamarbeit, eine zentrale Rolle, da hier für die Kommunikation zumindest bis zu einem gewissen Grad geteilte mentale Modelle von Zielen und Handlungsspielräumen entstehen müssen³⁰⁵.

In den Kognitionswissenschaften werden zur Beschreibung dieser mentalen Wechselwirkung von Zielen und Wissen vielfach Modelle abstrakter Räume verwendet, wobei sich hier insbesondere die Begriffe des Problemraums und des Lösungsraums etabliert haben. KLIX³⁰⁶ wie auch NEWELL und SIMON³⁰⁷ beschreiben den **Problemraum** im Zusammenhang mit dem Lösen von Denkaufgaben (wie z.B. bei „Die Türme von Hanoi“) als die Menge aller Zustände, die ein Problem in Folge aller möglichen Handlungen annehmen kann. Bei komplexen und unsicherheitsbehafteten Problemen ist aufgrund der hohen Diversität und Dynamik eine vollständige Beschreibung aller Zustände und Handlungen jedoch nicht möglich. Im Kontext der Produktentstehung wird der Problemraum daher vielmehr als die Menge des gesammelten Wissens über die Elemente des zu bearbeitenden Problembereichs sowie die Beziehungen zwischen verschiedenen Problemelementen verstanden³⁰⁸.

³⁰³ vgl. Hacker 2005, S.369

³⁰⁴ vgl. Müller 2007, S.25

³⁰⁵ vgl. Eckert & Stacey 2001; Hacker 2005, S.53

³⁰⁶ vgl. Klix 1971, S.644

³⁰⁷ vgl. Newell & Simon 1972, S.93

³⁰⁸ vgl. Stempfle 2004

STEMPFLE und BADKE-SCHAUB³⁰⁹ beschreiben, dass im Umgang mit einem Problemraum vier grundlegende kognitive Operatoren zum Einsatz kommen: (1) Generieren, (2) Explorieren, (3) Vergleichen und (4) Selektieren. Generierende und explorierende Aktivitäten verfolgen dabei das Ziel, den Problemraum zu erweitern, während vergleichende und selektierende Aktivitäten den Problemraum weiter eingrenzen.

Auch RUDE³¹⁰ beschreibt den Umgang mit Entwicklungsproblemen durch einen Modellraum der erweiternde und eingrenzende Handlungsmöglichkeiten bietet. RUDE spannt hierzu drei verschiedene Dimensionen auf (vgl. Bild 5-9):

- Konkretisierungsgrad: Abstrahieren und Konkretisieren
- Zerlegungsgrad: Sicht erweitern und Zerlegen
- Variationsgrad: Auswählen und Variieren

Der Problemraum stellt somit eine Untermenge der Wissensbasis dar, die das subjektive Problemverständnis repräsentiert. Durch die Grenze des Problemraums wird bestimmt, welches Wissen benötigt wird. Eine Erweiterung des Problemraums erfordert hierbei zumeist ein breiteres Wissen (d.h. zusätzliches Domänenwissen), die Eingrenzung eher ein tieferes Wissen (d.h. zusätzliches fallspezifisches Wissen).

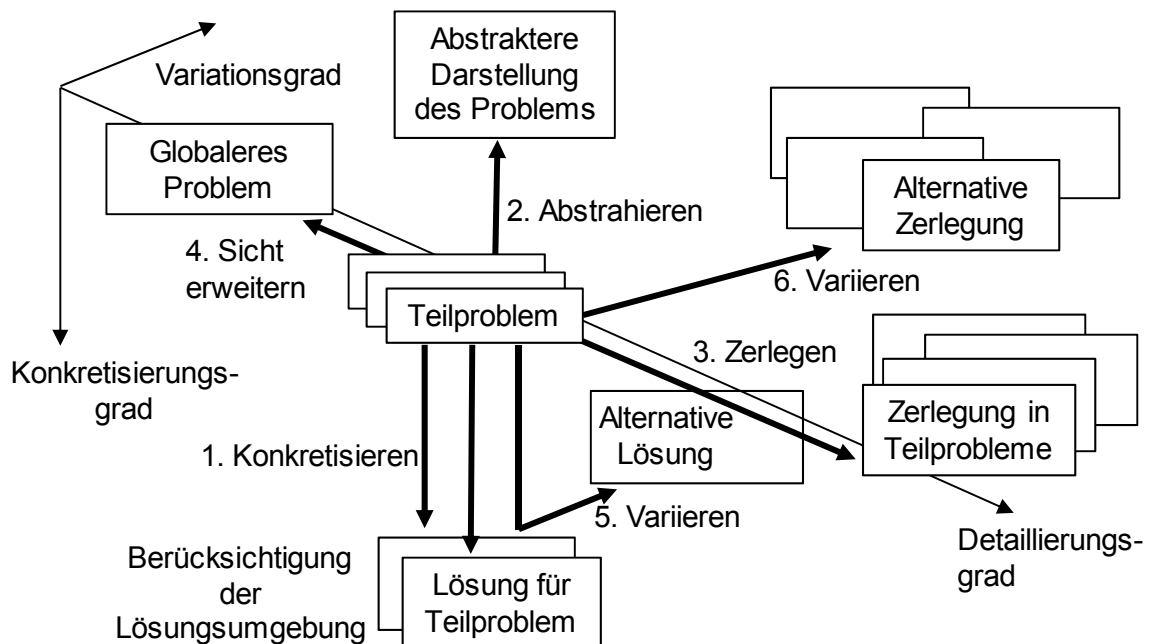


Bild 5-9: Dimensionen im Modellraum von (Teil-)Problemen nach RUDE³¹¹

³⁰⁹ vgl. Stempfle & Badke-Schaub 2002

³¹⁰ vgl. Rude 1998, S.45f.

³¹¹ vgl. Rude 1998, S.45

Der **Lösungsraum** ist ursprünglich ein Begriff aus der Mathematik. LENDERS³¹² erläutert, dass in der Linearen Algebra ein Lösungsraum die Menge aller Lösungen für ein gegebenes Problem, z.B. für ein lineares Gleichungssystem, bezeichnet, in vielen anderen Disziplinen (z.B. der Informatik) der Begriff aber auf eher abstrakter Ebene als Synonym für alle zu einem bestimmten Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Lösungen verwendet wird. Er weist ferner darauf hin, dass der Begriff des Lösungsraumes in der Produktentwicklung zwar gebräuchlich ist und in der Fachliteratur verwendet wird, aber nicht mit einheitlichen Attributen und Merkmalen hinterlegt ist, die eine präzise Beschreibung von individuellen Lösungsräumen in Entwicklungsprojekten ermöglichen. Vielmehr wird der Begriff häufig zur Umschreibung der vergleichsweise abstrakten Menge aller vorstellbaren Lösungsmöglichkeiten für eine Aufgabe bzw. ein Problem genutzt.

Den Einfluss des Problemraumes auf den Lösungsraum beschreibt CROSS³¹³ mithilfe der Theorie des reflexiven Handelns: Die Entwickler wählen jene Aspekte des Problemraumes aus, mit denen sie sich befassen möchten (Benennen), und bestimmen so den Lösungsraum (Begrenzen), den sie im Folgenden erkunden (Bewegen). Die Grundidee wird oftmals auch in Form eines Mengendiagramms dargestellt (vgl. Bild 5-10). Einzelne Ziele und Randbedingungen erlauben für die Lösung jeweils nur einen begrenzten Freiheitsgrad³¹⁴. Das Zusammenwirken aller Ziele und Randbedingungen (Problemraum) wird durch die Schnittmenge der Freiheitsgrade beschrieben, welche den eingegrenzten Lösungsraum repräsentiert.

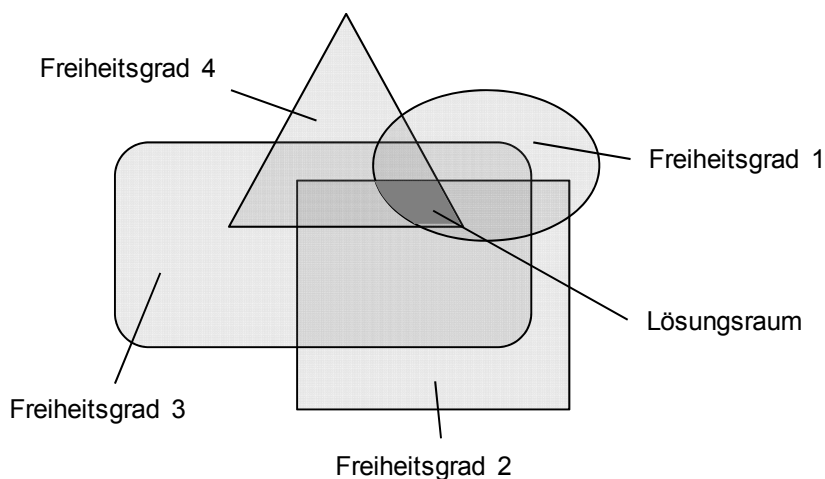


Bild 5-10: Lösungsraum als Schnittmenge der Freiheitsgrade³¹⁵

³¹² vgl. Lenders 2009, S.24ff.

³¹³ vgl. Cross 2011, S.120

³¹⁴ vgl. Kittel & Vajna 2009

³¹⁵ vgl. Lenders 2009, S.109

HACKER³¹⁶ unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen den objektiven, tatsächlichen vorliegenden Freiheitsgraden und den subjektiven, individuell wahrgenommenen Freiheitsgraden (vgl. Bild 5-11).

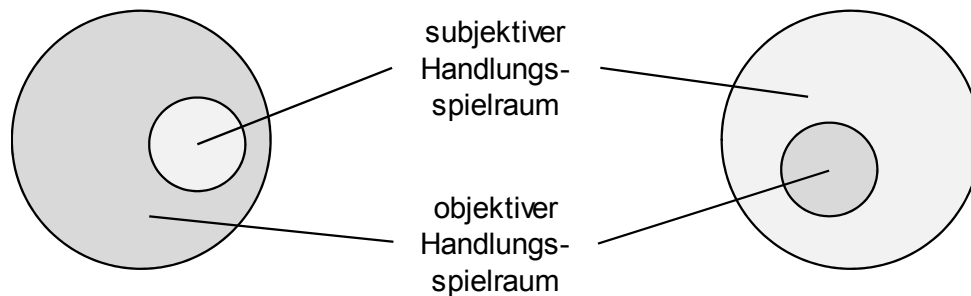


Bild 5-11: Diskrepanzen zwischen objektivem und subjektivem Lösungsraum³¹⁷

Im ersten Fall ist der objektive Lösungsraum größer als der subjektive, d.h. ein Teil des Lösungsraumes wird nicht erkannt und folglich auch nicht genutzt. Hier gilt es durch mentale Operationen, wie z.B. Analogiebildung³¹⁸, Denkbarrieren zu überwinden und scheinbare Widersprüche aufzulösen³¹⁹. Im zweiten Fall ist der subjektive Lösungsraum größer als der objektive, d.h. es existieren Einschränkungen durch weitere Ziele und Randbedingungen die bislang noch nicht erkannt wurden. An dieser Stelle muss durch Validierungsaktivitäten zusätzliches Wissen gewonnen und so ein genaueres Problemverständnis aufgebaut werden.

Für diese Arbeit ergeben sich folgende Definitionen für Problem- und Lösungsraum:

Definition 5-3: Problemraum (engl.: problem space)

Der Problemraum ist die mentale, multidimensionale Repräsentation eines Problems auf Basis von gesetzten Zielen und erkannten Randbedingungen. Der Problemraum entspricht dem subjektiven Verständnis eines Problems und bildet somit eine Teilmenge der Wissensbasis.

Definition 5-4: Lösungsraum (engl.: solution space)

Der Lösungsraum ist die mentale, multidimensionale Repräsentation der Schnittmenge aller durch den Problemraum definierten Freiheitsgrade. Der Lösungsraum entspricht dem subjektiven Verständnis der Menge aller zulässigen Lösungen zu einem Problem und richtet so die mentale, virtuelle und physische Modellierung von Objekten aus.

³¹⁶ vgl. Hacker 2005, S.129f.

³¹⁷ vgl. Hacker 2005, S.134

³¹⁸ vgl. Deigendesch 2009, S. 74f.

³¹⁹ vgl. Albers, Lohmeyer & Schmalenbach 2011

MAHER³²⁰ erläutert unter Zuhilfenahme der Begriffe *Problemraum* und *Lösungsraum* drei grundlegend unterschiedliche Verständnisse des Problemlösungsprozesses in der Entwicklung:

Entwicklung als Suche: Diese Sichtweise setzt voraus, dass zu Beginn der Entwicklung alle Ziele vollständig definiert und zudem unveränderbar sind. Auf diese Weise wird der Problemraum eindeutig bestimmt und so der Blickwinkel des Entwicklers klar ausgerichtet (vgl. Bild 5-12). Blickwinkel und definierter Problemraum grenzen einen überschaubaren Lösungsraum ein, in welchem schließlich nach der besten Lösung gesucht werden kann.

Entwicklung als Exploration: In dieser Sichtweise liegen die Entwicklungsziele zu Beginn noch nicht vollständig vor. Es gilt daher zunächst, den Problemraum systematisch zu erkunden. Dazu muss der Entwickler seinen Blickwinkel mehrfach ändern, um das Problem aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten zu können. Durch die Exploration des Problemraums eröffnen sich zusätzliche Lösungsräume, die bislang unbekannte Lösungen beinhalten können (vgl. Bild 5-12). Im Unterschied zur reinen Suche geht hier der eigentlichen Lösungsfindung ein Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung voraus. Der zur Exploration notwendige Perspektivenwechsel kann dabei, z.B. durch die Hauptmerkmalsliste nach PAHL/BEITZ³²¹, methodisch unterstützt werden.

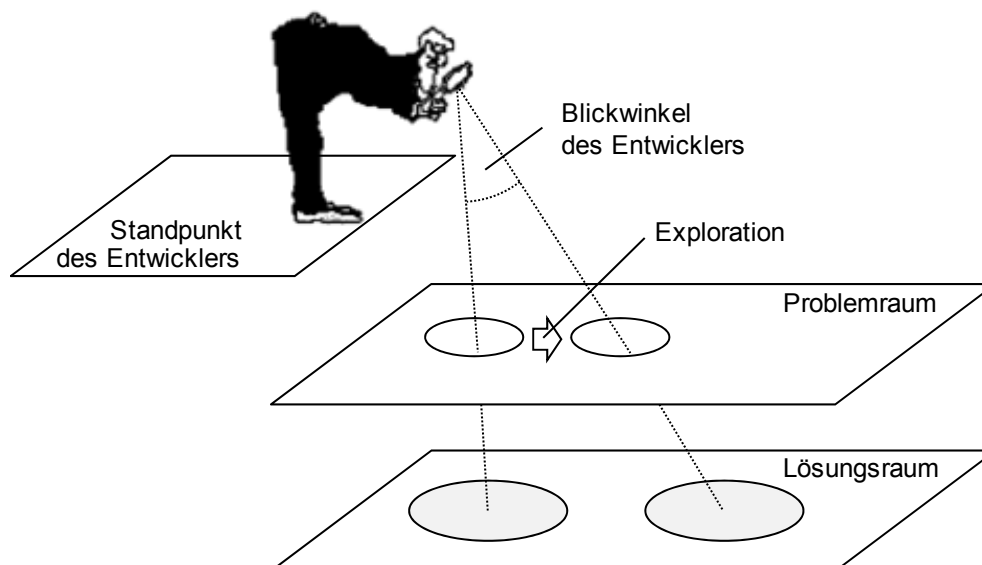


Bild 5-12: Problem- und Lösungsraum im Co-Evolutionary Design nach MAHER³²²

³²⁰ vgl. Maher 2000

³²¹ vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S. 219f.

³²² vgl. Maher 2000

Entwicklung als Co-Evolution: Co-Evolution ist ein Begriff aus der Biologie, der einen evolutionären Prozess der wechselseitigen Anpassung zweier stark interagierender Lebensarten beschreibt. MAHER³²³ übernimmt den Begriff für die Beschreibung der kontinuierlichen und wechselseitigen Anpassung von Problem- und Lösungsraum. Diese Sichtweise erlaubt es, in unsicherheitsbehafteten Situationen mit einem zunächst vagen Problemverständnis erste Lösungen zu erarbeiten, die umgehend dafür genutzt werden, den Problemraum weiterzuentwickeln und somit wiederum Auswirkungen auf den Lösungsraum beinhalten.

DORST und CROSS³²⁴ untersuchen im Rahmen einer Protokollstudie mit Entwicklern aus der Industrie, wie sich die Co-Evolution von Problem- und Lösungsraum im Entwicklungsprozess darstellt. Ihre Beobachtungen zeigen, dass die Entwickler entsprechend Bild 5-13 mit einer Exploration des Problemraums beginnen und darin erste Strukturen entdecken ($P(t+1)$). Diese unvollständigen Strukturen werden dann verwendet, um korrespondierende Strukturen im Lösungsraum zu bilden ($S(t+1)$). Die Entwickler leiten Schlussfolgerungen daraus ab, erzeugen erste Lösungsansätze und entwickeln somit die Strukturen im Lösungsraum weiter ($S(t+2)$). Es folgt dann ein Transfer von Aspekten der entwickelten Lösungsansätze zurück in den Problemraum ($P(t+2)$). Auf diese Weise werden die Strukturen von Problem- und Lösungsraum kontinuierlich weiterentwickelt. Das Ziel der Entwickler besteht dabei in der Erarbeitung einer Übereinstimmung von Problem und Lösung.

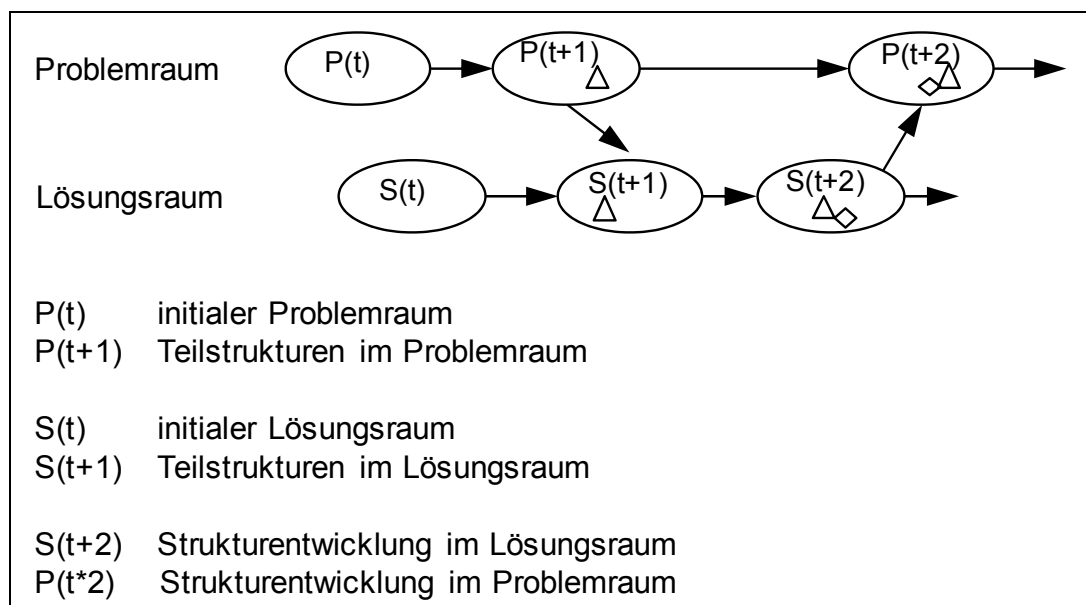


Bild 5-13: Entwicklung als Co-Evolution nach DORST und CROSS³²⁵

³²³ vgl. Maher 2000

³²⁴ vgl. Dorst & Cross 2001

³²⁵ vgl. Dorst & Cross 2001

Ein etablierter Forschungsansatz, der die Grundidee der Co-Evolution aufgreift, ist die **C-K-Theorie** von HATCHUEL und WEIL³²⁶. Die C-K-Theorie basiert auf der Beschreibung zweier, in gegenseitiger Wechselwirkung stehender und kontinuierlich expandierender Räume (vgl. Bild 5-14): dem Konzeptraum C (engl.: space of concepts) und dem Wissensraum K (engl.: space of knowledge). Wissen wird dabei als die Menge von Aussagen verstanden, die für den Entwickler einen logischen Status beinhalten, d.h. als richtig oder falsch bzw. zu einem bestimmten Grad als wahrscheinlich richtig bzw. falsch bewertet werden können. Ein Konzept dahingegen umfasst eine Menge von Aussagen die keinen logischen Status besitzen. Ein Konzept repräsentiert somit das unvollständige Wissen, welches ein Entwickler besitzt, während er über etwas nachdenkt bzw. mentale Modelle zu etwas bildet. Sobald ein Konzept einen Wahrheitswert besitzt gilt es als Wissen.

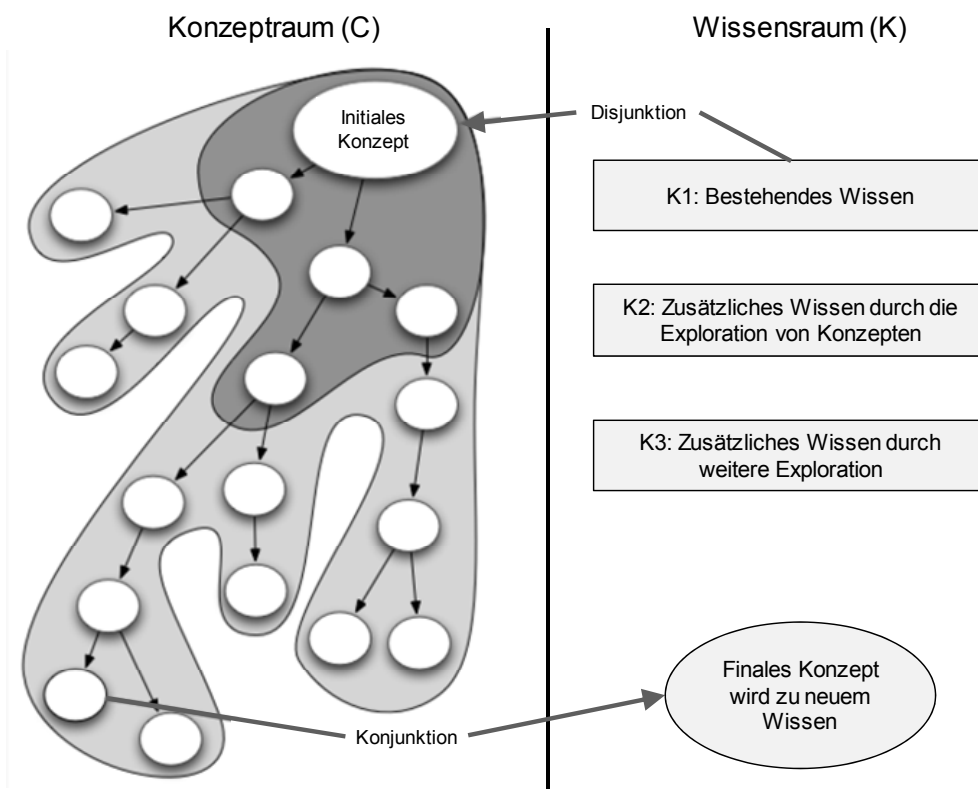


Bild 5-14: Expansion von Konzept- und Wissensraum nach HATCHUEL und WEIL³²⁷

HATCHUEL und WEIL³²⁸ erläutern ihren Ansatz anhand des beispielhaften Falles, dass ein Kunde seine Anforderungen formuliert und der Entwickler mit einem Gestaltungsvorschlag antwortet. Im Verständnis der C-K-Theorie stellen die Anforderungen hier ein erstes Konzept dar, das durch den Entwickler in ein zweites Konzept expandiert und, als Wissen formuliert, dem Kunden als Vorschlag präsentiert wird.

³²⁶ vgl. Hatchuel & Weil 2003, Hatchuel & Weil 2009

³²⁷ vgl. Hatchuel & Weil 2003

³²⁸ vgl. Hatchuel & Weil 2003, Lossak 2006, S.242ff.

Die C-K-Theorie beschreibt Produktentstehung als das co-evolutionäre Expandieren von Konzept- und Wissensraum. Dabei wird zwischen vier möglichen Operatoren unterscheiden, die entsprechend Bild 5-15 das sogenannte **Design Square** bilden.

K→C: Dieser Operator fügt Inhalte des Wissensraums zu Konzepten hinzu bzw. nimmt Inhalte des Wissensraums aus Konzepten heraus. Den Transformationsvorgang von Wissen zu einem Konzept wird als Disjunktion bezeichnet, da hier einzelne Wissens-elemente als potentielle „Keime“ für neuartige Lösungsalternativen aus dem Wissensraum herausgelöst werden.

C→K: Dieser Operator versucht Konzepte durch Aussagen mit logischem Status zu belegen und diese so in Wissen zu überführen. Dieser Vorgang wird als Konjunktion bezeichnet, da hier durch Validierungsaktivitäten (Konsultation von Experten, Durchführen von Experimenten, Prototypenbau und Mock-Ups) neue Wissens-elemente in den Wissensraum eingeordnet werden.

C→C: Dieser Operator repräsentiert die klassischen Regeln der Mengenlehre, durch welche die Expansion von Konzepten innerhalb des Konzeptraums erfolgen kann.

K→K: Dieser Operator repräsentiert die klassischen Regeln der (Aussagen-) Logik, durch welche die Expansion von Wissen innerhalb des Wissensraums erfolgen kann.

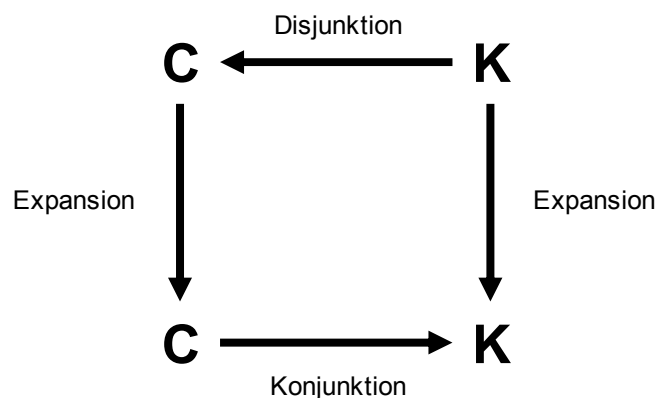


Bild 5-15: Vier Operatoren der C-K-Theorie (Design Square)³²⁹

HATCHUEL und WEIL³³⁰ beschreiben, dass ihr Ansatz bewusst die klassische Logik von Phasenmodellen, also ein sequentielles Vorgehen vom Abstrakten zum Konkreten bzw. vom Groben zum Detail, vermeidet. Sie verstehen Produktentstehung vielmehr als einen Vorgang begründenden Denkens, der grundsätzlich in einer unsicherheitsbehafteten Situation beginnt und erst durch das Wechselspiel von Kreativität und Wissens-expansion die Entwicklung innovativer Produkt ermöglicht.

³²⁹ vgl. Hatchuel & Weil 2003

³³⁰ vgl. Hatchuel & Weil 2003

5.2.3 Zwischenfazit

Aus der Berücksichtigung der Erkenntnisse, dass einerseits Wissen personengebunden und andererseits Produktentstehung ein wissensbasierter Prozess ist, bestätigt sich der Bedarf einer menschenzentrierten Modellierung. Von hoher Bedeutung für die Produktentstehung sind hier insbesondere der Umfang und die Belastbarkeit des bestehenden Wissens. In einem menschenzentrierten Modell, durch welches die kontinuierliche Verringerung von Unsicherheit abgebildet werden soll, nimmt die Wissensbasis des Handlungssystems folglich eine zentrale Rolle ein.

Die Differenzierung von Domänenwissen und fallspezifischem Wissen erlaubt zudem zwei grundlegende Maßnahmen zur Verringerung von Unsicherheit aufzuzeigen. Im Handlungssystem bestehende Wissenslücken können zum einen durch ergänzendes Domänenwissen, d.h. die kurz- oder langfristige Beteiligung von Fachspezialisten, zum anderen durch den Gewinn von fallspezifischem Wissen, also durch Situationsanalysen und Validierungsverfahren, geschlossen werden.

Die wissenschaftlichen Arbeiten zu Problem- und Lösungsraum bauen auf dem Ansatz der mentalen Modelle auf. Beide Räume stellen mentale, multidimensionale Repräsentationen dar, die primär das individuelle Verständnis des Problems bzw. der Lösungen abbilden, aber auch in Form geteilter mentaler Modelle im Team entwickelt und exploriert werden können.

Dabei ist der Problemraum ein essentieller Teil der Wissensbasis: Je umfassender das Verständnis und das Wissen um das bestehende Problem ist, desto genauer und vollständiger kann das Zielsystem definiert werden. Das Zielsystem wiederum definiert die Freiheitsgrade der Entwicklung und damit auch die Grenze des Lösungsraums, welche die Zulässigkeit möglicher Lösungen bestimmt. Die Exploration des Lösungsraums beinhaltet das kreative und künstlerische Erdenken neuer Lösungen. Der Lösungsraum kann somit nicht als Teil der Wissensbasis betrachtet werden, sondern stellt vielmehr ein ebenso wichtiges, aber doch eigenständiges Element des Handlungssystems dar.

Das Prinzip der Co-Evolution von Problem- und Lösungsraum berücksichtigt die anfängliche Unsicherheit in der Produktentstehung und beschreibt die wechselseitige Entwicklung der beiden Räume als kontinuierlichen Fortschritt. Die Sichtweise entspricht dem Prinzip der doppelten Kontingenz des ZHO-Modells, wobei hier Ziel- und Objektsystem das korrespondierende Paar zu Problem- und Lösungsraum bilden. Auch die C-K-Theorie ist ein co-evolutionärer Ansatz, wobei hier der stetige Zugewinn an Wissen und somit die kontinuierliche Verringerung von Unsicherheit durch die Operatoren $C \rightarrow K$ und $K \rightarrow K$ sogar explizit beschrieben wird.

5.3 Faktor Prozess – Iterative Analyse und Synthese

5.3.1 Analyse und Synthese

Der Prozess der Produktentstehung wird in vielen wissenschaftlichen Ansätzen als Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten beschrieben³³¹. Trotz der allgegenwärtigen Verwendung der beiden Begriffe *Analyse* und *Synthese*, gibt es Unterschiede in deren Verständnis, wobei dies mitunter auf Unterschiede im Kontext ihrer Verwendung zurückzuführen ist.

In ihrer ursprünglichen Bedeutung bezeichnet die Analyse das Zerlegen eines Ganzen in seine Einzelteile, während die Synthese das Zusammensetzen mehrerer Einzelteile zu einem Ganzen bezeichnet³³². In dieser Definition stellen Analyse und Synthese ein vollständig entgegengesetztes Handeln dar, was eine klare Trennung der beiden Begrifflichkeiten nicht nur möglich, sondern auch sinnvoll macht. Diese Art des Verständnisses der beiden Begriffe findet auch in der heutigen Produktentwicklung, z.B. bei der Produktstrukturierung nach SCHUH³³³ noch Anwendung.

Heutzutage besitzen die Begriffe Analyse und Synthese jedoch eine Bedeutung, die über das einfache Zerlegen und Zusammenfügen hinausgeht. Roozenburg³³⁴ untersucht in diesem Zusammenhang mehrere entwicklungsmethodische Ansätze und stellt dabei fest, dass die Begriffe in verschiedenen Prozessmodellen mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet werden. Bild 5-16 zeigt zwei exemplarische Prozessmodelle, die im Folgenden miteinander verglichen werden.

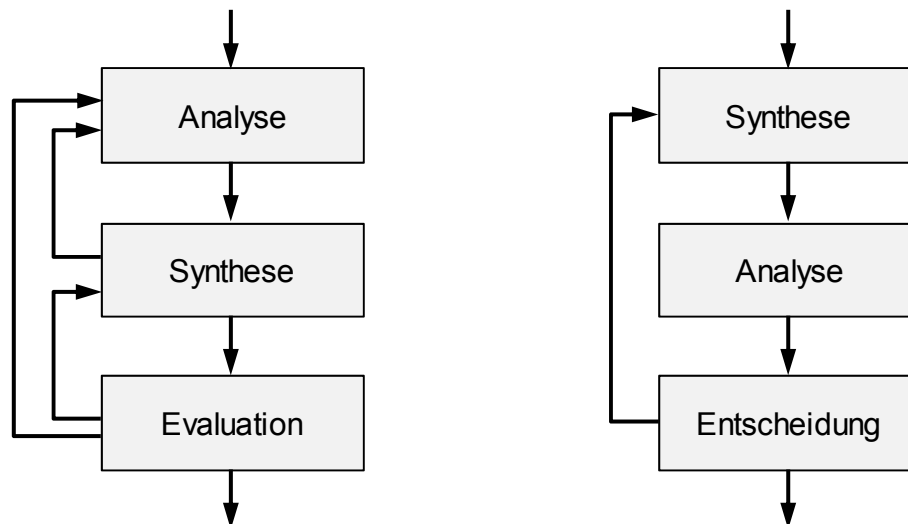


Bild 5-16: Einfache Prozessmodelle nach LAWSON (links) und PATZAK (rechts)³³⁵

³³¹ vgl. Lossack 2006, S.236ff.

³³² vgl. Hall 1962, S.109

³³³ vgl. Schuh 2005, S.119f.

³³⁴ vgl. Roozenburg 2002

³³⁵ vgl. Lawson 1980, S.28; Patzak 1982, S.83

Das **Prozessmodell nach LAWSON**³³⁶ beginnt mit einem Analyseschritt, der das Erkunden von Beziehungen, das Suchen nach Mustern innerhalb der verfügbaren Information und die Klassifizierung von Zielen umfasst. Im Anschluss erfolgt die Synthese, die LAWSON als das Bestreben voranzuschreiten und das Erschaffen einer Problemantwort charakterisiert. Dieses Modell versteht Analyse somit als das Ordnen und Strukturieren des Problems, die Synthese dagegen als das Generieren von Lösungen zu dem entsprechenden Problem. Im letzten Schritt des Modells erfolgt die Bewertung des Syntheseergebnisses. Hier werden die vorgeschlagenen Lösungen mit den in der Analyse identifizierten Zielen abgeglichen. Sofern keine zufriedenstellende Lösung entwickelt wurde, besteht die Notwendigkeit in die Analysephase oder aber in die Synthesephase zurückzukehren und entsprechende Anpassungen vorzunehmen. LAWSON bezeichnet diese Form der Iteration als Rückkopplungs-schleife (engl. return loop).

Das **Prozessmodell nach PATZAK**³³⁷ beginnt mit der Synthese, die PATZAK als den innovativen Schritt bezeichnet. Er versteht Synthese als ein Handlungselement, das im Hinblick auf die Zielvorstellung neue Sachverhalte synthetisiert und daher, einem heuristischen Vorgehen entsprechend, eher den Charakter einer „Kunst“ besitzt. Die darauf folgende Analyse ist, als deskriptiver Schritt, dahingegen ein Handlungselement, das eine Überprüfung des jeweils durch Zuwachs an Neuem erreichten Zustands beinhaltet, und daher dem algorithmischen Vorgehen entsprechend eher den Charakter einer Technik besitzt. Auch PATZAK schließt sein Modell mit einem Bewertungsschritt ab, der ebenso wie die Evaluation bei LAWSON einen selektiven Charakter besitzt. Auch in diesem Modell ist im Falle eines unzureichenden Ergebnisses eine Iteration vorgesehen, die hier jedoch das erneute Durchlaufen aller im Modell enthaltenen Phasen beinhaltet.

Im Vergleich der beiden Modelle ist ersichtlich, dass die Abfolge von Analyse und Synthese variiert. Der scheinbare Widerspruch der beiden Modelle erklärt sich durch die Betrachtung der zugrundeliegenden Verständnisse des Analysebegriffs. Während die Analyse im Modell nach LAWSON das Ziel verfolgt, die Problem- und Aufgabenstellung zu verstehen, um eine zielgerichtete Synthese durchführen zu können, sieht die Analyse im Verständnis von PATZAK vor, eine Bewertung und Vergleichbarkeit der Syntheseergebnisse möglich zu machen. LAWSON und PATZAK betrachten in ihrer Analyse folglich verschiedene Systeme, der Zweck der Analyse ist jedoch derselbe: Es gilt das betrachtete System hinreichend zu verstehen, um den Zustand einer Handlungsfähigkeit, im Sinne einer Synthesefähigkeit, zu erreichen.

³³⁶ vgl. Lawson 1980, S.22ff.

³³⁷ vgl. Patzak 1982, S.83

Auch GRAMANN³³⁸ setzt sich in seiner Forschungsarbeit mit dem Verständnis von Analyse und Synthese in Produktentstehungsprozessen auseinander. Er spricht sich dafür aus, dass keinesfalls der Eindruck entstehen darf, dass Analyse und Synthese zwei große unabhängige Phasen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses seien. Die deutliche Trennung dieser beiden Phasen führt häufig dazu, dass auch eine thematisch getrennte Darstellung von eindeutig entweder der Analyse oder der Synthese zugeordneten Methoden vorgenommen wird.

GRAMANN führt weiter aus, dass die Prozesse der Analyse und Synthese auf kognitiver Ebene sehr stark miteinander verzahnt sind, da sie sowohl am gleichen Ort (im Arbeitsgedächtnis), als auch nahezu zur gleichen Zeit erfolgen:

Das im Arbeitsgedächtnis auf Analyse basierend generierte Problemmodell („generieren“ – also schon hier Synthese!) wird mit potenziellen, auf externen Informationen und Wissen basierenden Lösungen verglichen. Dabei muss zwangsläufig von einer gegenseitigen Beeinflussung ausgegangen werden. Lösungsansätze beeinflussen unser Problemmodell, und sei es nur in der Form, dass wir uns durch einen Lösungsansatz plötzlich mit einem bisher nicht berücksichtigten Punkt konfrontiert sehen. Reflektiert man eigenes Vorgehen, so wird man sich dabei ertappen, dass man sich in offiziellen Analysephasen notwendigerweise bereits mit Lösungsansätzen befasst. „Synthese zum Zwecke der Analyse“ hört sich aber auch heute noch für viele Methodiker paradox an³³⁹.

Nachdem der vorangegangene Vergleich der Prozessmodelle bereits gezeigt hat, dass zwischen der Analyse des Problems und der Analyse einer Lösung unterschieden werden muss, stellt GRAMANN nun auch zwei unterschiedliche Arten der Synthese fest: die Synthese des Problemmodells und die Synthese der Lösungen. Zudem zeigt er auf, dass diese beiden Synthesevorgänge in gegenseitiger Beeinflussung zueinander stehen oder auch, anders formuliert, Problem und Lösung eine co-evolutionäre Entwicklung bestreiten.

Auch ROOZENBURG³⁴⁰ fordert, Analyse und Synthese nicht als zwei verschiedene Methoden zu betrachten, sondern zu erkennen, dass es sich um zwei notwendige Bestandteile ein und derselben Methode handelt. Der Synthese geht immer eine Analyse voraus, der Analyse immer eine Synthese. Synthese und Analyse sind folglich untrennbar miteinander verknüpft³⁴¹.

³³⁸ vgl. Gramann 2004, S.39ff.

³³⁹ vgl. Gramann 2004, S.40

³⁴⁰ vgl. Roozenburg 2002

³⁴¹ vgl. Matthiesen 2011

Die Konstruktionslehre nach PAHL/BEITZ³⁴² beschreibt Analyse und Synthese nicht als Prozessbausteine, sondern als „allgemein wiederkehrende Methoden“. Diese Sichtweise bietet den Vorteil, die Begriffe nicht über ihre Abfolge oder ihr Bezugssystem, sondern über ihren grundlegenden Zweck zu definieren:

Die **Analyse** ist in ihrem Wesenskern Informationsgewinnung durch Zerlegen und Aufgliedern sowie durch Untersuchen der Eigenschaften einzelner Elemente und der Zusammenhänge zwischen ihnen. Es geht dabei um Erkennen, Definieren, Strukturieren und Einordnen. Die gewonnenen Informationen werden zu einer Erkenntnis verarbeitet.

Die **Synthese** ist in ihrem Wesenskern Informationsverarbeitung durch Bilden von Verbindungen, durch Verknüpfen von Elementen mit insgesamt neuen Wirkungen und das Aufzeigen einer zusammenfassenden Ordnung. Es ist der Vorgang des Suchens und Findens sowie des Zusammensetzen und Kombinierens.

Diese Definitionen beschreiben den Wesenskern der Analyse und der Synthese jedoch noch nicht eindeutig genug. Beispielsweise beinhaltet die Analyse ein Strukturieren und Einordnen, wobei auch die Synthese eine zusammenfassende Ordnung aufzeigen soll. Auch die Beschreibung, dass in der Analyse Informationen zu einer Erkenntnis verarbeitet werden, die Informationsverarbeitung generell aber eher der Synthese zugesprochen wird, erscheint widersprüchlich.

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher auf den grundlegenden Zweck und das wesentliche Ergebnis reduzierte Definitionen von Analyse und Synthese verwendet:

Definition 5-5: Analyse (engl.: analysis)

Die Analyse beschreibt eine Handlung, die das Verstehen eines existierenden Systems bezweckt. Das Resultat einer Analyse ist Erkenntnis.

Definition 5-6: Synthese (engl.: synthesis)

Die Synthese beschreibt eine Handlung, die das Erschaffen eines bis dato noch nicht existierenden Systems bezweckt. Das Resultat einer Synthese ist ein Ziel oder ein Objekt.

Im Zusammenhang mit diesen Definitionen ist jedoch zu beachten, dass, wie PULM³⁴³ es formuliert, für das Verständnis von Prozessen weniger die Verknüpfung oder Umformulierung der Prinzipien Analyse und Synthese von Bedeutung ist, sondern eher die Länge und Dynamik hieraus gebildeter Schleifen.

³⁴² vgl. Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, S.74ff.

³⁴³ vgl. Pulm 2004, S.45

5.3.2 Iteration

Iteration ist im Zusammenhang mit Produktentstehungsprozessen ein viel verwendeter, jedoch auch vielseitig verwendeter Begriff. Entsprechend seines etymologischen Ursprungs (von lat.: iterare „wiederholen“) wird unter dem Begriff der Iteration zumeist das Wiederholen von Entwicklungsaktivitäten verstanden. COSTA und SOBEK³⁴⁴ beschreiben, dass es sich dabei jedoch nicht um die Wiederholung eines exakt gleichen Arbeitsschrittes handelt, sondern Iteration in der Produktentstehung vielmehr einen Zyklus aus dem Sammeln von Information, dem Verarbeiten dieser Information, dem Erkennen möglicher Entwicklungswege und dem zielgerichtetem Umsetzen dieser Entwicklungswege beinhaltet.

WYNN³⁴⁵ unterscheidet zwischen insgesamt sechs nicht-orthogonalen Perspektiven von Iterationen, wobei die ersten fünf Perspektiven Iterationsschleifen beinhalten, die unter Verwendung verschiedener Methoden ein bestimmtes Ziel verfolgen, während die sechste Perspektive, Iterationsschleifen zusammenfasst, in welchen durch Anwendung derselben Methode unterschiedliche Ziele erreicht werden:

- Exploration: Iteration zum Erkunden von Problem- und Lösungsraum
- Konvergenz: Iteration zur Annäherung an einen definierten Zielzustand
- Verfeinerung: Iteration zur Optimierung im Detail
- Nachbesserung: Iteration zur Anpassung an geänderte Randbedingungen
- Verhandlung: Iteration zur Klärung von Zielkonflikten
- Wiederholung: Iteration im Sinne von wiederholtem ähnlichen Vorgehen

WYNN, ECKERT und CLARKSON³⁴⁶ beschreiben, dass das Auftreten der genannten Iterationstypen entlang des Produktentstehungsprozesses variiert. Während zu Beginn des Prozesses noch maßgeblich Iterationen zur Exploration durchlaufen werden, verlagert sich der Schwerpunkt mit zunehmender Produktreife in Richtung Konvergenz und Verfeinerung. Hier gewinnen auch Iterationen des Typs Verhandlung stärker an Gewicht, da nun auch quantifizierbare Zielkonflikte erkennbar werden. Anschließende Validierungsaktivitäten, wie z.B. Spannungsanalysen, werden aufgrund des von der Methode bestimmten Vorgehens als Iteration im Sinne einer Wiederholung verstanden. Auch im fortgeschrittenen Prozess können weitere Iterationen vom Typ Verhandlung oder Nachbesserung erforderlich sein.

³⁴⁴ vgl. Costa & Sobek 2003

³⁴⁵ vgl. Wynn 2007, S.75ff.

³⁴⁶ vgl. Wynn, Eckert & Clarkson 2007

Die Modellierung von Iterationen erfolgt zumeist unter Verwendung einfacher Basismodelle, wie beispielweise der TOTE-Einheit nach MILLER, GALANTER und PRIBRAM³⁴⁷ oder dem PDCA-Zyklus nach DEMING³⁴⁸.

Die **TOTE-Einheit** ist ein Modell, das insbesondere in der Psychologie und der Kybernetik zur Repräsentation von Problemlösungsprozessen verwendet wird. Das Akronym TOTE beschreibt dabei den Regelkreis Test-Operate-Test-Exit der solange durchlaufen wird, bis ein zuvor definierter Sollzustand oder ein zusätzliches Abbruchkriterium, wie z.B. maximale Dauer, erreicht ist (vgl. Bild 5-17)³⁴⁹. HACKER³⁵⁰ bezeichnet diese Form der Iteration auch als Erzeugungs-Bewertungs-Zyklus, in dem hypothesengeleitet Lösungen entwickelt und auf ihre Brauchbarkeit eingeschätzt werden. Diese Zyklen können als fortlaufende Fehlerkorrekturprozesse zusätzlich zur zielgerichteten Lösungsentwicklung angesehen werden.

Der **PDCA-Zyklus**, auch Demingkreis genannt, ist ein Modell, das seine Ursprünge in der Qualitätssicherung hat und auch als Zyklus zur kontinuierlichen Verbesserung bezeichnet wird. Der PDCA-Zyklus beschreibt eine Iteration als einen Zyklus aus den vier aufeinanderfolgenden Schritten Plan-Do-Check-Act³⁵¹. (1) *Plan* umfasst dabei das Erkennen von Verbesserungspotentialen, die Analyse des aktuellen Zustands sowie das Entwickeln neuer Ansätze. (2) *Do* bedeutet das kurzfristige Testen und pragmatische Optimieren des neuen Ansatzes. (3) *Check* steht für die sorgfältige Überprüfung der Testresultate und gegebenenfalls der Freigabe für (4) *Act*, die Umsetzung des Verbesserungsansatzes in der gesamten Breite.

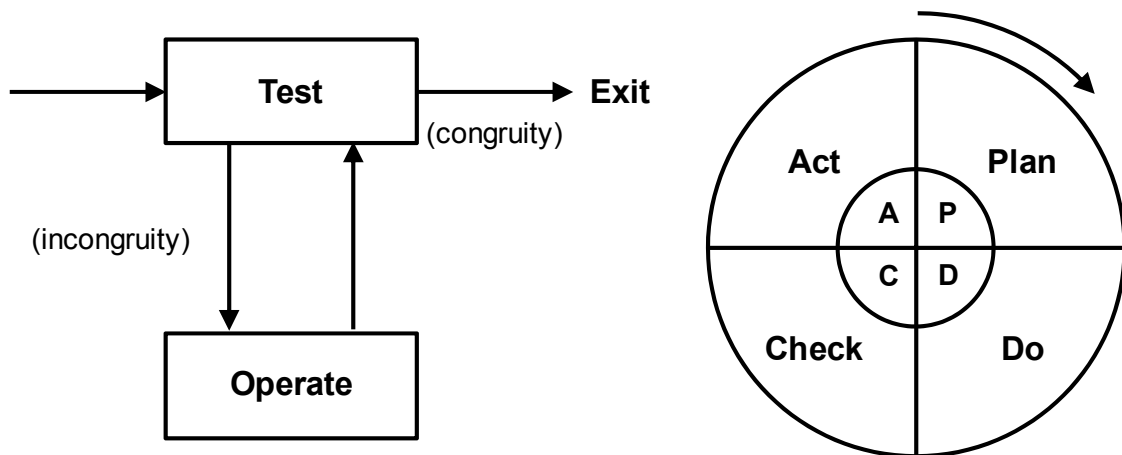


Bild 5-17: Basismodelle: TOTE-Einheit (links) und PDCA-Zyklus (rechts)³⁵²

³⁴⁷ vgl. Miller, Galanter & Pribram 1960, S.26

³⁴⁸ vgl. Deming 1982, S.88

³⁴⁹ vgl. Ehrlenspiel 2007, S.81ff.

³⁵⁰ vgl. Hacker 2005, S.560; Müller 2007, S.75

³⁵¹ vgl. Unger 2003, S.58

³⁵² vgl. Ehrlenspiel 2007, S.82; Unger 2003, S.59

Das **Unified Innovation Process Model** nach SKOGSTAD und LEIFER³⁵³ ist ein Vorgehensmodell, das im Forschungsfeld des *Design Thinking* entwickelt wurde. Der Kern des Modells setzt sich aus drei Aktivitäten zusammen, durch welche ein Wunsch in eine Lösung überführt wird (vgl. Bild 5-18). *Plan* umfasst dabei die Ideenfindung im Sinne eines Vordenkens der Lösung. In der Aktivität *Execute* erfolgt die Umsetzung der Ideen in Form physischer Modelle, d.h. es werden zunächst Skizzen, dann Prototypen erstellt. *Synthesize* beinhaltet letztlich das Zusammenetzen von Teillösungen sowie das Testen des Gesamtsystems.

Den wesentlichen Teil des Modells bilden jedoch die darin enthaltenen Iterationen. SKOGSTAD und LEIFER betonen die Wichtigkeit, den Entwicklern die Möglichkeit zu bieten, ihre im Prozess gewonnenen Erkenntnisse direkt wieder einfließen zu lassen. Sie unterscheiden dazu zwischen drei Typen von Iterationen. *Re-plan* bezeichnet eine Iteration die dann auftritt, wenn die Ergebnisse der Aktivität *Synthesize* so stark von den gemachten Erwartungen abweichen, dass der zuvor definierte Lösungsansatz unter Verwendung des gerade gewonnenen Wissens neu überdacht werden muss. *Revise* steht für einen Iteration, die eintritt, wenn die prototypische Umsetzung der Lösung den abschließenden Test nicht besteht und angepasst werden muss. Als die häufigste auftretende Form einer Iteration wird das *Rework* genannt. Gemeint ist damit der iterative Prozess, der solange durchlaufend wird, bis eine Lösung von den Entwicklern als ausreichend gut bewertet wird.

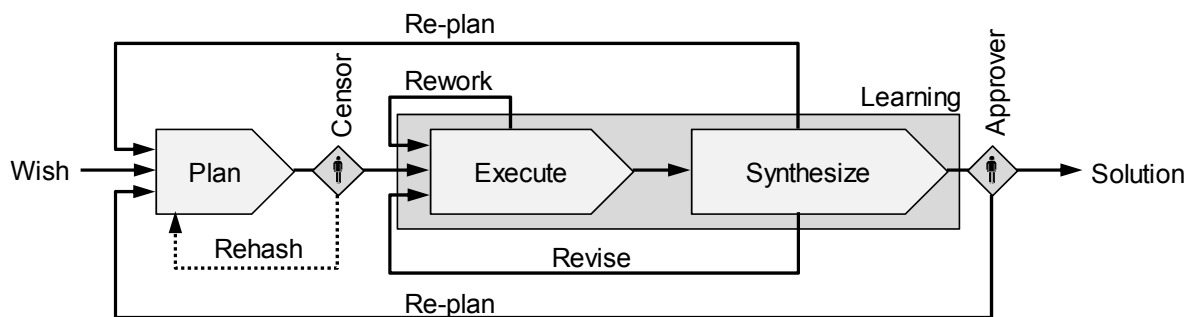


Bild 5-18: Unified Innovation Process Model nach SKOGSTAD und LEIFER³⁵⁴

Das Modell stellt Iterationen als **Prüf- und Lernzyklen**³⁵⁵ dar, die notwendigerweise zu durchlaufen sind, um zu einer ausreichend guten Lösung zu gelangen. Die verschiedenen Iterationstypen zeigen, dass sowohl in der direkten Reflexion des Handelns, aber insbesondere auch bei der Validierung von Lösungen fallspezifisches Wissen gewonnen wird und so bestehende Unsicherheiten vermindert werden.

³⁵³ vgl. Skogstad & Leifer 2011

³⁵⁴ vgl. Skogstad & Leifer 2011

³⁵⁵ vgl. Lindemann & Lorenz 2008

LE, WYNN und CLARKSON³⁵⁶ untersuchen die positiven und negativen Einflüsse von Iterationen auf Produktentstehungsprozesse. Sie stellen fest, dass sich zwei grundlegend verschiedene Sichten auf Iterationen etabliert haben. Die eine Sicht versteht Iterationen als unproduktive Nacharbeit, die infolge fehlerhafter Entwicklung und unzureichender Qualitätssicherung auftritt. Die andere Sicht betrachtet Iterationen als notwendig, um die Komplexität des Entwicklungsproblems systematisch verstehen und den Lösungsraum effizient erkunden zu können. Diese beiden Sichten können dem Management und der Entwicklung zugeordnet werden. Dabei sind die verschiedenen Standpunkte auch in einem unterschiedlichen Verständnis des Entwicklungsprozesses begründet (vgl. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Sichtweisen auf Prozess und Iteration nach MEBOLDT und MATTHIESEN³⁵⁷

	Prozess	Iteration
Sicht der Entwicklung	Jeder Entwicklungsprozess ist einzigartig und geprägt von den in ihm auftretenden Problemen, die immer anders sind.	Iterationen sind alltäglich. Sie sind essentielle Lernzyklen, die einen kontinuierlichen Wissensgewinn und so eine Verringerung der Unsicherheit erlauben.
Sicht des Managements	Der Entwicklungsprozess ist ein verbindlicher Standard. Er ist essentiell, um die Kommunikation, die Ressourcen und Investitionen im Unternehmen zu steuern.	Iterationen sind Ausnahmen. Sie kosten Zeit und Geld. Iterationen müssen unterbunden werden. Das Ziel ist ein iterationsfreier Prozess: „Mach's gleich richtig!“

MEBOLDT und MATTHIESEN³⁵⁸ beschreiben, dass die Managementsicht insbesondere durch die beiden folgenden Annahmen geprägt ist:

- Wenn eine Iteration vorhersagbar ist, dann ist sie vermeidbar.
- Wenn eine Iteration nicht vorhersagbar ist, dann ist sie nicht planbar.

Daraus ergibt sich das grundlegende **Dilemma**, dass unabhängig davon ob Iterationen vorhergesagt werden können oder nicht, sie im Projektplan nicht explizit aufgeführt werden. Zur Überwindung dieses Dilemmas müssen die Sichtweisen von Entwicklung und Management näher zusammengebracht werden. Hier unterstützen Modelle, welche die Unvermeidbarkeit von Iterationen erklären und dabei auch ihren Wert, z.B. die kontinuierliche Zunahme des Entwicklungsreifegrads³⁵⁹, abbilden.

³⁵⁶ vgl. Le, Wynn & Clarkson 2010

³⁵⁷ vgl. Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer 2012

³⁵⁸ vgl. Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer 2012

³⁵⁹ vgl. Krehmer, Meerkamm & Wartzack 2009

5.3.3 Zwischenfazit

Die Begriffe Analyse und Synthese sind im Kontext heutiger Produktentstehungsprozesse nicht auf die Bedeutung eines einfachen Zerlegens und Zusammensetzens zu reduzieren. Analyse und Synthese sind vielmehr vom Entwickler durchgeführte Handlungen, wobei eine Analyse das Verstehen eines existierenden Systems bezweckt, während eine Synthese das Erschaffen eines bis dato nicht existierenden Systems beinhaltet. Ausgehend von der Annahme, dass einerseits zweckmäßiges Erschaffen ein gewisses Maß an Verstehen voraussetzt und andererseits Erschaffen ein tieferes Verstehen ermöglicht, kann gefolgert werden, dass der Synthese immer eine Analyse und der Analyse immer eine Synthese vorausgeht.

Der Vergleich der Prozessmodelle nach PATZAK und LAWSON zeigt zudem, dass unterschieden werden muss zwischen einer Ziel- und Problemanalyse und einer Analyse von (Lösungs-)Objekten. Ähnlich verhält es sich mit der Synthese von Ziel- und Objektsystemen. In der Folge gilt es in der Produktentstehung zwischen insgesamt vier Schritten zu unterscheiden: (1) der Synthese des Zielsystems, (2) der Analyse des Zielsystems, (3) der Synthese des Objektsystems und (4) der Analyse des Objektsystems.

Der kontinuierliche Wechsel von Synthese- und Analyseschritten beschreibt Produktentstehung als einen iterativen Prozess. Dies zeigt sich auch in den einfachen Modellen iterativer Prozessabläufe. Hier greifen Analyseschritte (Test, Plan, Check) und Syntheseschritte (Operate, Do, Act) direkt ineinander und bilden so Zyklen, in welchen der Reifegrad der Entwicklung kontinuierlich erhöht wird. Diese Modelle stellen Iterationen als Prüf- und Lernzyklen dar, die notwendigerweise zu durchlaufen sind, um fallspezifisches Wissen zu gewinnen und so eine ausreichend guten Lösung entwickeln zu können.

Während aus Sicht der Entwicklung Iterationen als notwendig erachtet werden, um die Komplexität des Entwicklungsproblems systematisch verstehen und den Lösungsraum effizient erkunden zu können, werden Iterationen aus Sicht des Managements zumeist als vermeidbare Wiederholungen ohne jegliche Wertschöpfung dargestellt. Aus diesem Verständnis resultiert das Iterationsdilemma, welches darin besteht, dass Iterationen unabhängig davon, ob sie vorhergesagt werden können oder nicht, in Projektplänen nicht berücksichtigt werden.

Ein Modell, durch das die iterative Weiterentwicklung von Ziel- und Objektsystem sowie der Abgleich der beiden Systeme durch das Handlungssystem abgebildet werden kann, erlaubt hier ein Erklären der Notwendigkeit und der Unvermeidbarkeit von Iterationen in der Produktentstehung und bietet so das Potential, die Sichten von Entwicklung und Management näher zusammenzubringen.

6 Erweitertes ZHO-Modell

In diesem Kapitel wird ausgehend von dem ZHO-Modell der Systemtechnik ein erweitertes Modell entwickelt, das sowohl die zentralen Hypothesen nach ALBERS aufgreift, als auch die in der theoretischen Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse zu den Faktoren Mensch, Wissen und Prozess beinhaltet. Die wesentlichen Aussagen sind hier noch einmal zusammengefasst.

Der Mensch steht im Mittelpunkt der Entwicklung. Er ist es, der ein zunächst vages Zielsystem in ein konkretes Objektsystem überführt. Der Mensch kann folglich als Handlungssystem verstanden werden, welches in stark reflexiven Denk- und Handlungsprozessen Entwicklungsfreiräume aufdeckt, darin Lösungen zunächst in Form mentaler Modelle vorausdenkt und diese dann als virtuelle oder physische Objekte umsetzt.

Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell. Die Diversität und Dynamik von Produktentstehungsprozessen führt dazu, dass jede Entwicklung mit einem gewissen Maß an Unsicherheit einhergeht. Ein wesentlicher Teil der Entwicklung besteht folglich darin, bestehende Unsicherheiten durch den Gewinn fallspezifischen Wissens schrittweise abzubauen. Dies geschieht entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses durch Aktivitäten der Validierung.

Ziel- und Objektsystem werden in gegenseitiger Wechselwirkung entwickelt. Die Co-Evolution der beiden Systeme erfolgt in Form iterativer Erzeugungs-Bewertungs-Zyklen, d.h. die Analyse des einen Systems ist die Voraussetzung für die Synthese des anderen. Diese Iterationen sind nicht nur unvermeidbar, sondern erlauben erst den Aufbau eines ganzheitlichen Problemverständnisses und somit auch das Definieren richtiger Ziele sowie das Erkennen relevanter Randbedingungen.

Im Folgenden wird auf Basis der drei grundlegenden Systeme Ziel-, Handlungs- und Objektsystem schrittweise das **erweiterte ZHO-Modell** (engl.: Advanced System Triple) aufgebaut. Das erweiterte ZHO-Modell erlaubt durch die zusätzlichen Subsysteme **Wissensbasis** und **Lösungsraum** die vertiefte Betrachtung der Interaktion menschlichen Denkens und Handelns innerhalb des Systems der Produktentstehung. Dabei ist zu beachten, dass im erweiterten ZHO-Modell das Handlungssystem nicht wie im integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM) durch Aktivitäten, Phasen und Ressourcen, sondern durch den Menschen selbst in seiner Funktion als Entwickler, einschließlich seines Wissens und Vorstellungsvermögens, repräsentiert wird. Ausgehend von dieser menschenzentrierten Sichtweise wird die iterative und co-evolutionäre Entwicklung des Zielsystems und des Objektsystems in einem unsicherheitsbehafteten Produktentstehungsprozess erläutert.

6.1 Aufbau des erweiterten ZHO-Modells

6.1.1 Mensch als Handlungssystem

Das erweiterte ZHO-Modell basiert auf dem Systemtripel aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem. Das Handlungssystem bildet dabei den Kern des Modells. Es stellt den Entwickler dar, welcher zwei für die Produktentstehung essentielle Elemente mitbringt: seine individuelle Wissensbasis und seine Fähigkeit einen mentalen Lösungsraum aufzuspannen (vgl. Bild 6-1). Die Wissensbasis³⁶⁰ beinhaltet dabei sowohl das domänenspezifische Vorwissen des Entwicklers als auch sein fallspezifisches Wissen, das zum Teil erst im Produktentstehungsprozess gewonnen werden kann. Der Lösungsraum³⁶¹ beschreibt den mentalen Raum aller zulässigen Lösungen zu einem Problem. Je besser das Problem verstanden ist, desto eindeutiger kann der Lösungsraum begrenzt werden.

In Abhängigkeit des betrachteten System-of-Interest³⁶² kann das Handlungssystem auch mehr als einen Menschen beinhalten. Auf diese Weise kann die Entwicklungstätigkeit im Team oder auch die Integration eines Kunden abgebildet werden. Besteht das Handlungssystem aus mehreren Menschen, kommt es zu Überlagerungseffekten von individuellen Wissensbasen und subjektiven Lösungsräumen. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit zu Synergieeffekten, wie z.B. die Bildung geteilter mentaler Modelle, zum anderen aber auch Hindernisse der kooperativen Entwicklungsarbeit, wie z.B. Missverständnisse, erklären zu können.

Im Produktentstehungsprozess entwickelt das Handlungssystem sowohl das Zielsystem als auch das Objektsystem. Ziel- und Objektsystem stehen dabei in starker wechselseitiger Abhängigkeit zueinander. Durch die im erweiterten ZHO-Modell dargestellten Elemente *Wissensbasis* und *Lösungsraum* ergeben sich die grundlegenden Schnittstellen, um den iterativen Prozess der co-evolutionären Entwicklung von Ziel- und Objektsystem durchgängig abbilden zu können.

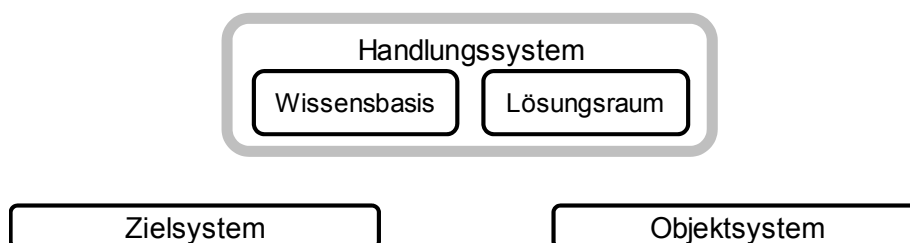


Bild 6-1: Ziel, Handlungs- und Objektsystem als Basis des erweiterten ZHO-Modells

³⁶⁰ vgl. Kapitel 5.2.1

³⁶¹ vgl. Kapitel 5.2.2

³⁶² vgl. Kapitel 2.4.2

6.1.2 Analyse des Objektsystems

Die meisten Produktentstehungsprozesse beginnen nicht auf dem „weißen Blatt Papier“³⁶³, sondern orientieren sich an bestehenden Produkten, wie z.B. Vorgänger- und Wettbewerberprodukten sowie branchenfremden Produkten mit übertragbaren Lösungselementen. Zu diesen Produkten existiert für gewöhnlich bereits eine unternehmenseigene Wissensbasis, wobei das darin enthaltene Wissen personengebunden auf die einzelnen Mitarbeiter aus Entwicklung, Produktion, Einkauf und Vertrieb verteilt ist. Die einzigartige Ausprägung bestimmten Wissens kennzeichnet im Allgemeinen die Kernkompetenzen eines Unternehmens, so dass eine zentrale Aufgabe der Entwicklung darin besteht, eben diese Kernkompetenzen bei der Entwicklung neuer Produkte zu berücksichtigen und sie ggf. auszubauen.

Zu Beginn eines Produktentstehungsprozesses gilt es, die bestehende Wissensbasis um fallspezifisches Wissen, wie z.B. erkannte Kundenbedürfnisse oder identifizierte Verbesserungspotentiale, zu ergänzen. Es werden dazu Objekte, d.h. Informationsträger, wie z.B. bestehende Produkte oder abgeschlossene Projektdokumentationen, untersucht und ausgewertet. Dieser Prozess wird im erweiterten ZHO-Modell als Analyse des Objektsystems beschrieben, die das Handlungssystem ausführt, um seine Wissensbasis zu vergrößern und so bestehende Unsicherheiten (hier in Form von Wissenslücken) zu reduzieren (vgl. Bild 6-2).

Im Verlauf des Produktentstehungsprozesses entstehen zusätzliche Objekte, wie z.B. virtuelle oder physische Prototypen, die das Objektsystem erweitern und durch deren Analyse in verschiedenen Prüfverfahren Erwartungen, z.B. an die Funktionserfüllung, verifiziert oder falsifiziert werden können. Die im Zielsystem enthaltenen Ziele dienen hier primär als Bewertungskriterien. Des Weiteren werden bei der Durchführung von Tests (insbesondere bei solchen unter Realbedingungen) oftmals bislang unbekannte Ziele und Randbedingungen identifiziert. Der Umfang und die Belastbarkeit der Wissensbasis nehmen durch die in den Analysen des Objektsystems gewonnenen Erkenntnisse somit stetig zu.

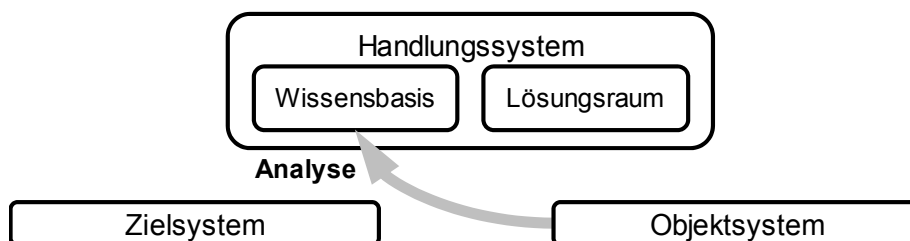


Bild 6-2: Analyse des Objektsystems im erweiterten ZHO-Modell

³⁶³ „History matters – no design begins with an absolutely clean sheet of paper.“ (Bucciarelli, 1994)

6.1.3 Synthese des Zielsystems

Die Synthese des Zielsystems im erweiterten ZHO-Modell beinhaltet das explizite Festlegen, Verfeinern und Ändern von Zielen und Randbedingungen. Das Handlungssystem entscheidet hier auf Grundlage seiner Wissensbasis, welche Elemente aus welchem Grund Teil des Zielsystems werden (vgl. Bild 6-3). Dabei sind die im Zielsystem enthaltenen Ziele ein Ausdruck von wertbezogenen Erwartungen an das zu entwickelnde Produkt.

Zu Beginn eines Produktentstehungsprozesses liegt oftmals wenig fallspezifisches Wissen vor, so dass die Definition des initialen Zielsystems³⁶⁴ auf stark unsicherheitsbehafteten Entscheidungen beruht. Im Verlauf des Prozesses wird zusätzliches Wissen gewonnen, welches das Handlungssystem dazu befähigt, das Zielsystem kontinuierlich zu erweitern. Hier ist zwischen drei Möglichkeiten zu unterscheiden:

- Festlegen (engl.: define) beinhaltet die Aufnahme neuer Ziele und Randbedingungen ins Zielsystem. Diese sind in der Regel durch neu hinzu gewonnenes fallspezifisches Wissen begründet.
- Verfeinern (engl: refine) bezeichnet die Konkretisierung von bereits definierten Zielen und Randbedingungen. Verfeinerungen können zumeist in Folge von Verifikationen bei der Analyse des Objektsystems vorgenommen werden.
- Ändern (engl: redefine) umfasst das Ändern von bereits definierten Zielen und Randbedingungen. Änderungen müssen zumeist in Folge von Falsifikationen bei der Analyse des Objektsystems vorgenommen werden.

Durch das explizite Festlegen, Verfeinern und Ändern von Zielen entsteht zwar kein zusätzliches Wissen, dennoch wird hier Unsicherheit insofern verringert, als dass Definitionslücken³⁶⁵ kontinuierlich geschlossen und so die folgenden Entwicklungstätigkeiten fokussierter durchgeführt werden können.

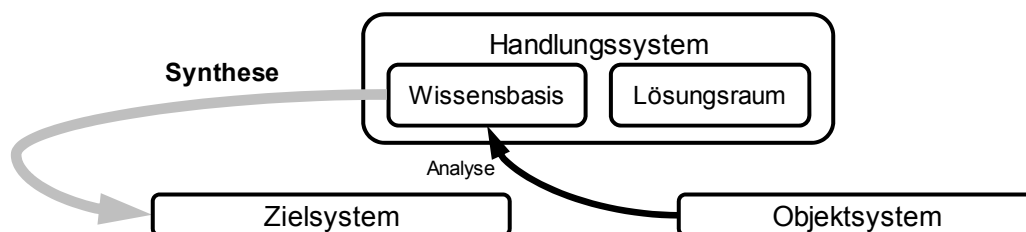


Bild 6-3: Synthese des Zielsystems im erweiterten ZHO-Modell

³⁶⁴ vgl. Kapitel 2.7.3

³⁶⁵ vgl. Kapitel 2.1.2

6.1.4 Analyse des Zielsystems

Im erweiterten ZHO-Modell umfasst die Analyse des Zielsystems dessen subjektive Wahrnehmung und Interpretation sowie das individuelle Eingrenzen des Lösungsraums. Das Zielsystem in seiner expliziten Form ist immer ein Modell, d.h. es ist eine zweckgebundene, verkürzte Repräsentation³⁶⁶ der Wissensbasis. Die explizite Beschreibung des Zielsystems kann folglich niemals alle Aspekte einer Zielvorstellung beinhalten. Es ist zudem zu beachten, dass hier verschiedene Repräsentationsformen des Zielsystems möglich sind, welche grundlegende Unterschiede im Hinblick auf Informationsumfang und Informationsdichte aufweisen.

Informationsumfang und Informationsdichte spielen insbesondere bei der subjektiven Wahrnehmung des Zielsystems eine wesentliche Rolle. Repräsentationsformen wie Lastenhefte, die nicht selten mehrere hundert Seiten umfassen, besitzen einen hohen Informationsumfang, sind von einem einzelnen Menschen jedoch kaum vollständig zu erfassen. Anforderungslisten dahingegen geben aufgrund ihrer hohen Informationsdichte einen schnellen Überblick, vernachlässigen dabei jedoch wesentliche Informationsinhalte wie z.B. Begründungen oder Wechselwirkungen. Aktuelle Ansätze zur Anforderungsstrukturierung bzw. Anforderungsmodellierung³⁶⁷ versuchen daher ein ausgewogenes Verhältnis von Informationsumfang und Informationsdichte zu realisieren. Filteroptionen erlauben hier individuelle Anpassungen. Transformationsverfahren bieten zudem die Möglichkeit zwischen verschiedenen Repräsentationsformen zu wechseln.

Die subjektiv wahrgenommenen Zielinformationen werden im Weiteren individuell interpretiert bzw. mental redefiniert³⁶⁸. Aus dieser Redefinition heraus bildet der Entwickler die Begrenzung seines mentalen Lösungsraums. Besteht das Handlungssystem aus mehreren Entwicklern, entstehen an dieser Stelle trotz desselben explizit beschriebenen Zielsystems unterschiedliche Lösungsräume.

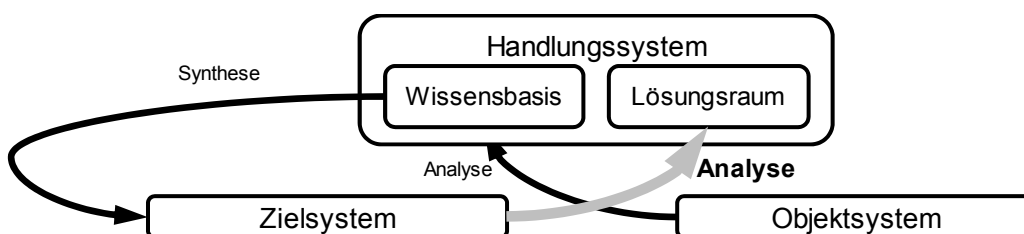


Bild 6-4: Analyse des Zielsystems im erweiterten ZHO-Modell

³⁶⁶ vgl. Kapitel 2.2.2

³⁶⁷ vgl. Kapitel 2.6.3 und Kapitel 2.6.4

³⁶⁸ vgl. Kapitel 5.2.2

6.1.5 Synthese des Objektsystems

Die Synthese des Objektsystems beinhaltet die mentale, virtuelle und physische Modellierung von Prinzip und Gestalt. Innerhalb des eingegrenzten Lösungsraums entwickelt das Handlungssystem dabei Lösungen, die zunächst mental vorgedacht und dann in Form expliziter Modelle, z.B. Skizzen, Diagramme oder Prototypen, synthetisiert werden. Diese Modelle sind entwicklungsrelevante Objekte, weshalb sie innerhalb des erweiterten ZHO-Modells als Elemente des Objektsystems verstanden werden (vgl. Bild 6-5).

Mit diesem Syntheseschritt bildet sich ein geschlossener Kreislauf, der Produktentstehung als iterativen Prozess in Form einer „**Liegenden Acht**“ beschreibt³⁶⁹. Die in der Synthese erzeugten Objekte werden im nächsten Schritt wieder analysiert, um die zuvor erwarteten Zielsetzungen zu verifizieren oder zu falsifizieren und so die Wissensbasis gezielt zu vergrößern. Dies wiederum erlaubt dem Handlungssystem die Konkretisierung des Zielsystems, was mit einer stärkeren Eingrenzung des Lösungsraums einhergeht und so eine effektivere Lösungssuche sowie eine detailliertere Prinzip- und Gestaltmodellierung ermöglicht.

Im wiederholten Durchlaufen dieses Prozesses entwickelt das Handlungssystem sowohl das Zielsystem als auch das Objektsystem stetig weiter. Dabei wird kontinuierlich fallspezifisches Wissen gewonnen und bestehende Unsicherheiten werden somit verringert. Wissenslücken werden dabei durch Erkenntnisse aus Validierungsaktivitäten geschlossen. Die weiter anwachsende Wissensbasis erlaubt zudem das Treffen von belastbaren Entscheidungen und somit die Reduzierung existierender Definitionslücken. Auf diese Weise kann der Reifegrad von Ziel- und Objektsystem schrittweise erhöht werden. Dabei ist zu beachten, dass, auch wenn bei einem ausreichend hohen Reifegrad der entsprechende Produktentstehungsprozess abgeschlossen werden kann, die co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem im Produktlebenszyklus (z.B. im Kontext der Produktnutzung) weiter voranschreitet und so den nächsten Produktentstehungsprozess initiiert.

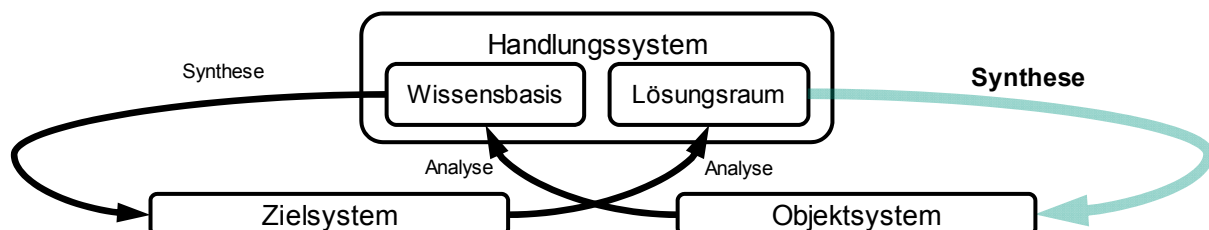


Bild 6-5: Synthese des Objektsystems im erweiterten ZHO-Modell

³⁶⁹ vgl. Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

6.2 Zweck des erweiterten ZHO-Modells

6.2.1 Abbilden einer menschenzentrierten Entwicklung

Das erweiterte ZHO-Modell ist ein menschenzentrierter Ansatz, mit dessen Hilfe Aspekte des individuellen Denkens und Handelns in der Entwicklungstätigkeit erklärt werden können.

Das Modell berücksichtigt, dass Entwicklungstätigkeit zum Teil durch eine kognitiv aufwandsarme, erfahrungsbasierte und opportunistische Nutzung von Handlungsoptionen gekennzeichnet ist³⁷⁰. Als Resultat der Begrenztheit der menschlichen Bewusstseiskapazität und des darin begründeten wirtschaftlichen Umgangs mit dieser Kapazität (Prinzip der kognitiven Ökonomie³⁷¹) läuft die Entwicklungstätigkeit zumeist nicht streng systematisch ab, sondern beinhaltet vielmehr ein opportunistisches Vorgehen mit systematischen Episoden³⁷². **Opportunistisches Vorgehen** bedeutet, dass sich dem Entwickler im Prozess Gelegenheiten bieten, in welchen er ihm bekannte und ihm in eben dieser Situation nützlich erscheinende mentale Modelle mit der aktuellen Problemstellung verknüpfen kann.

HACKER³⁷³ sieht es als gesichert an, dass in der Entwicklung ein opportunistisches fall- bzw. vorwissensbasiertes Vorgehen und das systematische Zerlegen der Problemstellung einander nicht ausschließen, sondern ineinander greifen. Er versteht opportunistisches Vorgehen weder als eine Versuch-Irrtum-Prozedur, noch als ein „Durchwursteln“ (engl.: muddling through), sondern vielmehr als ein zielgerichtetes und **hypothesegeleitetes Handeln**, wie es auch das erweiterte ZHO-Modell beschreibt.

Des Weiteren erlaubt das Modell die Abbildung des Zusammenspiels von Denken und Handeln in der Produktentstehung. Entwickler externalisieren ihre Lösungsideen, um einerseits ihr Arbeitsgedächtnis zu entlasten und andererseits ihre Lösungen besser bewerten zu können. Entsprechend der Theorie des reflexiven Handelns³⁷⁴ sieht das erweiterte ZHO-Modell vor, ausgehend von der Reflexion (Analyse des Objektsystems) eine Anpassung der Benennung (Synthese des Zielsystems), der Begrenzung (Analyse des Zielsystems) und der Bewegung (Synthese des Objektsystems) vorzunehmen. Auch die kontinuierliche Redefinition des Entwicklungsrahmens kann durch die indirekten Wechselwirkungen von individueller Wissensbasis und subjektivem Lösungsraum erklärt werden.

³⁷⁰ vgl. Bender 2004, S.232

³⁷¹ vgl. Ehrlenspiel 2003

³⁷² vgl. Günther 1998, S.130ff.

³⁷³ vgl. Hacker 2002

³⁷⁴ vgl. Kapitel 5.1.2

6.2.2 Abbilden der co-evolutionären Systementwicklung

Das erweiterte ZHO-Modell verknüpft das grundlegende Verständnis der klassischen Ansätze aus der Systemtechnik³⁷⁵ mit den wesentlichen Merkmalen der modernen Theorien zur Co-Evolution³⁷⁶. Während die Systemtechnik insbesondere die Handhabung von komplexen Sachverhalten adressiert, stellen die co-evolutionären Entwicklungstheorien eher Ansätze zum Umgang mit Unsicherheit dar. Komplexität und Unsicherheit sind allerdings nicht als zwei unabhängige Herausforderungen zu betrachten. Sie stellen vielmehr zwei Ausprägungen derselben Herausforderung dar, weshalb es notwendig ist, auch deren Modellverständnisse zu integrieren. Das erweiterte ZHO-Modell umfasst zwar keineswegs das gesamte Spektrum an systemtechnischen oder co-evolutionären Grundlagen, bildet aber einen Beitrag dazu, die beiden wissenschaftlichen Ansätze in Form eines Basismodells zusammenzuführen.

Die co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem ist, nach der Menschzentrierung, das zweite wesentliche Charakteristikum des erweiterten ZHO-Modells. Heutige Produktentstehungsprozesse sind komplex und unsicherheitsbehaftet. Die vollständige Klärung der Aufgabenstellung vor der ersten Prinzip- und Gestaltmodellierung ist folglich nicht möglich. VON DER WETH³⁷⁷ erklärt in diesem Zusammenhang, dass auch anfänglich sehr unspezifische Ziele zeitweilig durchaus als „determinierende Tendenz“ zur vagen Bestimmung einer Suchrichtung sowie zur groben Bewertung von Teilergebnissen geeignet sind. HACKER³⁷⁸ ergänzt, dass in diesem Fall aber die **Zielpräzisierung** – im Sinne einer iterativen Zielentwicklung – selbst Inhalt der Entwicklungstätigkeit sein muss.

Das erweiterte ZHO-Modell betrachtet Unsicherheit als Kombination aus Wissens- und Definitionslücken. Um Unsicherheit zu verringern, gilt es, beides zu reduzieren. Um Wissenslücken zu schließen, muss durch die Analyse von Objekten fallspezifisches Wissen gewonnen werden. Dieses Wissen dient ferner dazu, Ziele zu präzisieren, also das Zielsystem weiterzuentwickeln, und so auch Definitionslücken zu schließen. Das erweiterte ZHO-Modell beschreibt Produktentstehung somit nicht nur als wissensbasierte, sondern auch als **wissensgenerierende Tätigkeit**, bei der kontinuierlich Annahmen getroffen und überprüft werden müssen. Die Validierung, d.h. der Erkenntnisgewinn durch das Prüfen von Lösungen, ist folglich von ebenso zentraler Bedeutung, wie die Modellierung der Lösungen selbst³⁷⁹.

³⁷⁵ vgl. Kapitel 2.3.1

³⁷⁶ vgl. Kapitel 5.2.2

³⁷⁷ vgl. von der Weth 1994

³⁷⁸ vgl. Hacker 2002

³⁷⁹ vgl. Albers 2010

6.2.3 Abbilden des iterativen Entwicklungsprozesses

Das erweiterte ZHO-Modell hat im Weiteren den Zweck, den Verlauf eines Produktentstehungsprozesses abzubilden. Das Modell lässt Iterationen dabei nicht nur zu, sondern erklärt diese zum grundlegenden Wesensbestandteil des Prozesses. Das Modell beinhaltet somit das Verständnis, dass erst durch eine Iteration eine Weiterentwicklung möglich ist. Eine Iteration umfasst dabei das vollständige Durchlaufen der vier Schritte: Analyse des Objektsystems, Synthese des Zielsystems, Analyse des Zielsystems und Synthese des Objektsystems (vgl. Bild 6-6). Der Ausgangspunkt der Iteration kann jedoch in Abhängigkeit der jeweiligen Situation sowie des betrachteten Handlungssystems variieren³⁸⁰.

Eine Iteration wird im erweiterten ZHO-Modell nicht als Rücksprung in eine vorhergehende Phase, sondern als **Fortschritt im Wissen** um Problem und Lösung dargestellt. Auch durch die Falsifikation einer Lösung wird Wissen gewonnen, das von zentraler Bedeutung für den weiteren Produktentstehungsprozess sein kann. Damit erlaubt das Modell eine zwar ebenfalls einseitige, dafür jedoch der Mehrzahl anderer Prozessmodelle entgegengerichtete Sicht auf Iterationen. Im Vergleich zu Stage-Gate-Modellen, die Iterationen zumeist als kosten- und zeitaufwendige Wiederholungen ohne jegliche Wertschöpfung darstellen, betont das erweiterte ZHO-Modell die essentielle Wichtigkeit und Notwendigkeit von Iterationen.

Das erweiterte ZHO-Modell basiert auf der Erkenntnis, dass Iterationen in Produktentwicklungsprozessen nicht vermieden werden können. Mit Einsicht der **Unvermeidbarkeit von Iterationen** können unter Verwendung des Modells neue Ansätze entwickelt werden. MEBOLDT und MATTHIESEN³⁸¹ schlagen beispielsweise vor, Iterationen zu geeigneten Zeitpunkten mit vertretbarem Risiko bewusst zu provozieren, um Wissens- und Definitionslücken frühzeitig aufzuzeigen und zu schließen, und so unerwarteten Iterationen zu ungünstigen Zeitpunkten, z.B. kurz vor oder sogar nach dem Markteintritt, vorzubeugen.

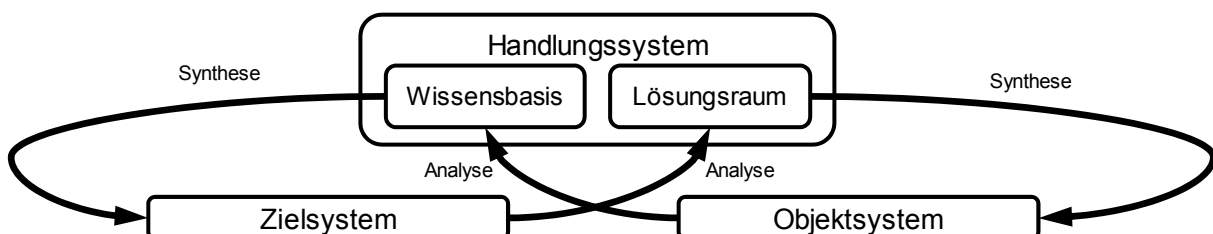


Bild 6-6: Erweitertes ZHO-Modell (Liegende Acht)

³⁸⁰ vgl. Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

³⁸¹ vgl. Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer 2012

7 Experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel werden vier Fallbeispiele vorgestellt, in denen das erweiterte ZHO-Modell im Rahmen verschiedener Produktentstehungsprozesse in der Forschung und in der industriellen Praxis experimentell angewandt und untersucht wurde. Die Fallbeispiele aus der Industrie basieren dabei jeweils auf einem etwa halbjährigen Untersuchungszeitraum, in welchem das Entwicklungsgeschehen durchgängig beobachtet und am erweiterten ZHO-Modell reflektiert wurde. Das Modell wurde den beteiligten Entwicklern zu Beginn der Untersuchung vorgestellt und gemeinsam entlang des Prozesses diskutiert. Mit jedem Fallbeispiel konnten so einzelne charakteristische Aspekte des jeweiligen Entwicklungsprozess herausgestellt und unter Verwendung des erweiterten ZHO-Modells untersucht werden.

Die einzelnen Fallbeispiele behandeln die folgenden Schwerpunkte:

- **Konvergenz des Lösungsraums:** Das erweiterte ZHO-Modell bildet den iterativen Verlauf des Produktentstehungsprozesses als durchgängig konvergenten Prozess ab. Im Fallbeispiel 1 wird untersucht, ob diese Annahme bestätigt werden kann, und diskutiert, in welchen Fällen der Lösungsraum auch während des Prozesses erneut aufgeweitet wird.
- **Entwicklung im Team:** Das erweiterte ZHO-Modell bildet die Entwicklungstätigkeit eines einzelnen Entwicklers mit seiner Wissensbasis und seinem Lösungsraum ab. Im Fallbeispiel 2 wird untersucht, inwiefern das Modell auch auf Entwicklungen im Team übertragbar ist und wie sich die Wechselwirkungen der individuellen Wissensbasen und Lösungsräume darstellen lassen.
- **Dimensionen von Zielen:** Fallbeispiel 3 untersucht die Synthese des Zielsystems in einen komplexen und interdisziplinären Entwicklungsprojekt, das durch eine Vielzahl unsicherheitsbehafteter und miteinander wechselwirkender Ziele bestimmt ist. Auf Basis des erweiterten ZHO-Modells wird ein methodischer Ansatz entwickelt, der hier den effektiven Umgang mit Zielen unterstützt.
- **Einbindung des Kunden:** Der Kunde ist trotz seiner zentralen Bedeutung im Produktentstehungsprozess bislang nicht explizit im erweiterten ZHO-Modell berücksichtigt worden. In Fallbeispiel 4 wird daher untersucht, in welche Entwicklungsschritte der Kunde eingebunden werden kann und welche Rollen dabei von ihm eingenommen werden.

Im Folgenden wird zu jedem Fallspiel die konkrete Entwicklungssituation kurz erläutert und charakterisiert. Die Entwicklungsbeschreibung fasst die wesentlichen Beobachtungen zusammen, um diese dann abschließend zu reflektieren.

7.1 Fallbeispiel 1: Konvergenz des Lösungsraums

7.1.1 Entwicklungssituation

Das erste Fallbeispiel behandelt die Entwicklung eines integrierten Systems zur automatisierten Bestimmung des Gewichts und des Schwerpunkts eines Helikopters. Das sogenannte *Onboard Weight and Balance System (OWBS)* wird dabei bislang primär in Flugzeugen verwendet, bietet jedoch auch beim Einsatz in Helikoptern erhebliche Vorteile hinsichtlich Sicherheit und Energieeffizienz.

Die Bestimmung von Gewicht und Schwerpunkt eines Helikopters ist vom Piloten vor jedem Start vorzunehmen. Der Pilot muss dabei sicherstellen, dass weder das zulässige Gesamtgewicht überschritten wird, noch der Schwerpunkt außerhalb des zulässigen Toleranzbereiches liegt. Grundsätzlich ist hier zu beachten, dass es Lasten an Bord des Helikopters gibt, die sich während des Fluges verändern. Dazu zählen kontinuierliche Veränderungen (z.B. Lastverringern aufgrund von Treibstoffverbrauch) oder aber Veränderungen, die aus dem Anwendungsbereich des Helikopters resultieren (z.B. Lastabwurf oder angehängtes Equipment).

Eine automatisierte Bestimmung von Gewicht und Schwerpunkt bietet hier den Vorteil der Bestätigung von manuellen Berechnungen, was die Wahrscheinlichkeit von menschlichem Versagen an dieser Stelle deutlich reduziert. Zudem kann aufgrund der höheren Genauigkeit solcher Systeme der zulässige Toleranzbereich effizienter ausgenutzt werden. Die Messung selbst erfolgt dabei über eine Sensorik im Landefahrwerk. Bild 7-1 zeigt in einer vereinfachten Darstellung das Kräftegleichgewicht von der im Schwerpunkt (engl.: Center of Gravity, CoG) wirkenden Gewichtskraft und den im Landefahrwerk resultierenden Lagerkräften.

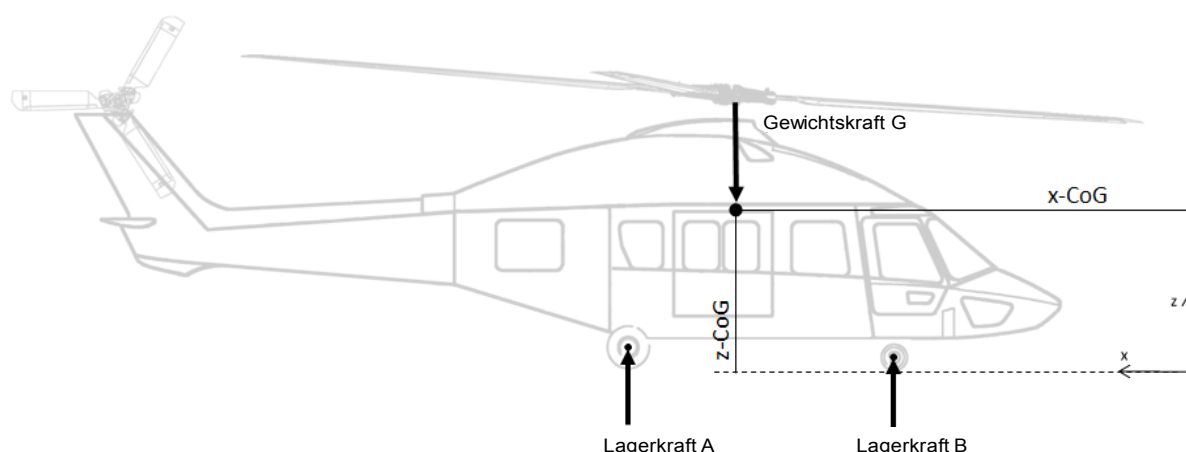


Bild 7-1: Gewichtskraft und Lagerkräfte am Helikopter nach SCHNEIDER et al.³⁸²

³⁸² vgl. Schneider, Thräne, Wenzl & Matthiesen 2012

7.1.2 Entwicklungscharakteristik

Das hier untersuchte Fallbeispiel entspricht der typischen Charakteristik eines Vorentwicklungsprojekts. SPECHT et al.³⁸³ beschreiben die Aufgabe der Vorentwicklung als die anwendungsorientierte Ausentwicklung von Technologien, die Prüfung der technischen Umsetzbarkeit neuer Technologien, die Definition von Produkt-konzepten sowie die Erbringung von Funktionsnachweisen durch den Bau von Prototypen. Mit Vorentwicklungsprojekten werden technisch anspruchsvolle, risikoreiche Bauteile, Baugruppen oder Produkte entwickelt, die als nächste oder übernächste Generation in den Markt eingeführt werden sollen.

Die Ausgangssituation eines Vorentwicklungsprojekts zeichnet sich somit durch ein hohes Maß an Unsicherheit aus. Im Fallbeispiel bestehen Wissenslücken zur Funktionsweise existierender Systeme zur Bestimmung von Gewicht und Schwerpunkt. Auch zur Übertagbarkeit dieser Systeme von Flugzeug zu Helikopter ist zu Beginn der Entwicklung relativ wenig bekannt. Neben der technischen Machbarkeit gilt es zudem, auch Erkenntnisse über die wirtschaftliche Umsetzbarkeit sowie die Praxistauglichkeit dieser Systeme zu gewinnen.

Aufgrund der bestehenden Unsicherheit werden in Vorentwicklungsprojekten, ausgehend von einem initialen Zielsystem, oftmals mehrere alternative Lösungen parallel entwickelt (vgl. Bild 7-2). Dies bietet den Vorteil, mit abgeschlossener Analyse des Objektsystems die generierten Lösungen nicht nur absolut, sondern auch relativ zueinander bewerten zu können. In der Regel wird ausgehend von den Analyseergebnissen und der bestehenden Wissensbasis des Handlungssystems an dieser Stelle im Prozess eine Lösung ausgewählt, die weiterverfolgt werden soll. Die Fokussierung auf eine Lösung erlaubt dabei zumeist eine Erweiterung und Konkretisierung des Zielsystems. In dem Fall, dass keine gemeinsame Entscheidung getroffen werden kann, ist es nicht unüblich, auch eine Iteration mehrerer Lösungen mit jeweiligem Zielsystem zu durchlaufen (Mehrgleisige Entwicklung).

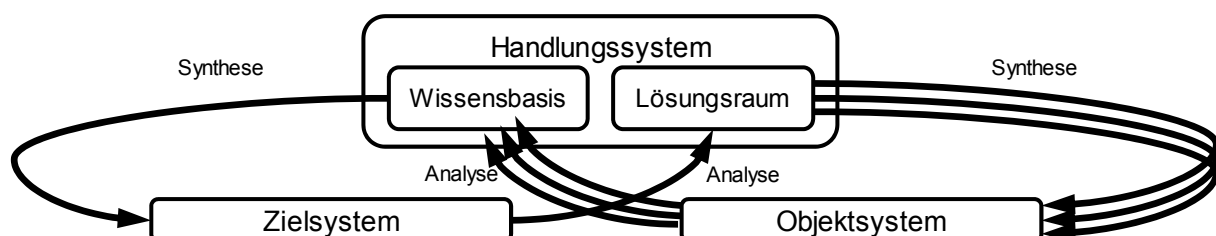


Bild 7-2: Parallele Synthese und Analyse von Objekten in Vorentwicklungsprojekten

³⁸³ vgl. Specht, Beckmann & Amelingmeyer 2002, S.16

7.1.3 Entwicklungsbeschreibung

Der erste Schritt in der Entwicklung war aufgrund der bestehenden Wissenslücken stark geprägt durch die Analyse von Objekten, welche die automatisierte Bestimmung des Gewichts und des Schwerpunktes von Flugzeugen dokumentieren. Zu diesen Objekten zählten insbesondere Forschungsberichte sowie Patentschriften.

Die Analyse zeigte, dass zwischen zwei grundsätzlichen Arten vom Messverfahren unterschieden wird. Beim ersten Verfahren wird ein Fluid als Leitstützstruktur in die Landefahrwerke eingebracht. Durch ein Druckmessverfahren kann dann die Lagerkraft pro Fahrwerk bestimmt und so das Gewicht wie auch der Schwerpunkt des Helikopters berechnet werden. Das zweite Verfahren bestimmt die wirkenden Kräfte nicht über Druck, sondern über die mechanische Verformung von Bauelementen des Fahrwerks. Hierbei kommen zumeist optische Messverfahren zum Einsatz. Die Analyse ergab abschließend, dass beide Verfahren grundsätzlich auch für den Einsatz in Helikoptern geeignet sind³⁸⁴.

Im initialen Zielsystem wurde daher zunächst definiert, dass für das zu entwickelnde System eines der beiden identifizierten Verfahren verwendet werden sollte. Des Weiteren wurde die Randbedingung gesetzt, das System in die Landefahrwerke der aktuellen Helikoptergeneration integrieren zu können. Ziel war dabei, den Integrationsaufwand auf ein Minimum zu reduzieren. Der resultierende Lösungsraum umfasste hier somit die Schnittmenge aus dem Freiheitsgrad zum Messverfahren und dem Freiheitsgrad zum Landefahrwerk (vgl. Bild 7-3). Die Begrenzung des Lösungsraums ist ein mentaler und somit auch ein individueller Vorgang, d.h. jeder Entwickler im Handlungssystem hat ein anderes Verständnis der Freiheitsgrade und definiert somit auch eine andere Schnittmenge, die den Lösungsraum darstellt.

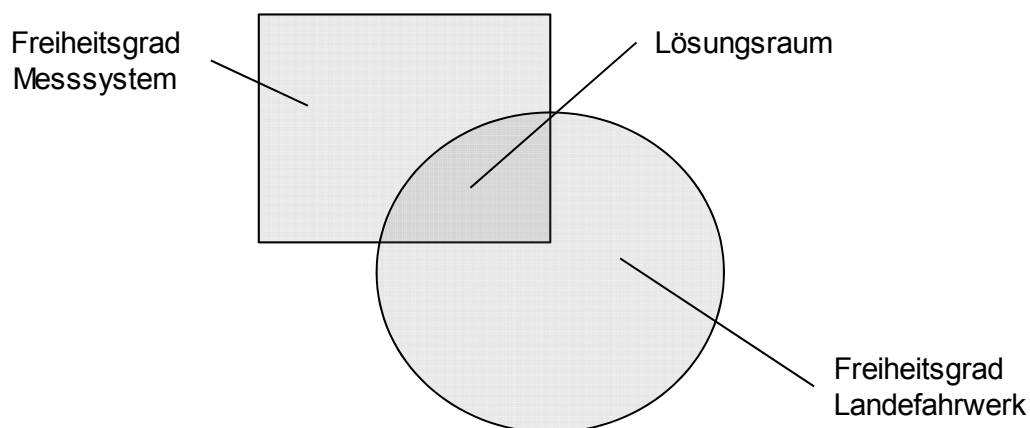


Bild 7-3: Lösungsraum als Schnittmenge bestehender Freiheitsgrade

³⁸⁴ vgl. Schneider 2012

Im Fallbeispiel wurden innerhalb des Lösungsraums erste Prinzip- und Gestaltmodelle entwickelt. Die Analyse dieser Objekte ergab, dass die Integration von Druckmessverfahren eine deutliche, konstruktive Anpassung der Landefahrwerke erfordere, während die Verwendung von Messverfahren zur Bestimmung von Verformungen sich aufgrund bislang ungenutzter Hohlräume als relativ einfach erwies.

In der Folge wurde entschieden, das zuvor definierte Ziel „Nutzung eines der beiden identifizierten Verfahren“ zu verfeinern und sich auf den Einsatz der Verformungsmessung zu konzentrieren. Zudem wurde als weiteres Ziel definiert, dass mit diesem Messverfahren eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Bestimmung von Gewicht und Schwerpunkt erreicht werden soll. Die Entwickler verfügten hier bereits über Wissen darüber, dass sich die Genauigkeit einer Messung insbesondere aufgrund äußerer Einflussfaktoren, wie z.B. Wind oder einer schrägen Landeposition, reduziert. Bild 7-3 zeigt hier exemplarisch, dass bei Schräglage des Helikopters die Position des Schwerpunktes nur anhand der Lagerkräfte nicht mehr eindeutig bestimmt werden kann. Die genannten Anwendungsfälle wurden als Randbedingungen ebenfalls ins Zielsystem aufgenommen.

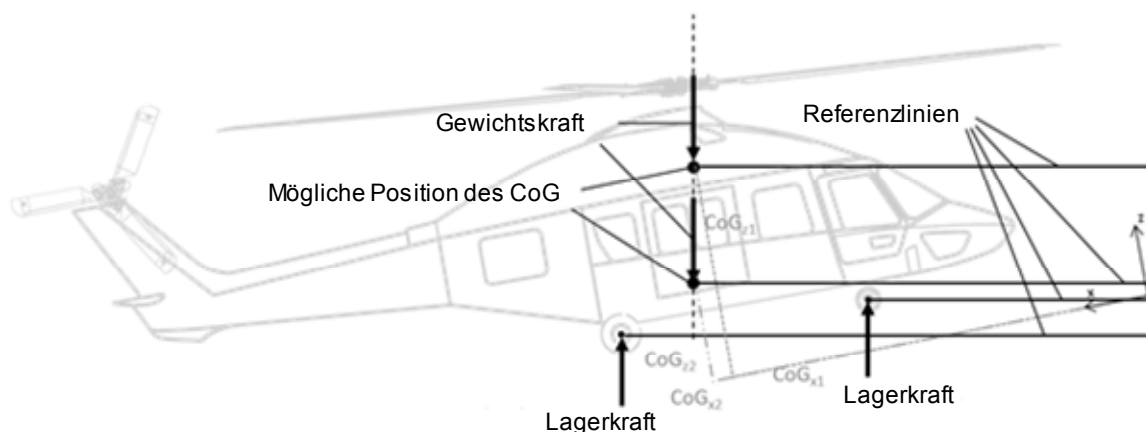


Bild 7-4: Ungenauigkeit der Schwerpunktbestimmung nach SCHNEIDER et al.³⁸⁵

Bei der Exploration des nun weiter eingegrenzten Lösungsraums wurde erkannt, dass die durch Wind und Schräglage verursachten Ungenauigkeiten zur Bestimmung des Schwerpunktes herausgerechnet werden müssen. Dafür sind allerdings weitere Sensoren notwendig, die zum einen Windgeschwindigkeit und Windrichtung, zum anderen die Neigung in x- und y-Richtung erfassen. Diese neu erkannte Problemstellung eröffnete neue Lösungsräume. Im Rahmen der Untersuchung konnte dabei festgestellt werden, dass die Mehrzahl der Entwickler diese Eröffnung neuer Lösungsräume eher als Divergenz statt als Konvergenz empfindet.

³⁸⁵ vgl. Schneider, Thräne, Wenzl & Matthiesen 2012

7.1.4 Reflektion

Die in diesem Fallbeispiel gemachten Beobachtungen zum Entwicklungsprozess bestätigen den im erweiterten ZHO-Modell abgebildeten iterativen Verlauf von Analyse- und Syntheseschritten. Auch die zentrale Hypothese zur co-evolutionären Entwicklung von Ziel- und Objektsystem konnte weiter bekräftigt werden.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass im Fallbeispiel insbesondere die Wissensbasis ein zentrales Element der Entwicklung darstellt. Die zielgerichtete Erweiterung der Wissensbasis, d.h. das kontinuierliche Schließen von Wissenslücken, war eine der wesentlichen Aufgaben des untersuchten Vorentwicklungsprojekts. Eine weitere wichtige Aufgabe bestand in der Weiterentwicklung des Zielsystems. Hier konnte sowohl das Hinzufügen neuer Ziele als auch die schrittweise Verfeinerung bestehende Ziele gezeigt werden. Eine Änderung von Zielen wurde in diesem Fallbeispiel nicht beobachtet. Dies kann dadurch erklärt werden, dass einerseits keine voreilig definierten Zielsetzungen ins Zielsystem aufgenommen wurden, somit also eine ausreichende Flexibilität gegeben war, und andererseits bei der Analyse des Objektsystems die gemachten Annahmen stets verifiziert wurden.

Im Fallbeispiel wurden auf Basis eines Zielsystems mehrere alternative Lösungen synthetisiert und analysiert, z.B. ein Landefahrwerk mit Druckmessung und eines mit Verformungsmessung. Die Auswahl einer Lösung und damit das Verwerfen der anderen Lösungen wurden von den Entwicklern als Eingrenzung des Lösungsraums empfunden. Die nachfolgende Analyse des konkretisierten Zielsystems beschrieben die Entwickler dahingegen zumeist als Aufweitung des Lösungsraums (vgl. Bild 7-5).

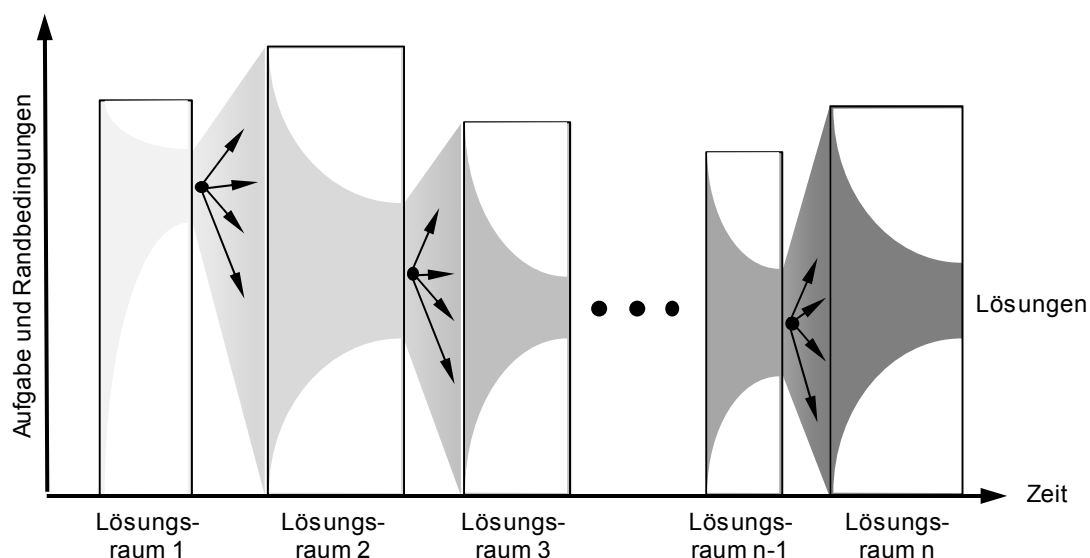


Bild 7-5: Aufweitung und Eingrenzung des Lösungsraums nach KITTEL und VAJNA³⁸⁶

³⁸⁶ vgl. Kittel & Vajna 2009

Der Grund für diese Wahrnehmung lässt sich dadurch erklären, dass sich mit der Konkretisierung des Zielsystems die Sicht auf den Lösungsraum ändert. Durch die Fokussierung auf einen Lösungsweg kann sich der Entwickler nun mit vertieften Problemstellungen auseinandersetzen. Die vertiefte Betrachtungsweise kann beispielsweise einen höheren Konkretisierungsgrad, einen höheren Detaillierungsgrad oder auch den Schritt „vom Wesentlichen zum weniger Wesentlichen“ beinhalten³⁸⁷. Im Fallbeispiel wurde zunächst das Wesentliche, d.h. die Übertragbarkeit des Messsystems auf den Helikopter, geklärt. Erst bei der Auseinandersetzung mit dem weniger Wesentlichen, d.h. der Berücksichtigung von Messungenauigkeiten aufgrund von Wind und schräger Landeposition, kam es zur „gefühlten Divergenz“ des Lösungsraums, obwohl der Lösungsraum objektiv betrachtet weiter eingegrenzt wurde (vgl. Bild 7-6).

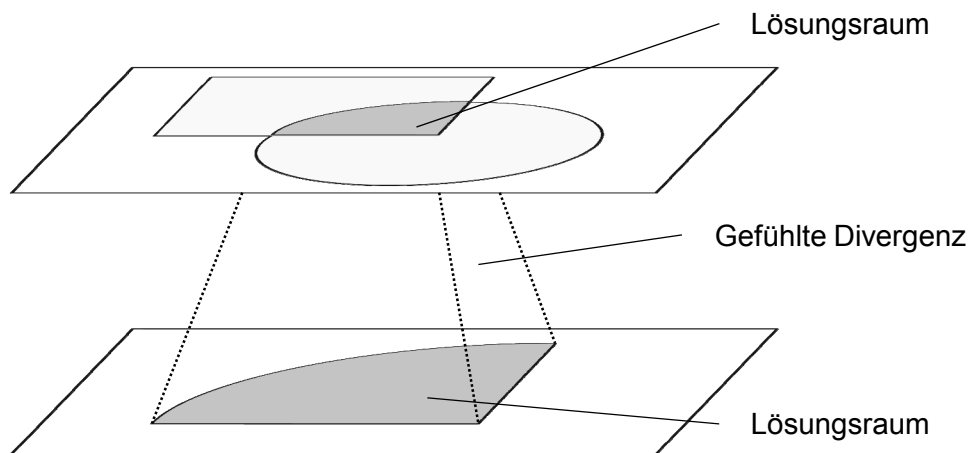


Bild 7-6: „Gefühlte Divergenz“ des Lösungsraums

Der tatsächlich eingegrenzte Lösungsraum ist folglich noch einmal genauer zu explorieren. Durch zusätzliche Ziele verstärkt sich zumeist auch der multidimensionale Charakter des Lösungsraums, wodurch der Aufwand einer erneuten Exploration weiter zunimmt. Es ist beispielsweise leichter, einen Lösungsraum zu überblicken, der nur geometrische Einschränkungen beinhaltet (z.B. Bauraumrestriktionen), als in einem Lösungsraum zu agieren, der zusätzlich noch z.B. kinematische, energetische, ergonomische, finanzielle und zeitliche Einschränkungen aufweist.

Darüber hinaus treten jedoch auch Fälle auf, in welchen sich der Lösungsraum tatsächlich erweitert. Insbesondere dann, wenn Ziele geändert oder sogar vollständig aus dem Zielsystem herausgenommen werden, ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade, die weitere Lösungen zulassen.

³⁸⁷ vgl. Dylla 1990, S.106ff.

7.2 Fallbeispiel 2: Entwicklung im Team

7.2.1 Entwicklungssituation

Das zweite Fallbeispiel umfasst die Entwicklung eines Saugmoduls für einen Bohrhammer. Ein Bohrhammer ist ein handgeführtes Gerät, das zum Bohren von Löchern in mineralischen Materialien, wie z.B. Beton oder Stein, genutzt wird. Im Gegensatz zu einfachen Bohrmaschinen verfügt ein Bohrhammer über ein sogenanntes Schlagwerk, das einen zyklischen Schlagimpuls auf den rotierenden Bohrer überträgt, und so eine erhöhte Bohrleistung ermöglicht.

Das im Fallbeispiel behandelte Saugmodul ist ein zusätzliches Gerät, das mit dem Bohrhammer verbindbar ist (vgl. Bild 7-7). Es dient insbesondere zum Absaugen von Bohrstaub und weiteren Abraum, der während des Bohrvorganges entsteht. Ein wesentlicher Kundenvorteil besteht darin, dass so Verunreinigungen, die zu Gesundheitsgefährdung des Nutzers oder sogar zur Explosionsgefahr führen können, nicht freigesetzt, sondern direkt abgeführt werden³⁸⁸.

Eine gute Saugleistung in Kombination mit einer geschickten Luftstromführung kann zudem eine ausreichend gründliche Reinigung des Bohrloches ermöglichen, wie sie in der Vorbereitung zur Verwendung chemischer Dübel gefordert wird. Der Reinigungsprozess wird in der Praxis bisher manuell mittels Metallbürste und Handpumpe oder Pressluft durchgeführt. Dieser zusätzliche Prozessschritt ist zum einen zeitaufwendig und unangenehm für den Bediener, zum anderen ist die erforderliche Reinigungsqualität nicht sicherzustellen.

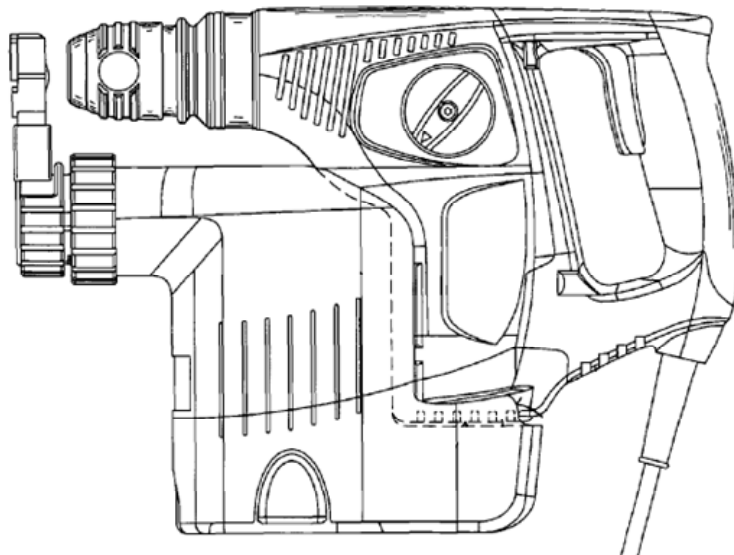


Bild 7-7: Bohrhammer mit Saugmodul nach FRITZ und ONTL³⁸⁹

³⁸⁸ vgl. Luettich et al. 2012

³⁸⁹ vgl. Fritz & Ontl 2011

7.2.2 Entwicklungscharakteristik

Die Entwicklung des Saugmoduls ist ebenfalls als ein Vorentwicklungsprojekt einzustufen. Auch hier bestehen Wissens- und Definitionslücken, die durch das Durchlaufen von weiteren Iterationen entsprechend des erweiterten ZHO-Modells kontinuierlich zu schließen sind. Im Vergleich zum ersten Fallbeispiel wird hier ein Entwicklungsabschnitt betrachtet, in welchem der Reifegrad der synthetisierten Objekte bereits weiter vorangeschritten ist. Zu den untersuchten Objekten zählen vorrangig modifizierte Serienprodukte, die mit funktionsfähigen, oftmals in Rapid-Prototyping-Verfahren hergestellten Prototypen kombiniert werden.

Zur Charakteristik dieses Fallbeispiels zählt insbesondere auch, dass das Entwicklungsproblem nicht von einer einzelnen Person allein gelöst werden kann. Die Prinzip- und Gestaltmodellierung baut auf Domänenwissen von verschiedenen Spezialisten auf. Für die Erzeugung und Führung des Luftstroms wird beispielsweise ein Strömungsexperte benötigt. Ferner muss die Anbindung an den Bohrerhammer mit Spezialisten für Ergonomie und Gehäusegestaltung abgestimmt werden und auch die Prototypentests werden gemeinsam mit den verantwortlichen Versuchsingenieuren geplant und durchgeführt. Die hier beschriebene Entwicklung ist daher maßgeblich durch die Zusammenarbeit im Team geprägt.

Das im Fallbeispiel betrachtete Handlungssystem setzt sich folglich aus mehreren Menschen zusammen, wobei jeder Mensch seine individuelle Wissensbasis mit einbringt (vgl. Bild 7-8). Die Wissensbasen überschneiden sich meist zu einem gewissen Grad und bilden so eine geteilte Wissensbasis. Das daraus hervorgehende Zielsystem stellt als explizites Modell der Ziele und Randbedingungen eine gemeinsame Arbeitsgrundlage für das Team dar, welche im anschließenden Analyseschritt jedoch wieder individuell wahrgenommen und interpretiert wird. Bei der Teamarbeit entstehen folglich mehrere individuelle Lösungsräume, die sich ebenfalls überschneiden können, sich aber nicht überschneiden müssen³⁹⁰.

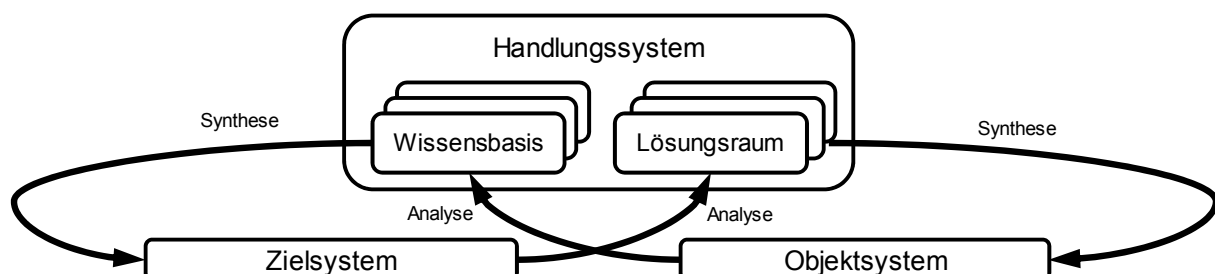


Bild 7-8: Individuelle Wissensbasen und Lösungsräume bei Entwicklungsprojekten im Team

³⁹⁰ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

7.2.3 Entwicklungsbeschreibung

Zu Beginn der in diesem Fallbeispiel beobachteten Entwicklung waren die grundlegenden Komponenten und der prinzipielle Aufbau des Saugmoduls bereits festgelegt. Die wesentlichen Bauelemente des Moduls sind ein Gebläserad, ein Filter und eine luftführende (abschnittsweise auch partikelbeladene) Fluidstrecke (vgl. Bild 7-9). Das Radialgebläse ist dabei parallel zur Schmalachse, d.h. quer zu Längs- und Hochachse, ausgerichtet, um so einen großen Gebläsedurchmesser und folglich eine hohe Saugleistung ermöglichen zu können³⁹¹.

Im Fallbeispiel wurde erkannt, dass die Saugleistung des Moduls nur gewährleistet werden kann, solange sich der Filter nicht mit Bohrstaub und weiteren Abraum zusetzt. Das Zielsystem wurde folglich insoweit ergänzt, als dass nun auch ein Zusetzen des Filters detektiert werden sollte. In der folgenden Exploration der individuellen Lösungsräume wurden verschiedene Möglichkeiten der Detektion identifiziert. In dem interdisziplinären Team wurden dabei zum einen mechanische Lösungen, wie z.B. Differenzdruckmessung oder Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit, zum anderen aber auch elektrotechnische Lösungen, wie z.B. kapazitive Messung oder Erfassung der Leistungsaufnahme am Motor, benannt³⁹².

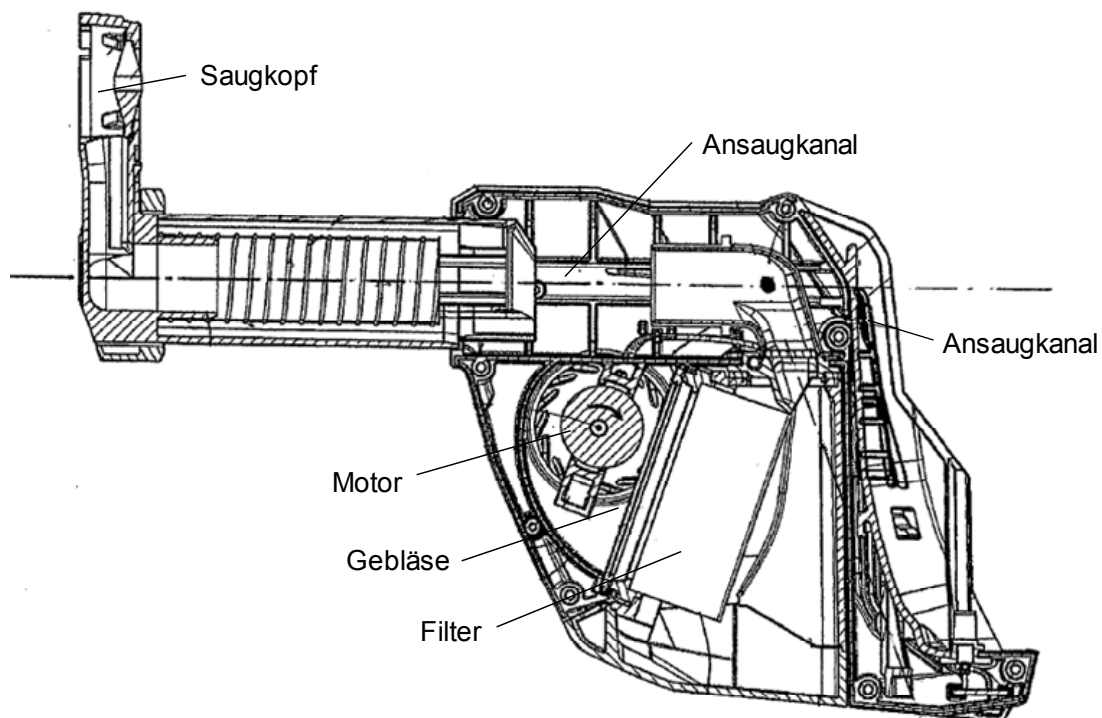


Bild 7-9: Schnittdarstellung des Saugmoduls nach LUETTICH et al.³⁹³

³⁹¹ vgl. Luettich et al. 2012

³⁹² vgl. Mußgnug 2012

³⁹³ vgl. Luettich et al. 2012

In der Synthese des Objektsystems galt es Lösungen dafür zu entwickeln, an welcher Stelle im Saugmodul, welche Sensoren positioniert werden müssen, um ein Zusetzen des Filters detektieren zu können. Die mit dieser Synthesaufgabe betrauten Entwickler gingen dabei zunächst in die Einzelarbeit, in welcher sie für sich allein mehrere Lösungsalternativen pro Detektionsverfahren auf Papier skizzierten. In einem nächsten Schritt stellen sich die Entwickler ihre skizzierten Lösungen gegenseitig vor (vgl. Bild 7-10). Dabei wurden Fragen zu den Lösungsvorschlägen gestellt und beantwortet, Vor- und Nachteile diskutiert und bestehende Skizzen angepasst bzw. neue Skizzen erstellt. Im Anschluss an das Treffen gingen die Entwickler erneut in die Einzelarbeit, um im Folgenden mit überarbeiteten Lösungen wieder zusammenzukommen. Dieser Wechsel zwischen Einzel- und Teamarbeit wurde sooft wiederholt, bis sich die Entwickler auf eine kleine Auswahl an vielversprechenden Lösungen verständigt hatten.

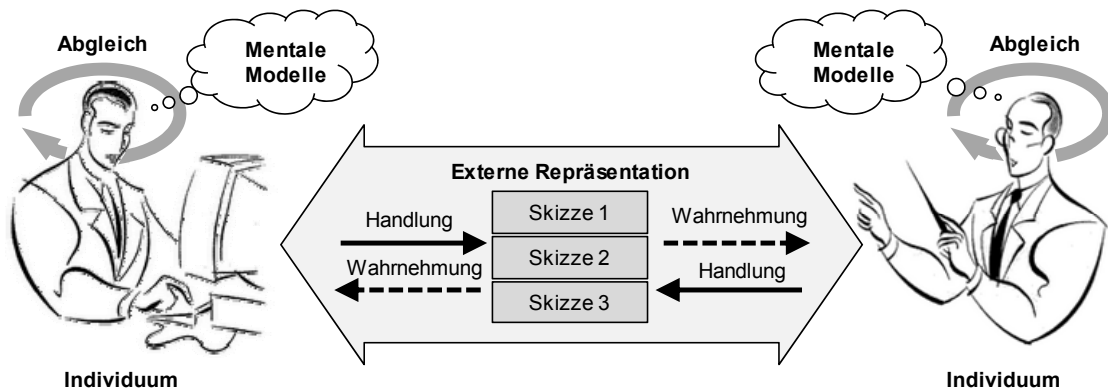


Bild 7-10: Interaktion in der Teamarbeit in Anlehnung an BIRKHOFFER und JÄNSCH³⁹⁴

Die Analyse dieser Lösungen erfolgte in Abstimmung mit verschiedenen Experten des Unternehmens, die auf Basis ihrer jeweiligen Kompetenzen und Erfahrungen (also ihrer jeweiligen Wissensbasis) einschätzen konnten, welche Lösungen in der nächsten Iteration weiterzuverfolgen seien. Folglich wurde das Zielsystem hier wieder konkretisiert.

Die neu definierten Ziele beinhalteten, dass die Detektion zum einen mit möglichst geringem Aufwand (d.h. Kostenaufwand in der Serienfertigung), zum anderen mit einer hohen Lösungssicherheit (d.h. Verlässlichkeit bei der Detektion) realisiert werden sollte. Die weiterverfolgten Detektionsverfahren wurden in den Prototypen des Saugmoduls integriert und hinsichtlich ihres Aufwands und ihrer Lösungssicherheit getestet. Durch die Tests konnten Messdaten gewonnen werden, welche die zuvor getroffene Einschätzung der Experten darin bestätigten, dass die Differenzdruckmessung die dem Zielsystem entsprechend beste Lösung darstellt.

³⁹⁴ vgl. Birkhofer & Jänsch 2003

7.2.4 Reflexion

Das Fallbeispiel zeigt, dass mit dem erweiterten ZHO-Modell auch Entwicklungen im Team abgebildet werden können. Das Team wird dabei als Handlungssystem repräsentiert, das sich aus mehreren interagierenden Individuen zusammensetzt, welche ein gemeinsames Zielsystem in ein entsprechendes Objektsystem transformieren. Jede Einzelperson wird dabei durch eine individuelle Wissensbasis sowie ein subjektives Verständnis des Lösungsraums repräsentiert.

Die Interaktion innerhalb eines Entwicklungsteams ist stark geprägt durch die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der individuellen Wissensbasen bzw. Lösungsräume. Einerseits sind es eben die Unterschiede im individuellen Wissen, die zu Synergieeffekten in der Teamarbeit führen. Andererseits kann ohne eine (zumindest teilweise) Überschneidung der Wissensbasen kein gemeinsames Problemverständnis unter den beteiligten Entwicklern entstehen. Die Abstimmungs- und Einigungsprozesse, wie z.B. bei der Synthese des Zielsystems, gestaltet sich dann überaus schwierig. Es besteht die Gefahr von Miss- und Unverständnissen.

Auch bei den Lösungsräumen gibt es individuelle Unterschiede. In Abhängigkeit davon, wie ein Entwickler das explizit definierte Zielsystem wahrnimmt und interpretiert, spannt er einen ihm eigenen Lösungsraum auf. Im Fallbeispiel hat sich dies insbesondere in der Situation gezeigt, in welcher die Maschinenbauingenieure eher mechanische Lösungen, wie z.B. Druckmessung, die Elektroingenieure dahingegen eher elektrotechnische Lösungen, wie z.B. Strommessung, entwickelten und verteidigten.

Die Abweichung von mentalen Modellen zweier Menschen wird auch als **kognitive Distanz**³⁹⁵ bezeichnet. Bei einer geringen kognitiven Distanz liegen die Lösungsräume nah beieinander, d.h. die Entwickler im Team entwickeln ähnliche oder sogar gleiche Lösungen und können sich entsprechend schnell auf eine weiterzuverfolgende Lösung einigen. Eventuell bessere Alternativlösungen werden dabei aber oftmals übersehen. Besteht dahingegen eine große kognitive Distanz, d.h. die jeweiligen Lösungsräume liegen weit auseinander, kann eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen erzeugt werden. Dieser Vorteil ist jedoch nur dann nutzbar, wenn die kognitive Distanz nicht so groß ist, dass die Lösungen im Team nicht mehr gegenseitig erklärt und verstanden werden können.

Im Fallbeispiel konnte zudem beobachtet werden, dass Entwicklungen im Team durch den ständigen Wechsel von Einzel- und Gruppenarbeit gekennzeichnet sind.

³⁹⁵ vgl. Badke-Schaub, Daalhuizen & Roozenburg 2011

Während das Team als Ganzes eher wenige, dafür aber große Iteration im erweiterten ZHO-Modell durchläuft, umfasst die darin eingebettet Einzelarbeit viele kleine Iterationen, in welchen Ziele und Objekte sowohl implizit, als auch explizit synthetisiert und analysierte werden. Das Explizieren, z.B. in Form von Skizzen, dient dabei zunächst der Unterstützung des eigenen Denkprozesses, in der folgenden Gruppenarbeit dann aber auch der Kommunikation von Zielen und Objekten.

Dieses Vorgehen ist mit dem erweiterten ZHO-Modell durch die Unterscheidung von insgesamt drei Ebenen zu beschreiben: (1) der Inneren Ich-Ebene, (2) der Äußeren Ich-Ebene und (3) der Interaktionsebene. Die Innere Ich-Ebene stellt den iterativen Entwicklungsprozess dar, der auf der rein mentalen Ebene stattfindet. In Bild 7-11 ist abgebildet, wie ausgehend von der Wissensbasis (WB) ein implizites Zielsystem (iZS) mental synthetisiert wird, das dann den Lösungsraum (LR) begrenzt und so durch die ebenfalls mentale Entwicklung von Lösungen das implizite Objektsystem (iOS) erweitert³⁹⁶. Auf der Inneren Ich-Ebene werden somit mögliche Ziele und Objekte vorgedacht und sogar vorausgewählt. Mentale Iterationen erfolgen nicht nur in der Einzelarbeit. Sie beschreiben vielmehr einen permanenten und begleitenden Prozess, der auch während der Interaktion mit anderen Personen stattfindet.

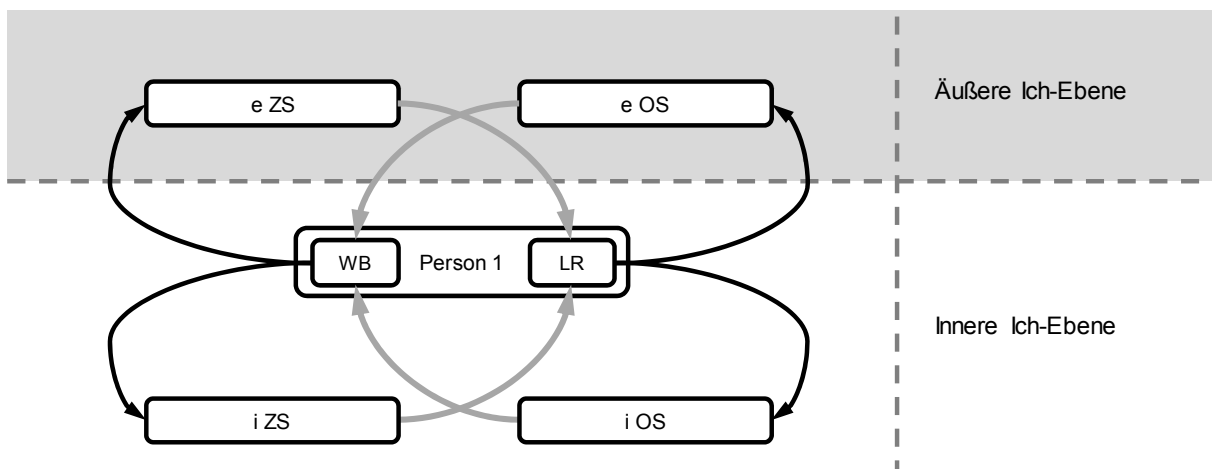


Bild 7-11: Innere und Äußere Ich-Ebene des erweiterten ZHO-Modells

Um das Arbeitsgedächtnis zu entlasten und so den eigenen Denkprozess zu unterstützen, werden in der Entwicklung Informationen des Denkprozesses in expliziter Form „ausgelagert“. Im Fallbeispiel sind dazu insbesondere einfache Skizzen verwendet worden. Iterationen, bei denen Elemente des expliziten Zielsystems (eZS) oder des expliziten Objektsystems (eOS) entstehen, durchlaufen neben der inneren Ich-Ebene auch die äußere Ich-Ebene (vgl. Bild 7-11).

³⁹⁶ vgl. Mußgnug 2012

In der Teamarbeit interagieren die Entwickler miteinander. Sie nutzen dazu die äußere Ich-Ebene, d.h. sie explizieren ihre vorgedachten und vorausgewählten Ziele und Objekte in Form von Sprache und Modellen. Wenn zwei Entwickler anhand derselben expliziten Ziel- und Objektsysteme denken und handeln, verbinden sich ihre jeweiligen äußeren Ich-Ebenen zu einer Interaktionsebene (vgl. Bild 7-12).

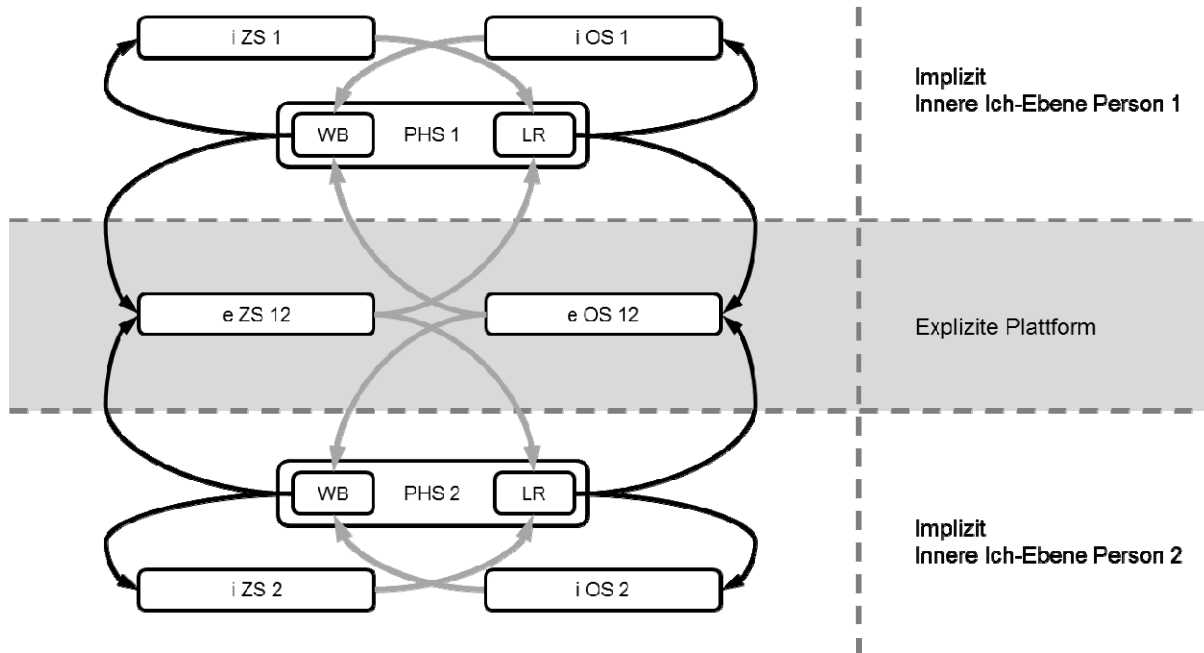


Bild 7-12: Interaktionsebene des erweiterten ZHO-Modells

In der Interaktion haben die Entwickler so die Möglichkeit, über das explizite Zielsystem den Lösungsraum und über das explizite Objektsystem die Wissensbasis ihres Gegenübers zu beeinflussen. Auf diese Weise kann folglich zum einen ein Synchronisieren der Lösungsräume, zum anderen ein Transfer von Wissen erfolgen³⁹⁷. Auch während der Interaktion der Entwickler bricht der individuelle Denkprozess auf der inneren Ich-Ebene nicht ab. Durch ein kontinuierliches Durchlaufen der mentalen Iterationen können so die impliziten und expliziten Ziel- und Objektsysteme abgeglichen und angepasst werden.

Die Interaktionsebene dient folglich der Abbildung des gemeinsamen Denkens und Handelns im Team. Dabei werden den Interaktionspartnern Informationen zur individuellen Wissensbasis sowie zum subjektiven Verständnis des Lösungsraums anhand von expliziten Zielen und Objekten kommuniziert. Durch den Austausch individueller Vorstellungen und Erkenntnisse können nicht nur geteilte mentale Modelle aufgebaut, sondern zudem auch neue Ideen angeregt und gemeinsam weiterentwickelt werden.

³⁹⁷ vgl. Albers, Turki & Lohmeyer 2012

7.3 Fallbeispiel 3: Dimensionen von Zielen

7.3.1 Entwicklungssituation

Das dritte Fallbeispiel behandelt die Weiterentwicklung eines humanoiden Roboters im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs SFB 588. Ziel dieses Projektes ist es, Konzepte, Methoden und konkrete mechatronische Komponenten für einen humanoiden Roboter zu entwickeln, der seinen Arbeitsbereich mit dem Menschen teilt.

Um vom Menschen akzeptiert zu werden und gemeinsam mit dem Menschen agieren zu können, ist eine zumindest menschenähnliche Gestalt des Roboters von Vorteil. Dafür soll ein mobiles Zweiarmsystem mit fünfingrigen Händen, einem flexiblen Torso sowie einem Sensorkopf mit visuellen und akustischen Sensoren entwickelt werden. Zudem soll das Bewegungssystem und damit das Verhalten des Roboters auf menschenähnliche Bewegungen zugeschnitten werden³⁹⁸.

Die im diesem Fallbeispiel betrachtete Entwicklung umfasst die Weiterentwicklung des humanoiden Roboters ARMAR III zum Prototypen der nächste Generation, dem ARMAR IV (vgl. Bild 7-13). Das grundlegende Ziel ist dabei, dass der Roboter nicht wie bisher von einer mobilen Plattform aus agiert, sondern sich auf zwei, der menschlichen Gestalt nachempfundenen Beinen bewegen soll.



Bild 7-13: Humanoide Roboter ARMAR III (links) und ARMAR IV (rechts)

³⁹⁸ vgl. Albers, Brudniok, Otnad, Sauter & Sedchaicharn 2007

7.3.2 Entwicklungscharakteristik

Die in diesem Fallbeispiel untersuchte Entwicklung ist ein interdisziplinäres Grundlagenforschungsprojekt. Es ist somit primär auf die Gewinnung neuer wissenschaftlicher sowie technischer Erkenntnisse und Erfahrungen ausgerichtet, ohne überwiegend an der unmittelbaren praktischen Anwendbarkeit orientiert zu sein³⁹⁹.

Das Projekt zeichnet sich durch ein überaus hohes Maß an Unsicherheit aus, die durch den hohen Komplexitätsgrad des mechatronischen Systems *Humanoider Roboter* noch verstärkt wird. Zudem umfasst das hier betrachtete Handlungssystem ein Team von mehr als 40 Wissenschaftlern aus 13 verschiedenen Instituten. Involviert sind neben den Fakultäten für Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik auch Experten für z.B. Bildauswertung oder menschliche Bewegungsabläufe.

Komplexe Produktentstehungsprozesse sind durch eine Vielzahl an miteinander wechselwirkenden Zielen bestimmt. Zudem erschwert sich der Abstimmungs- und Einigungsprozess bei der Synthese des Zielsystems aufgrund der vielen Beteiligten im Handlungssystem sowie der disziplinspezifischen Sichtweisen der einzelnen Entwickler (vgl. Bild 7-14). Es ist daher von essentieller Bedeutung, an dieser Stelle ein gemeinsames Ziel- und Problemverständnis zu entwickeln. Dazu gilt es, aus der Menge an Zielen diejenigen herauszustellen, die von besonderer Wichtigkeit für alle Beteiligten sind. Hier ist eine enge Abstimmung notwendig, da die Entscheidungen des einen Entwicklers den Lösungsraum des anderen beeinflussen. Es kommt daher häufig zu Zielkonflikten, die möglichst frühzeitig erkannt und dann durch Auswahl oder Kompromiss ausgeräumt werden müssen.

Die Synthese des Zielsystems ist hier als ein sozio-technischer Entscheidungsprozess zu verstehen, der nicht nur durch die Wissensbasis, sondern insbesondere auch durch die unterschiedlichen Verantwortungs- und Interessenbereiche der Beteiligten bestimmt ist. Es entstehen somit zusätzliche Dimensionen, die es bei der gemeinsamen Definition, Verfeinerung und Änderung von Zielen zu beachten gilt.

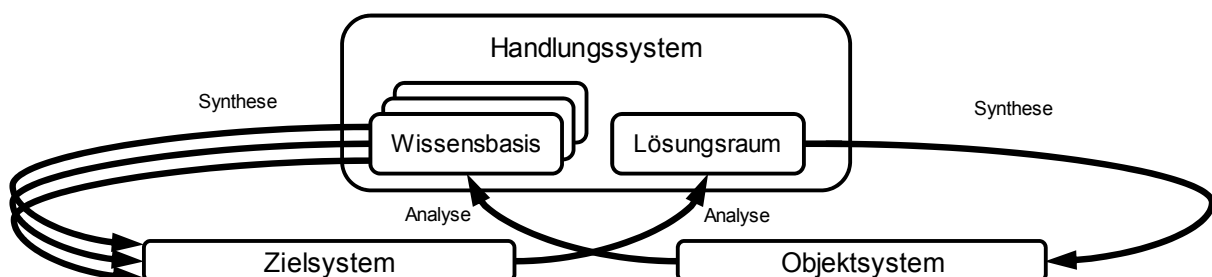


Bild 7-14: Abstimmungs- und Einigungsprozess bei der Synthese des Zielsystems

³⁹⁹ vgl. Specht, Beckmann & Amelingmeyer 2002, S.15

7.3.3 Entwicklungsbeschreibung

Die im Fallbeispiel behandelte Entwicklung des humanoiden Roboters ARMAR IV begann mit einem Treffen des interdisziplinären Kernteams, in welchem gemeinsam das initiale Zielsystem definiert wurde. Dabei hat sich gezeigt, dass hier, ausgehend von dem in der vorherigen Entwicklung gewonnenen Wissen, insbesondere die Ziele besprochen wurden, die eine besonders hohe Tragweite, d.h. einen starken Einfluss auf Chancen und Risiken der Entwicklung, aufwiesen. Als wichtigste Ziele wurden, neben der primären Zielsetzung den Roboter mit zwei Beinen auszustatten, die humanoide Gestaltung und das humanoide Verhalten sowie das autonome Agieren des Roboters ins Zielsystem übernommen⁴⁰⁰.

Autonomes Agieren beinhaltet dabei, dass der Roboter zum einen kein fest vorgegebenes Bewegungsprogramm durchläuft, sondern gesprochene Anweisung des Menschen sowie die physische Beschaffenheit seines Aktionsraums sensorisch wahrnimmt und entsprechend situativ reagiert. Zum anderen beinhaltet Autonomie, dass die gesamte Energieversorgung und Informationsverarbeitung „onboard“, d.h. im Roboter integriert, erfolgt. Im vorangegangenen Prototypen ARMAR III konnte für entsprechende Bauelemente, wie z.B. Akkumulatoren und Mainboards, noch der Bauraum innerhalb der mobilen Plattform des Roboters genutzt werden.

In einer ersten Iteration dieses Fallbeispiels hat sich gezeigt, dass weder für die Stromversorgung noch für die Informationsverarbeitung ausreichend Bauraum in den neu zu entwickelnden Beinen besteht. Als weiteres Ziel wurde daher definiert, dass diese im Torso unterzubringen sind und daher besonders platz- und gewichtssparend ausfallen müssen. Hieraus ergaben sich wiederum Ziele für die verwendeten Antriebseinheiten, welche zum einen möglichst energieeffizient arbeiten sollen, um so mit kleineren Akkumulatoren auszukommen, und zum anderen über eine möglichst hohe Leistungsdichte verfügen sollen, um zusätzlich Gewicht und Bauraum einzusparen. Zudem sollten aus Gründen der Effizienz insgesamt 30 Bewegungsfreiheitsgrade des Roboters durch gleich aufgebaute, sich nur in der Baugröße unterscheidende Antriebseinheiten realisiert werden.

In einer weiteren Iteration wurden mögliche Antriebskonzepte mit unterschiedlichsten Motor-Getriebe-Kombinationen modelliert. Durch die Analyse der Lösungen konnte das Wissen gewonnen werden, dass die bestgeeignete Lösung in der Verwendung von bürstenlosen Drehmomentmotoren und Gleitkeilgetrieben (vgl. Bild 7-15) besteht. Trotz dieses Wissens fiel es dem Kernteam nicht leicht, die Verwendung dieser Motoren als Randbedingung ins Zielsystem zu übernehmen.

⁴⁰⁰ vgl. Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

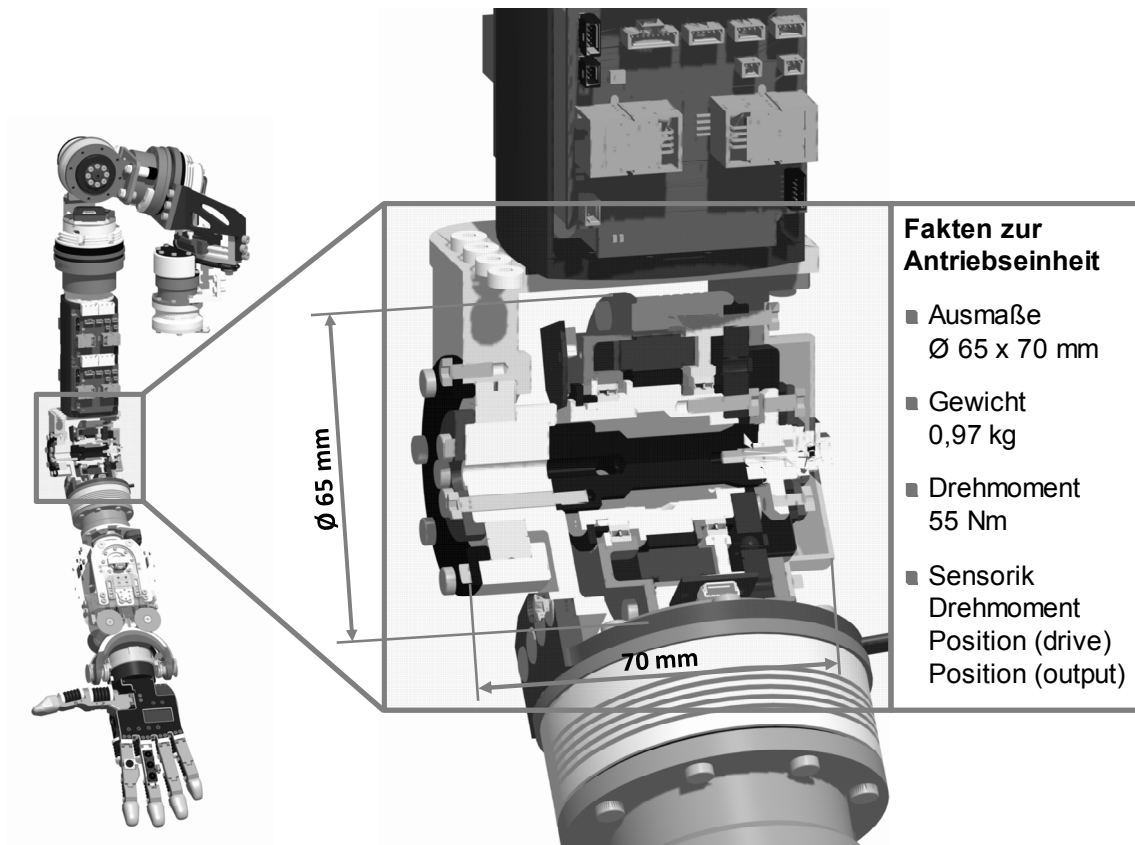


Bild 7-15: Antriebseinheit im humanoiden Roboter ARMAR IV

Dies war zunächst darin begründet, dass die Auswahl der Antriebseinheit eine besonders hohe Tragweite aufweist, da sie im Roboter direkt mehrfach verbaut wird. Ein zusätzliches Risiko ergibt sich dadurch, dass mit der Beauftragung eines externen Zulieferers Entscheidungsverantwortung an diesen abgegeben wird. Die Zielsetzung, die ausgewählte Antriebseinheit zu verwenden, ist folglich nicht nur durch eine hohe Tragweite, sondern auch durch eine begrenzte Einflussnahme, also einen „kleinen Hebelarm“, charakterisiert. Es wurde daher nicht mehr nur von einem wichtigen, sondern von einem kritischen Ziel gesprochen.

Eine weitere Beobachtung, die in diesem Zusammenhang gemacht werden konnte, war die, dass mit der Auftragserteilung für die beschriebenen Antriebseinheiten plötzlich Zielwerte quantifiziert wurden, die sich nicht aus dem aktuellen Stand der Entwicklung ergaben und folglich auch nicht durch die Analyse des Objektsystems bestätigt wurden. Die Festlegung von Größe, Gewicht und Leistung der Antriebseinheiten orientierte sich nicht am exakten, sondern am geschätzten Bedarf der Roboterbaugruppen. Durch die aber nun hart definierten Kennwerte der Antriebseinheit ergaben sich zusätzliche Ziele für die weitere Ausgestaltung der Baugruppen. Dieses Vorgehen unterscheidet sich von den in den vorhergehenden Fallbeispielen beschriebenen Vorgehen. Statt alternative Lösungen zu erzeugen und auszuwählen (erst Reife, dann Härte), wurde hier unter Unsicherheit entschieden und dann darauf aufbauend konkretisiert (erst Härte, dann Reife).

7.3.4 Reflexion

Die Entwicklung des ARMAR IV ist aufgrund der hohen Komplexität durch eine besonders große Menge an miteinander wechselwirkenden Zielen geprägt. Das Fallbeispiel zeigt, dass im Abstimmungs- und Einigungsprozess des interdisziplinären Kernteams nicht alle Ziele beachtet werden können und daher auf die wichtigen und insbesondere auf die kritischen Ziele fokussiert wird. Vom Handlungssystem werden dabei die Ziele priorisiert, die durch eine hohe Tragweite sowie einen geringen Hebelarm charakterisiert werden.

Die **Tragweite** beschreibt die systemische Auswirkung einer Definition oder einer Änderung eines Ziels hinsichtlich des resultierenden Nutzens und Aufwands. Eine hohe Tragweite beinhaltet somit einen starken Einfluss auf Ziel- oder Objektsystem. Die Definition oder Änderung eines solches Ziels birgt ein besonders hohes Potential an Chancen und Risiken und sollte daher mit Bedacht durchgeführt werden. Der **Hebelarm** beinhaltet dahingegen das Potential, ein Ziel ändern zu können bzw. zu dürfen. Ein Ziel ist dann durch einen geringen Hebelarm charakterisiert, wenn das betrachtete Handlungssystem über keine oder nur über eine eingeschränkte Berechtigung zur Zieldefinition oder Zieländerung verfügt. Tragweite und Hebelarm stellen somit zwei Dimensionen dar, mit deren Hilfe eine erste Priorisierung von Zielen vorgenommen werden kann. Einen methodischen Ansatz, der diesen gemeinsamen Entscheidungsprozess in interdisziplinären Entwicklungsteams unterstützt, ist das in Bild 7-16 dargestellte Tragweite-Hebelarm-Portfolio.

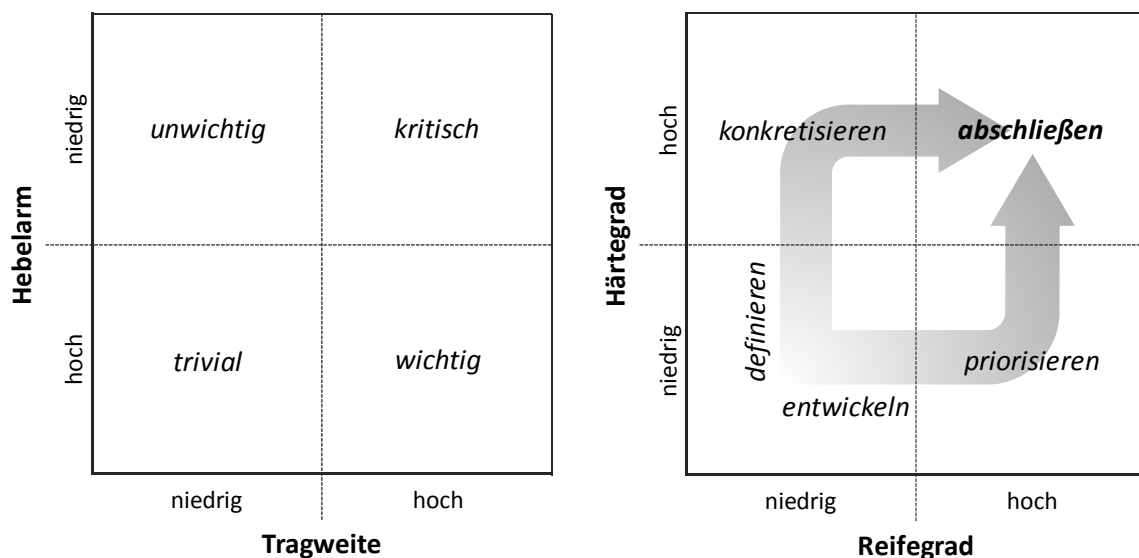


Bild 7-16: Tragweite-Hebelarm-Portfolio und Reifegrad-Härtegrad-Portfolio⁴⁰¹

⁴⁰¹ vgl. Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

Anhand der Beobachtung im Fallbeispiel wurde zudem erkannt, dass Ziele nicht nur ausgehend von einer zunehmenden Wissensbasis weiterentwickelt werden, sondern mitunter auch trotz bestehender Unsicherheiten nahezu unveränderbar quantifiziert werden. Ziele verfügen somit nicht nur über die Dimension eines Reifegrads, sondern auch über die Dimension eines Härtegrads.

Der **Reifegrad** beschreibt die Vollständigkeit hinsichtlich des Verständnisses und der Realisierung eines Ziels. Die Erhöhung des Reifegrads kann nur durch den Hinzugewinn von Wissen und das damit einhergehende Schließen von Wissenslücken erfolgen. Der **Härtegrad** beinhaltet dahingegen die Bereitwilligkeit, ein Ziel beizubehalten. Die Erhöhung des Reifegrades kann nur durch Entscheidungen des Handlungssystems und das damit einhergehende Schließen von Definitionslücken erfolgen. Im Verlauf des Produktentstehungsprozesses nehmen sowohl Reifegrad als auch Härtegrad eines Ziels zu. Dabei ist jedoch zu beachten, dass einerseits der Reifegrad nicht effizient erhöht werden kann, solange der Härtegrad niedrig ist (große Definitionslücken). Auf der anderen Seite kann der Härtegrad nicht effektiv erhöht werden, solange der Reifegrad niedrig ist (große Wissenslücken).

Nachfolgend werden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Entwicklung von Zielen vorgestellt, die beide in jedem Produktentstehungsprozess auftreten, dort aber bewusst und zielgerichtet eingesetzt werden sollten. Beide Wege bieten gewisse Vor- und Nachteile, die im Folgenden anhand des ebenfalls in Bild 7-16 dargestellten Reifegrad-Härtegrad-Portfolios kurz erläutert werden.

Die erste Möglichkeit besteht darin, zuerst den Härtegrad und dann den Reifegrad zu erhöhen. Dazu werden Ziele exakter definiert, als es die aktuelle Wissensbasis eigentlich zulässt. Der Vorteil besteht in einer schnellen und klaren Eingrenzung des Lösungsraums, was eine besonders zeit- und kosteneffiziente Entwicklung ermöglicht. Die Risiken bestehen hier einerseits darin, bei der Synthese des Objektsystems besser geeignete Lösungen direkt auszuschließen und andererseits darin, bei der Analyse des Objektsystems Fehlentscheidungen im Zielsystem festzustellen, die einen hohen Zeit- und Kostenaufwand zur Folge haben kann.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, zuerst den Reifegrad und dann den Härtegrad zu erhöhen. Dazu wird entsprechend des erweiterten ZHO-Modells zunächst Wissen gewonnen, um so die Entscheidungen bei der Synthese des Zielsystems belastbarer zu machen. Der Vorteil dieses Vorgehens besteht darin, dass die bestehenden Ziele sehr zuverlässig sind, d.h. noch verfeinert, aber voraussichtlich nicht mehr geändert werden. Zudem kann ein insgesamt größerer Lösungsraum genutzt werden. Von Nachteil ist hier, dass Zeit- und Kostenaufwände für die zusätzlichen Synthese- und Analyseschritte kaum planbar und somit nur schwer steuerbar sind.

7.4 Fallbeispiel 4: Einbindung des Kunden

7.4.1 Entwicklungssituation

Das vierte Fallbeispiel behandelt die Entwicklung einbaufertiger Nockenwellensysteme. Nockenwellen werden im Automobilbau zur synchronisierten Betätigung der Ein- und Auslassventile von Verbrennungsmotoren verwendet. Bild 7-17 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Nockenwellensystems sowie die Funktionen, die dort durch die Bildung von Wirkflächenpaaren zustande kommen.

Das Grundelement ist der zylinderförmige Nockenwellenkörper, auf dem die einzelnen Nocken für die Ventilbetätigung angeordnet sind. Die Lagerung der Welle erfolgt über Wälzlager, von denen meist eines als Axiallager ausgebildet ist. Die Drehbewegung wird von der Kurbelwelle aus über das Antriebselement eingeleitet. Ein zumeist als Sechskant ausgeführtes Ausrichtelement dient der Montage und Wartung des Systems. Des Weiteren kann zur Bestimmung der Phasenlage der Nockenwelle ein sogenanntes Triggerelement verwendet werden.

Die im Fallbeispiel untersuchte Entwicklungssituation umfasst dabei die iterative Entwicklung von Varianten dieser Nockenwellensysteme in der Angebotsphase. Der betrachtete Entwicklungsprozess ist dabei stark durch den Kunden geprägt, wobei hier nicht der Endkunde (Fahrer), sondern der Automobilhersteller (OEM) gemeint ist.

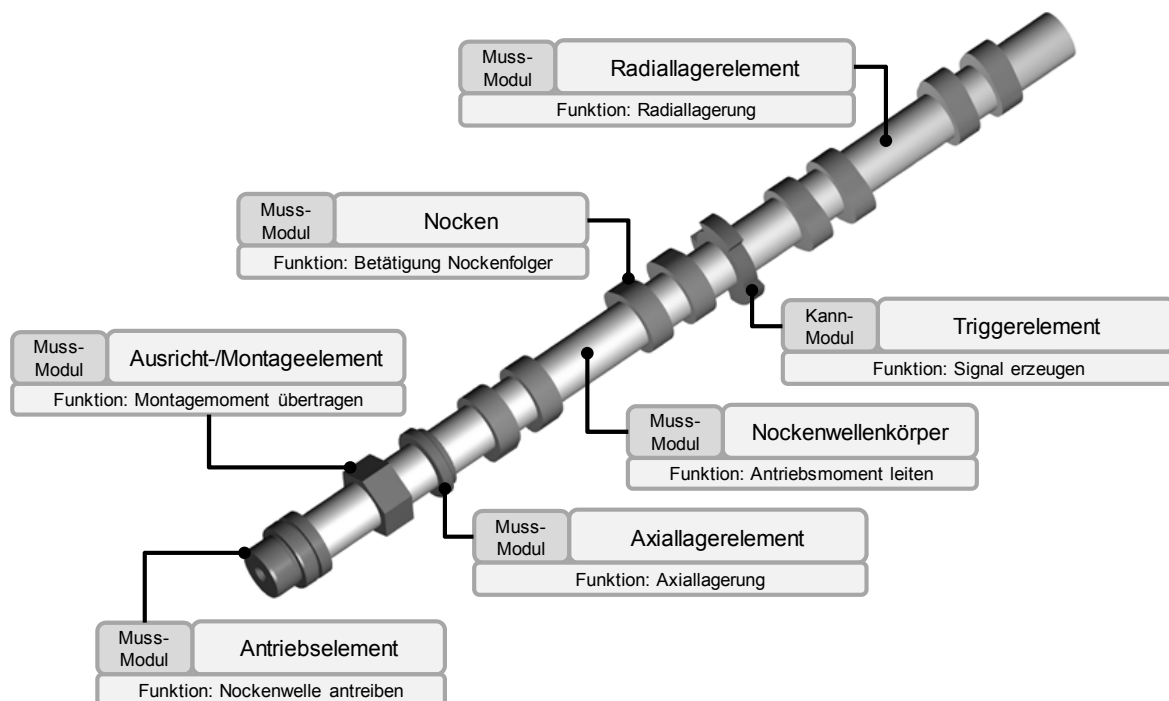


Bild 7-17: Grundsätzlicher Aufbau eines Nockenwellensystems⁴⁰²

⁴⁰² vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

7.4.2 Entwicklungscharakteristik

Das hier vorgestellte Produktentstehungsprojekt umfasst die detaillierte Entwicklung eines Produktes und des entsprechenden Produktionssystems sowie die unmittelbare Einführung des neuen Produktes in den Markt. Insbesondere bei Serienprodukten, die in hoher Stückzahl gefertigt werden, ist dabei die frühe Einbindung des Kunden von zentraler Bedeutung.

Bei variantenreichen Serienprodukten, wie den hier beschriebenen Nockenwellensystemen, gilt es einen Kompromiss zwischen hoher Produktivität und ausreichender Befriedigung individueller Kundenbedürfnisse zu finden. Heutzutage werden daher zumeist vordefinierter Module konfiguriert und kundenspezifisch ausgestaltet, d.h. das Produkt wird zunächst in einer Grundstruktur vorentwickelt und die Anpassung an die individuellen Kundenbedürfnisse erfolgt dann auftragspezifisch⁴⁰³.

Die Auftragserteilung erfolgt zumeist jedoch erst nach erfolgreich abgeschlossener Angebotsphase, in welcher bereits die kundenspezifische Anpassung der Produktvariante einschließlich der dazugehörigen Kostenkalkulation vorliegen muss. In der Regel ist auch die Angebotsphase geprägt von Unsicherheit, so dass zwischen der Angebotsanfrage durch den Kunden und der Angebotsabgabe durch das Unternehmen zumeist mehrere Iteration durchlaufen werden. Grundsätzlich kann der Kunde dabei in die Analyse und Synthese von sowohl Zielsystem als auch Objektsystem involviert werden (vgl. Bild 7-18). Sofern der Kunde selbst als Teil des Handlungssystems verstanden wird, stehen der Entwicklung sogar seine Wissensbasis und sein Verständnis des Lösungsraums zur Verfügung.

In den meisten Fällen ist es jedoch kaum zweckmäßig, den Kunden in jeden Schritt des Entwicklungsprozesses miteinzubeziehen. Vielmehr sollte hier erkannt werden, welche Rolle der Kunde im Prozess einnimmt, und in der Folge bestimmt werden, in welchen Schritten eine enge Kundeneinbindung zielführend vorzunehmen ist.

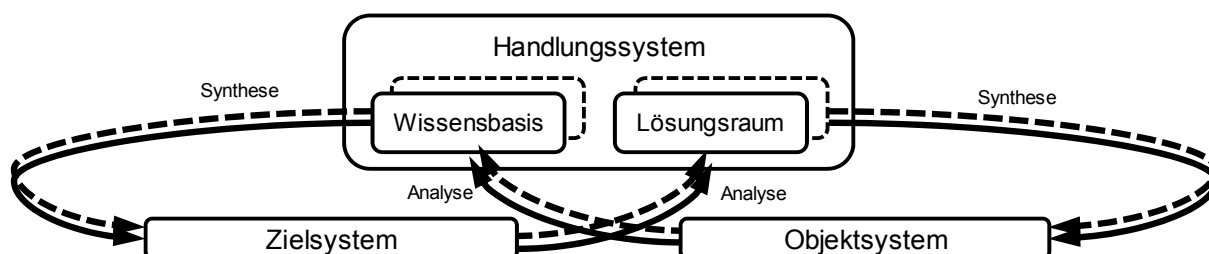


Bild 7-18: Einbindung des Kunden in den jeweiligen Schritten des erweiterten ZHO-Modells

⁴⁰³ vgl. Lindemann & Baumberger 2006

7.4.3 Entwicklungsbeschreibung

Im Fallbeispiel wurden der Ablauf der Angebotsphase sowie die darin enthaltene Entwicklung der kundenspezifischen Variante eines Nockenwellensystems untersucht. Innerhalb des Unternehmens waren am Prozess der Angebotserstellung die Organisationsbereiche Vertrieb, Projektleitung, Konstruktion (Produkt- und Produktionssystementwicklung) und Kalkulation beteiligt (vgl. Bild 7-19).

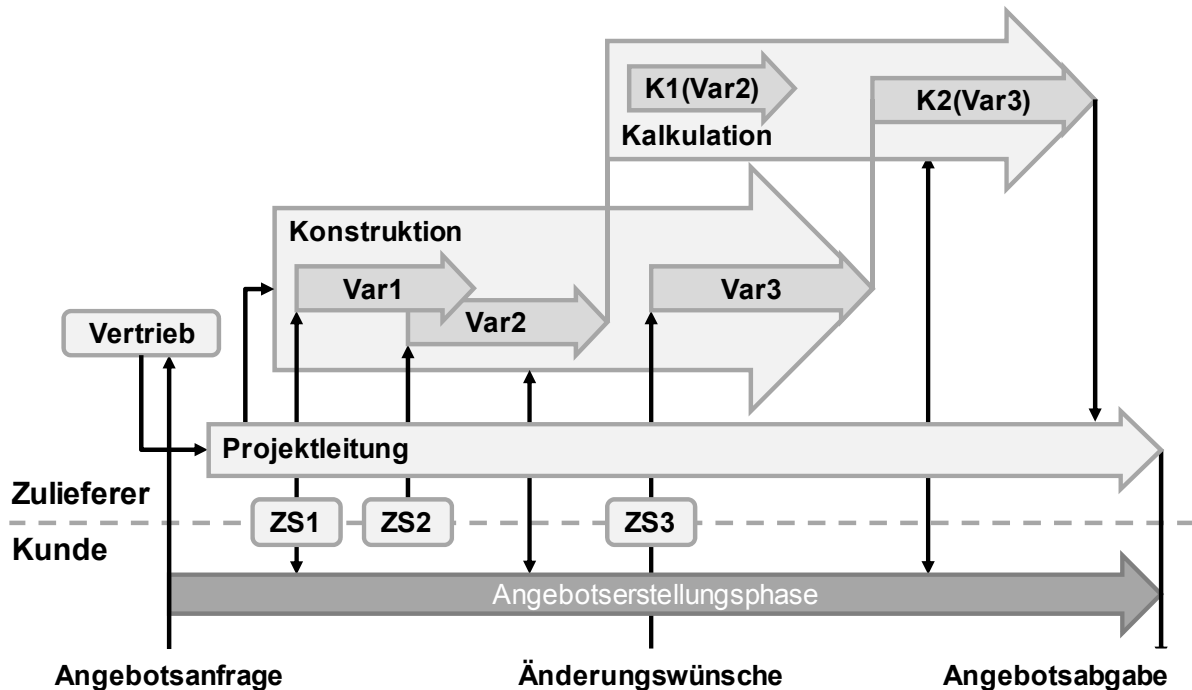


Bild 7-19: Ablauf der Angebotsphase im Fallbeispiel⁴⁰⁴

In einem ersten Schritt wurde die eingehende Kundenanfrage über den Vertrieb an die zuständigen Produktexperten der Projektleitung weitergeleitet, um so eine grundlegende Prüfung der Anfrage vornehmen zu können. Darauf folgend wurde ein erster Abstimmungs- und Einigungsprozess zwischen Kunde, Projektleitung und Konstruktion initiiert, in welchem auf Grundlage der Kundenziele sowie zuliefererspezifischen Gegebenheiten und Randbedingungen ein initiales Zielsystem (ZS1) entwickelt wurde. Trotz zum Teil vager Zielsetzungen konnte zu diesem Zeitpunkt mit der Entwicklung einer Produktvariante (Var1) begonnen werden.

Bevor mit der Kalkulation des Verkaufspreises begonnen werden konnte, musste für die Produktvariante ein vollständiger Zeichnungssatz einschließlich aller Einzelteilzeichnungen (Roh- und Fertigteile) sowie Zusammenbau- und Bearbeitungszeichnungen ausgearbeitet werden. Dieser Syntheseschritt wurde ohne direkte Beteiligung des Kunden durchgeführt.

⁴⁰⁴ vgl. Albers, Walch & Lohmeyer 2012

Im Fallbeispiel konnte beobachtet werden, dass parallel zur Entwicklung der ersten Produktvariante der Abstimmungs- und Einigungsprozess zwischen Kunde, Projektleitung und Konstruktion fortgesetzt wurde. In diesem Prozess wurde erkannt, dass beim Antriebselement voraussichtlich besser eine alternative Bauteilverbindung genutzt werden sollte. Im Folgenden wurde die Tragweite einer solchen Zieländerung bewertet und festgestellt, dass in diesem Fall mit einem vollständig anderen Datensatz gearbeitet werden müsste.

Es wurde daher entschieden, das Zielsystem für die erste Produktvariante bezüglich des Antriebselements nicht zu verändern, sondern stattdessen mit der Ausgestaltung einer zweiten Produktvariante (Var2) zu beginnen, in dessen Zielsystem (ZS2) die alternative Bauteilverbindung des Antriebselements enthalten ist. Es sollten so zwei miteinander vergleichbare Lösungen generiert werden (vgl. Bild 7-19).

Es zeigte sich dann jedoch, dass die parallele Entwicklung zweier Varianten durch die zur Verfügung stehenden Konstruktionskapazitäten nicht fristgerecht umzusetzen wäre. Daher wurde mit Blick auf den Kunden entschieden, den Arbeitsstand zur ersten Produktvariante zu verwerfen und sich stattdessen auf die Produktvariante mit dem aktuelleren Zielsystem zu fokussieren.

Nachdem der vollständige Zeichnungssatz für die ausgewählte Lösung erstellt worden war und die Kalkulation der Produktvariante bereits begonnen hatte, wurden durch den Kunden unerwartet wesentliche Änderungen des Zielsystems (ZS3) gewünscht. In der Konsequenz musste eine andere Fertigungstechnologie verwendet werden. Statt einer gebauten Nockenwelle sollte nun eine geschmiedete verwendet werden, was nicht nur die Verwendung eines anderen Werkstoffs, sondern auch die Berücksichtigung anderer Randbedingungen, für z.B. Fertigung und Montage, zur Folge hatte.

Dem Kunden war es dabei aufgrund eigener Restriktionen nicht möglich, Kompromisse bei der Variantenauswahl einzugehen oder aber einen Aufschub des Angebotsabgabetermins zu gewähren. In der Folge wurde auch die zweite Produktvariante verworfen und mit der Entwicklung einer neuen Variante (Var3) begonnen, welche dann – vollständig ausgearbeitet und kalkuliert – die Erstellung eines Angebots ermöglichte.

Die hier beschriebene Entwicklungstätigkeit war insbesondere dadurch bestimmt, dass in kürzester Zeit unter Unsicherheit eine Produktvariante ausgearbeitet wurde, welche im Vergleich zum Wettbewerb eine bessere Funktionalität zu geringeren Kosten bieten musste, um letztendlich durch den Kunden ausgewählt zu werden.

7.4.4 Reflexion

Das Fallbeispiel zeigt, dass der Kunde einen großen Einfluss auf den Entwicklungsprozess ausüben kann und daher auch in der Modellierung von Produktentstehungssystemen berücksichtigt werden muss. Weiter konnte beobachtet werden, dass dem Kunden in Abhängigkeit des jeweiligen Entwicklungsschritts eine andere Rolle zukommt und er bei bestimmten Schritten, wie im Fallbeispiel bei der Synthese des Objektsystems, bewusst ausgeschlossen wird.

WECHT⁴⁰⁵ unterscheidet in seiner Forschungsarbeit zwischen insgesamt vier Rollen, die ein Kunde in einen Produktentstehungsprozess einnehmen kann. Diese sind: Spezifikator, Sensor, Spezialist und Selektor. Er nutzt die Definition dieser Kundenrollen, um Aussagen darüber ableiten zu können, an welchen Stellen im Prozess der Kunde in welcher Rolle eingebunden werden sollte, um die Entwicklung möglichst effektiv, aber auch möglichst effizient zu unterstützen. Im Folgenden werden die vier Kundenrollen den Entwicklungsschritten des erweiterten ZHO-Modells zugeordnet und im Einzelnen erläutert (vgl. Tabelle 7-1).

In der Analyse des Objektsystems kann der Kunde in seiner Rolle als **Selektor** eingebunden werden. Dem Kunden werden dazu unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten vorgestellt, die er miteinander vergleichen und bewerten kann. Im Fallbeispiel wurden dem Kunden zu Beginn der Angebotsphase verschiedene vordefinierte Produktvarianten präsentiert und deren Vor- und Nachteile gemeinsam diskutiert. Der Kunde wurde nach seiner Einschätzung gefragt, so dass bereits hier eine erste Vorauswahl möglicher Lösungen getroffen werden konnte. Bei der Entwicklungen von Produkten, die durch eine starke Wechselwirkung von Produkt und Mensch bestimmt sind, kann neben der Kundenbefragung auch eine Kundenbeobachtung durchgeführt werden, in welcher die direkte Produkthanwendung untersucht wird.

In der Synthese des Zielsystems kommt dem Kunden oftmals die Rolle des **Spezifikators** zu. Der Kunde ist dabei entweder alleiniger Entscheider über Inhalte und Struktur des expliziten Zielsystems, oder aber – und dieser Fall tritt sehr viel häufiger ein – er ist ein wesentlicher Mitbestimmer bei der Definition sowie der Verfeinerung und Änderung des Zielsystems entlang des Produktentstehungsprozesses. Das Fallbeispiel zeigt, dass die Spezifikationen des Kunden unsicherheitsbehaftet sein können. Durch ein zunehmendes Verständnis der Kundenbedürfnisse (epistemische Unsicherheit) oder aber das Eintreten unvorhersehbarer Ereignisse (aleatorische Unsicherheit), sind so immer wieder Änderungen des Zielsystems mit Berücksichtigung der entsprechenden Tragweite abzustimmen.

⁴⁰⁵ vgl. Wecht 2005, S.161ff.

In die Analyse des Zielsystems kann der Kunde nicht direkt eingebunden werden, da es sich hier um die subjektive Wahrnehmung und individuelle Interpretation des expliziten Zielsystems handelt. Nichtsdestotrotz ist es in diesem Schritt von besonderer Wichtigkeit, dass sich die Entwickler des Handlungssystems in die Sicht des Kunden hineinversetzen und die Interpretation des Zielsystems am Kundenwert (engl. Customer Value), d.h. am persönlichen Nutzen für den Kunden sowie an den Erwartungen durch den Kunden⁴⁰⁶, auszurichten. Der Kunde nimmt an dieser Stelle die Rolle eines **Sensors** ein, der zur kundenorientierten Eingrenzung des Lösungsraums eingesetzt werden kann. Auf diese Weise können auch implizite Ziele, d.h. Ziele die selbstverständlich erscheinen oder aber Ziele, die dem Kunden noch nicht bewusst sind, zur Eingrenzung des Lösungsraums verwendet werden.

In die Synthese des Objektsystems wird der Kunde dann eingebunden, wenn seine Kompetenz für die direkte Mitgestaltung virtueller und physischer Modelle erforderlich ist. Der Kunde wird hier folglich in seiner Rolle als **Spezialist** in die Entwicklung integriert. In der Mehrzahl von Produktentstehungsprozessen, so auch im Fallbeispiel, wird der Kunde bei der Synthese von Objekten jedoch bewusst ausgeschlossen, um firmenspezifisches Wissen, über z.B. Fertigungstechnologien oder Kalkulationsverfahren, zu schützen. Allerdings bietet sich durch die Integration des Kunden als Spezialist insbesondere bei der Entwicklung von Systembaugruppen das Potential, technische wie auch wirtschaftliche Synergien zu nutzen und so gemeinsam neuartige Lösungen zu generieren. Die Einbindung des Kunden geht an dieser Stelle zumeist mit seiner Integration ins Handlungssystem einher, so dass der Kunde entsprechend Bild 7-18 in alle Entwicklungsschritte involviert ist.

Tabelle 7-1: Mögliche Kundenrollen in der Produktentstehung in Anlehnung an WECHT⁴⁰⁷

	Spezifikator	Sensor	Spezialist	Selektor
Schritt	Synthese des Zielsystems	Analyse des Zielsystems	Synthese des Objektsystems	Analyse des Objektsystems
Zweck	Kundenbedürfnis erkennen	Kundenerwartung berücksichtigen	Kundenkompetenz nutzen	Kundenreaktion untersuchen
Inhalt	(Mit-) Entscheider bei der Definition, Verfeinerung und Änderung von Zielen	Bewertungsmaßstab bei der Interpretation von Zielen	(Mit-) Gestalter bei der Entwicklung virtueller und physischer Modelle	Bewertungsmaßstab bei der Prüfung von Objekten

⁴⁰⁶ vgl. Schulte 2006, S.22f.

⁴⁰⁷ vgl. Wecht 2005, S.162

8 Bedeutung der Arbeit

8.1 Bedeutung für die Forschung

Die Konstruktions- und Entwicklungswissenschaft befasst sich mit der Untersuchung der Arbeits- und Denkweisen von Entwicklern, dem Aufbau von Strukturen für den Entwicklungsprozess, der Entwicklung und der Anwendung neuer Entwicklungsmethoden und -techniken, der Reflexion über die Beschaffenheit und das Ausmaß von Entwicklungswissen sowie dessen Anwendung auf Entwicklungsprobleme⁴⁰⁸. Der Entwickler ist somit nicht nur der zentrale Untersuchungsgegenstand der Forschung, sondern letztendlich auch der Anwender und Nutzer der im Rahmen der Forschung entwickelten Methoden und Werkzeuge. Trotz dieses allgemein akzeptierten Selbstverständnisses der Forschung steht der Entwickler zumeist aber nicht im Mittelpunkt der dortigen Modellierung. In der Vielzahl existierender Modelle wird der Entwickler nicht abgebildet und bleibt folglich oftmals auch unberücksichtigt.

Das erweiterte ZHO-Modell stellt einen menschenzentrierten Ansatz dar, der die individuellen Aspekte des Entwicklers, d.h. sein Vorwissen und seine Erfahrung sowie seine individuelle Wahrnehmung und Interpretation, in Form der Wissensbasis und des Lösungsraums berücksichtigt und in das System der Produktentstehung einordnet. Durch die Verknüpfung der mentalen Elemente des Handlungssystems und der expliziten Elemente des Ziel- und Objektsystems kann so nicht nur die zentrale Bedeutung geteilter mentaler Modelle erklärt werden. Auch das Verständnis bisheriger Beobachtungen, z.B. zum reflexiven Handeln oder zum opportunistischen Vorgehen, kann mit dem Modell weiter unterstützt werden.

Das erweiterte ZHO-Modell verbindet zudem die Forschungen an Co-Evolution und Iteration. Beide basieren auf der Erkenntnis, dass jeder Produktentstehungsprozess unsicherheitsbehaftet und durch einen kontinuierlichen Wissenszugewinn bestimmt ist. Die Forschung zur Co-Evolution betrachtet dabei die produktseitigen Wechselwirkungen von Problem und Lösung, die Iterationsforschung die prozesseitige Abfolge von Analyse und Synthese. Das erweiterte ZHO-Modell integriert die beiden Sichtweisen durch die co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem, die durch das kontinuierliche Durchlaufen einer iterativer Analyse- und Syntheseschritten stetig erweitert und verfeinert werden. Das Modell zeigt dabei, dass die Entwicklung des Zielsystems ebenso relevant ist, wie die des Objektsystems.

⁴⁰⁸ vgl. Cross 1984

8.2 Bedeutung für die Praxis

Die zentralen, aus der Praxis heraus geäußerten Kritikpunkte an der Konstruktions- und Entwicklungswissenschaft werden u.a. von BENDER⁴⁰⁹ zusammengefasst. Dazu zählen auch die folgenden drei Kritikpunkte:

- Erkenntnisse der Kognitionspsychologie über individuelle Denk- und Handlungsformen beim Entwickeln und Konstruieren spiegeln sich in "technizistisch verengten" Modellvorstellungen vom kognitiven Problemlösen nicht wider. Insbesondere werden diskursiv-rationale Denkformen und Problemlösestrategien gegenüber den kognitiv aufwandsärmeren, erfahrungsbasierten und eher intuitiven überbewertet. Kreativität und Intuition werden so behindert.
- Die Ausgangsinformation am Beginn eines Prozesses kann unmöglich die zur Problemlösung notwendige Information vollständig enthalten, was im Informationsverarbeitungsmodell jedoch vorausgesetzt wird. Die Problemklärung ist im Gegenteil notwendig an die Lösungskonkretisierung gebunden.
- Phasenmodelle und Ablaufschemata sind zu linear und berücksichtigen Iterationen, die in jedem Falle unvermeidbar sind, nicht oder nicht ausreichend.

Das erweiterte ZHO-Modell zeigt hier Ansätze auf, diesen Kritikpunkten nachzukommen und leistet somit einen Beitrag, die oft beklagte Lücke zwischen Theorie und Praxis⁴¹⁰ zu überwinden. Einerseits werden durch die Wissensbasis Vorwissen und Erfahrung des Entwicklers berücksichtigt, andererseits werden mit dem Lösungsraum zunächst nur die Grenzen der Lösungssuche diskursiv-rational hergeleitet. Die Lösungssuche selbst ist dahingegen primär von Kreativität und Intuition bestimmt.

Das Modell berücksichtigt zudem Unsicherheit als natürlichen Bestandteil der Produktentstehung. Folglich wird auch kein vollständiger Informationsstand zu Beginn des Produktentstehungsprozesses vorausgesetzt, vielmehr stellt der kontinuierliche Zugewinn von Wissen selbst einen zentralen Inhalt des Prozesses dar. Durch die co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem wird zudem die gegenseitige Abhängigkeit von Problem und Lösung abgebildet.

Das erweiterte ZHO-Modell lässt Iterationen nicht nur zu, sondern erklärt diese zum grundlegenden Wesensbestandteil des Prozesses. Eine Iteration wird dabei nicht als Rücksprung in eine vorhergehende Phase, sondern als Fortschritt im Wissen um Problem und Lösung dargestellt. Das Modell beinhaltet somit das Verständnis, dass Iterationen nicht nur unvermeidbar, sondern essentiell und notwendig sind.

⁴⁰⁹ vgl. Bender 2004, S.46f.

⁴¹⁰ vgl. Birkhofer 2004

8.3 Bedeutung für die Lehre

Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass einer Großzahl von Studierenden die hohe Bedeutung von Zielen in Produktentstehungsprojekten bereits bewusst ist⁴¹¹. Durch das erweiterte ZHO-Modell kann die Bedeutung von Zielen zudem im systemischen Zusammenhang erläutert und so das Verständnis noch weiter vertieft werden.

Anhand des Modells kann Studierenden vermittelt werden, welche Schwierigkeiten in Abstimmungs- und Einigungsprozessen bei der Synthese des Zielsystems im Team auftreten, wenn dieser Prozess auf unterschiedlichen Wissensbasen aufbaut. Es kann erklärt werden, weshalb es zunächst der Bildung geteilter mentaler Modelle bedarf, um ein gemeinsames Problemverständnis aufzubauen und ein stimmiges Zielsystem abzuleiten. Zudem kann verständlich gemacht werden, dass explizite Zielebeschreibungen von den beteiligten Entwicklern immer individuell wahrgenommen und interpretiert werden, darin jedoch nicht nur Nachteile, sondern auch Vorteile, wie z.B. ein insgesamt größerer Lösungsraum, zu sehen sind.

Des Weiteren sollten Studierende bereits frühzeitig in ihrer Ausbildung mit unsicherheitsbehafteten Problemstellungen konfrontiert werden. Der professionelle Umgang mit Unsicherheit stellt eine für das spätere Berufsleben notwendige Schlüsselkompetenz dar. Ein Großteil der Aufgabenstellungen in der universitären Lehre ist zumeist jedoch von Beginn an vollständig bestimmt. Das Lösungsvorgehen ist in immer gleichen Verfahrensschritten beschrieben und oftmals gibt es nur eine richtige Lösung. Eine Lehre mit unsicherheitsbehafteten Problemstellungen muss sich dabei neuen Herausforderungen stellen, da sie mit einem intensiveren Betreuungsaufwand sowie einer erschwerten Leistungsbewertung einhergeht.

In der heutigen Lehre der Konstruktions- und Entwicklungsmethodik werden Iterationen zumeist einseitig als kosten- und zeitintensive Wiederholungsschritte dargestellt, die es nach Möglichkeit zu vermeiden gilt. Das erweiterte ZHO-Modell kann hier dafür genutzt werden, den Studierenden auch die andere Sichtweise auf Iterationen zu vermitteln. Diese beinhaltet, dass Iterationen in der Regel mit dem Gewinn von notwendigem fallspezifischem Wissen einhergehen und folglich nicht zu vermeiden sind. Hier ist es die Aufgabe der Lehre, diesen Widerspruch wie auch seine Folgen für den Produktentstehungsprozess aufzuzeigen. Studierenden sollte hier vermittelt werden, wann sie Iterationen bewusst provozieren sollten und wie sie, z.B. durch Anwendung von Eskalationsstrategien⁴¹², mit unerwarteten Iterationen in Stage-Gate-gesteuerten Entwicklungsprozessen umgehen können.

⁴¹¹ vgl. Albers, Lohmeyer & Alink 2010

⁴¹² vgl. Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer 2012

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde mit dem **erweiterten ZHO-Modell** (vgl. Bild 9-1) ein menschenzentriertes Erklärungsmodell entwickelt, das den Entwickler als denkenden und handelnden Menschen im Mittelpunkt eines unsicherheitsbehafteten und iterativ verlaufenden Produktentstehungsprozesses beschreibt. Das Modell zeigt, wie der Entwickler auf Basis seines Wissens und seines Vorstellungsvermögens in iterativen Analyse- und Syntheseschritten durchgängig fallspezifisches Wissen generiert, dann damit bestehende Wissens- und Definitionslücken schließt und so in der Entwicklung des Produktes kontinuierlich voranschreitet.

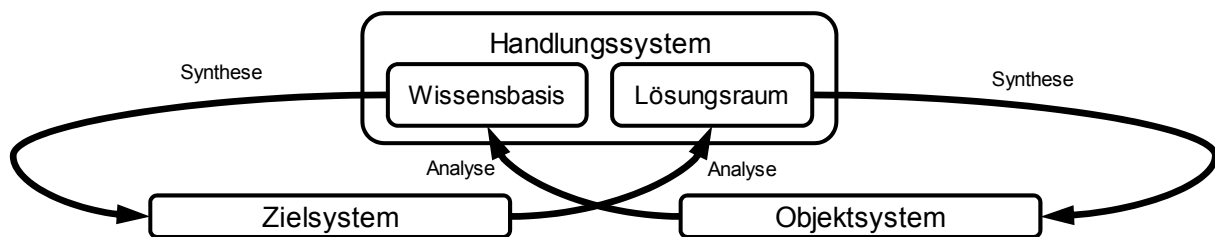


Bild 9-1: Erweitertes ZHO-Modell (Liegende Acht)

Das erweiterte ZHO-Modell basiert auf einem systemtechnischen Ansatz, welcher Produktentstehung als Interaktion von Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem beschreibt. Dabei beinhaltet das Zielsystem alle expliziten Ziele, einschließlich deren Abhängigkeiten und Randbedingungen, während das Objektsystem neben dem Produkt alle im Produktentstehungsprozess generierten Dokumente sowie alle virtuellen und physischen Modelle umfasst. Das Handlungssystem ist als das System definiert, welches ein (anfänglich vages) Zielsystem in ein konkretes Objektsystem überführt.

Ausgehend von dem Verständnis, dass der Mensch im Zentrum der Entwicklung steht, also er derjenige ist, welcher das Zielsystem in das Objektsystem überführt, kann der Mensch selbst als Handlungssystem beschrieben werden. Im erweiterten ZHO-Modell bildet daher der Entwickler das Handlungssystem, welches ausgehend von seiner individuellen Wissensbasis das explizite Zielsystem definiert. Durch die Analyse des Zielsystems wird die Begrenzung des Lösungsraums, d.h. des Raums, der die Menge der zulässigen Lösungen beschreibt, bestimmt. Die subjektive Wahrnehmung und Interpretation des Zielsystems führt dazu, dass jeder Entwickler einen individuellen Lösungsraum aufspannt, in welchem er dann Lösungen zunächst in Form mentaler Modelle vorausdenkt und diese dann als virtuelle oder physische

Objekte umsetzt. Durch die Analyse dieser Objekte kann nun wiederum neues fallspezifisches Wissen gewonnen werden, welches dem Entwickler erlaubt, das Zielsystem weiter zu ergänzen, zu verfeinern oder zu verändern. Die Entwicklung eines Produktes wird somit als iterativer Prozess abgebildet, in welchem Ziel- und Objektsystem co-evolutionär, d.h. gleichzeitig und in wechselseitiger Abhängigkeit, entwickelt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das erweiterte ZHO-Modell in vier unterschiedlichen Entwicklungsprojekten experimentell untersucht. In den einzelnen Fallbeispielen konnte der iterative Prozess von Analyse- und Syntheseschritten, ebenso wie die co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem beobachtet und das erweiterte ZHO-Modell somit für den ihm zugedachten Zweck bestätigt werden.

Die **Berücksichtigung individueller Denk- und Handlungsvorgänge** erlaubt dabei die Abbildung eines erfahrungsbasierten und opportunistischen Vorgehens in der Entwicklung. Mit der Wissensbasis, als einem der beiden zentralen Elemente des Handlungssystems, wird das individuelle Wissen des Entwicklers einschließlich der ihm bekannten mentalen Modelle in die Betrachtung miteinbezogen. Das zweite zentrale Element, der Lösungsraum, repräsentiert zudem das subjektive Verständnis der Zielsetzung und bildet so den individuellen mentalen Gestaltungsfreiraum zur Entwicklung neuer Lösungsideen.

Die **Berücksichtigung epistemischer Unsicherheit** (d.h. Unsicherheit, die durch Wissenszugewinn verringert werden kann) beinhaltet das Verständnis, dass eine vollständige Klärung der Aufgabenstellung vor der ersten Prinzip- und Gestaltmodellierung nicht möglich ist. Das erweiterte ZHO-Modell zeigt hier, dass durch die co-evolutionäre Entwicklung von Ziel- und Objektsystem erklärt werden kann, wie die Unsicherheit entlang des Produktentstehungsprozesses kontinuierlich verringert wird. Dabei wird durch die Analyse von Objekten kontinuierlich fallspezifisches Wissen gewonnen, so dass zunächst Wissenslücken und dann, durch die Konkretisierung des Zielsystems, auch Definitionslücken schrittweise geschlossen werden können.

Die **Berücksichtigung iterativer Entwicklungsprozesse** ermöglicht zudem eine realitätsnahe Abbildung von Entwicklungsabläufen, die durch den beständigen Wechsel von Analyse- und Syntheseschritten bzw. Internalisierungs- und Externalisierungsprozessen bestimmt sind. Das erweiterte ZHO-Modell erklärt eine Iteration nicht als Rücksprung in eine vorhergehende Phase, sondern als Fortschritt im Wissen um Problem und Lösung. Das Modell betont somit die essentielle Wichtigkeit und Notwendigkeit von Iterationen und zeigt insbesondere auf, dass die Zielpräzisierung – im Sinne einer iterativen Zielentwicklung – selbst Inhalt der Entwicklungstätigkeit ist.

9.2 Ausblick

Zukünftige Forschungsarbeiten werden zum einen die Durchführung weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen beinhalten, in welchen das erweiterte ZHO-Modell zur Erklärung spezifischer Aspekte der Entwicklungstätigkeit herangezogen wird. Zum anderen sollen auf Basis des erweiterten ZHO-Modells neuartige Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Entwickler im Produktentstehungsprozess erarbeitet und eingesetzt werden.

Im Bereich des **Systems Engineering** besteht zusätzlicher Forschungsbedarf in der fachdisziplinübergreifenden Modellierung von Zielsystemen. Bei der interdisziplinären Entwicklung komplexer Produkte sind einfache Zielrepräsentationen wie z.B. Anforderungslisten oder Lasten-/Pflichtenhefte nicht länger ausreichend. Hier werden Modelle benötigt, die einerseits die Zusammenhänge einzelner Ziele abbilden und andererseits mit der dynamischen Entwicklung von Zielen schritthalten können. Durch die durchgängige Modellierung von Zielsystemen könnte so beispielsweise die Tragweite von Zieländerungen, d.h. die resultierenden Chancen und Risiken, frühzeitig im Produktentstehungsprozess erkannt werden.

Ausgehend von dem erweiterten ZHO-Modell ist dabei sowohl die Synthese, als auch die Analyse des Zielsystems zu beachten. Um in einem interdisziplinären Team erfolgreich eingesetzt zu werden, sollte das Zielsystem in einer von allen Beteiligten verständlichen Modellierungssprache dargestellt werden, so dass innerhalb des Teams geteilte mentale Modelle aufgebaut werden können. Die Herausforderung der Forschung besteht hierbei darin, eine einheitliche Modellierungssprache zu definieren, die jedoch ausreichend flexibel einzusetzen sein muss, um die vorausgedachten Zielvorstellungen einzelner Teammitglieder zweckdienlich repräsentieren zu können. Bei der Analyse des Zielsystems gilt es, die individuellen Interessen und Verantwortungen der einzelnen Entwickler zu berücksichtigen. Diesen muss es möglich sein, eigene Sichten auf das Zielsystem zu erzeugen, um in der großen Menge von Zielen das für sie relevante System-of-Interest darstellen zu können. Für die Priorisierung von Zielen kann dabei das vorgestellte Tragweite-Hebelarm-Portfolio bzw. das Reifegrad-Härtegrad-Portfolio verwendet werden.

Zukünftige Forschungsarbeiten werden sich hier insbesondere mit Fragen zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz⁴¹³ befassen. So müssen beispielsweise auch die Methoden und Werkzeuge zur Modellierung von Zielsystemen eine ausreichende Leistungsfähigkeit, Handhabbarkeit und Anpassbarkeit aufweisen, um von Entwickler und Unternehmen gleichermaßen akzeptiert zu werden.

⁴¹³ vgl. Albers, Lohmeyer & Radimersky 2012

Im Bereich der **menschzentrierten Entwicklungsmethodik** zeigt das erweiterte ZHO-Modell gleich mehrere Forschungsbedarfe auf. Zum einen gilt es, die individuellen Elemente des Handlungssystems, d.h. die Wissensbasis und den Lösungsraum näher zu untersuchen, zum anderen bieten auch die einzelnen Analyse- und Syntheseschritte, welche jeweils eine Schnittstelle zwischen der internen und der externen Welt des Menschen darstellen, vielversprechende Ansatzpunkte zukünftiger Forschungsarbeiten.

Die experimentellen Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass das erweiterte ZHO-Modell die Möglichkeit bietet, auch die Entwicklung im Team abzubilden, wobei das Modell hier ein hohes Potential aufweist, die auftretenden Interaktionsprozesse auf Basis individueller Aspekte, wie z.B. Wissen, Wahrnehmung, Interpretation, Verständnis und Interesse, zu betrachten. Auf diese Weise können neue Erkenntnisse über Abstimmungs-, Einigungs- und Entscheidungsprozesse ebenso wie über Problemlösungs-, Analogiebildungs- und Inventionsprozesse gewonnen werden. Dies erlaubt wiederum Rückschlüsse zu in der Teamarbeit entstehenden Synergien bzw. Konflikten, welche durch Unterstützung von neuartigen Methoden bewusst verstärkt bzw. vermindert werden können.

In einer menschzentrierten Entwicklungsmethodik gilt es neben dem Entwickler auch den Kunden als wesentlichen Akteur in der Produktentstehung zu berücksichtigen. Es konnte bereits gezeigt werden, dass entsprechend des erweiterten ZHO-Modells der Kunde in seinen Rollen als Spezifikator, Sensor, Spezialist oder Selektor in die einzelnen Analyse- und Syntheseschritte des iterativen Entwicklungsprozesses eingebunden werden kann. Zukünftige Forschungsarbeiten werden sich darauf aufbauend mit neuen Strategien zu einer situationsspezifischen Kundenintegration befassen. Dabei sollen insbesondere die bewusste Einbindung von Wissensbasis und Lösungsraum des Kunden berücksichtigt werden.

Das erweiterte ZHO-Modell verdeutlicht die hohe Bedeutung der Validierung in der Entwicklung. Erst durch die kontinuierliche Analyse von Objekten kann fallspezifisches Wissen gewonnen und so das Zielsystem konkretisiert werden. Validierung umfasst dabei keineswegs nur die Verwendung professioneller Berechnungswerkzeuge und Prüfverfahren. Validierung beginnt bereits bei den ersten Tests zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit mittels einfacher mentaler, virtueller und physischer Produktmodelle. Auch hier gilt es, dem Entwickler neuartige Möglichkeiten aufzuzeigen, die ihn in seinem Denken und Handeln unterstützen und ihn dazu befähigen, Ingenieurskunst und Ingenieurwissenschaft kombiniert zu nutzen.

10 Literaturverzeichnis

Adolphy, Gericke & Blessing 2009

Adolphy, S., Gericke, K. and Blessing, L. (2009) 'Estimation and its Role in Engineering Design – An Introduction'. In *17th International Conference on Engineering Design ICED'09*, Stanford, USA.

Ahmed 2007

Ahmed, S. (2007) 'Empirical Research in Engineering Practice'. In *International Journal of Design Research*, Vol.6, No.3, pp.359-380.

Ahmed, Bracewell & Kim 2005

Ahmed, S., Bracewell, R. and Kim, S. (2005) 'Engineering Knowledge Management Processes'. In *A Symposium in Honour of Ken Wallace*, Cambridge, UK.

Ahrens 2000

Ahrens, G. (2000) *Das Erfassen und Handhaben von Produktanforderungen – Methodische Voraussetzungen und Anwendung in der Praxis*. Dissertation, TU Berlin.

Akao 1990

Akao, Y. (1990) *Quality Function Deployment – Integrating Customer Requirements into Product Design*. Productivity Press, New York.

Albers 2010

Albers, A. (2010) 'Five Hypotheses and a Meta Model of Engineering Design Processes'. In *8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010*, Ancona, Italy.

Albers 2011

Albers, A. (2011) 'Der Entwickler im Zentrum des Systems der Produktentstehung'. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2011*, Stuttgart.

Albers & Braun 2011

Albers, A. und Braun, A. (2011) 'Der Prozess der Produktentstehung'. In Henning, F. und Moeller, E. (Hrsg.) *Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Hanser, München, S.5-30.

Albers & Düser 2010

Albers, A. and Düser, T. (2010) 'A New Process for Configuration and Application of Complex Validation Environments Using the Example of Vehicle-in-the-Loop at the Roller Test Bench'. In *International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE 2010*, Vancouver, Canada.

Albers & Gausemeier 2010

Albers, A. und Gausemeier, J. (2010) 'Von der fachdisziplinorientierten zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung'. In *10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2020 – Produktion in Deutschland hat Zukunft*, Karlsruhe, S.248-256.

Albers & Lohmeyer 2012

Albers, A. and Lohmeyer, Q. (2012) 'Advanced Systems Engineering – Towards a Model-Based and Human-Centered Methodology'. In *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2012*, Karlsruhe, Germany.

Albers & Meboldt 2007

Albers, A. and Meboldt, M. (2007) '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.

Albers & Muschik 2010

Albers, A. and Muschik, S. (2010) 'Development of Systems of Objectives in Early Activities of Product Development'. In *8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010*, Ancona, Italy.

Albers, Behrendt & Ott 2010

Albers, A., Behrendt, M. and Ott, S. (2010) 'Validation – Central Activity to Ensure Individual Mobility'. In *FISITA 2010 World Automotive Congress*, Budapest, Hungary, No.84 (B).

Albers, Braun & Muschik 2010

Albers, A., Braun, A. and Muschik, S. (2010) 'Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes'. In *1st International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP 2010*, Cambridge, UK, pp.15-26.

Albers, Breitschuh & Lohmeyer 2012

Albers, A., Breitschuh, J. and Lohmeyer, Q. (2012) 'Dependency and Structure Matrix Modelling for Human Resource Allocation'. In *14th International Dependency and Structure Modelling Conference DSM '12*, Kyoto, Japan.

Albers, Brudniok, Otnad, Sauter & Sedchaicharn 2007

Albers, A., Brudniok, S., Otnad, J., Sauter, C. and Sedchaicharn, K. (2007) 'Design of Modules and Components for Humanoid Robots'. In de Pina Filho, A.C. (ed.) *Humanoid Robots – New Developments*, Advanced Robotic Systems International, Vienna, pp.1-16.

Albers, Burkardt, Meboldt & Saak 2005

Albers, A., Burkardt, N., Meboldt, M. and Saak, M. (2005) 'SPALTEN Problem Solving in the Product Development'. In *15th International Conference on Engineering Design ICED'05*, Melbourne, Australia.

Albers, Deigendesch & Meboldt 2008

Albers, A., Deigendesch, T. and Meboldt, M. (2008) 'Handling Complexity – A Methodological Approach Comprising Process and Knowledge Management'. In *7th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2008*, Izmir, Turkey, pp.1247-1258.

Albers, Ebel & Alink 2011

Albers, A., Ebel, B. und Alink, T. (2011) 'Erfolgsfaktoren der Interdisziplinarität. Ein Bericht'. In Banse, G. und Fleischer, L.-G. (Hrsg.) *Wissenschaft im Kontext. Inter- und Transdisziplinarität in Theorie und Praxis*, trafo Wissenschaftsverlag, Berlin, S.203-214.

Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

Albers, A., Ebel, B. and Lohmeyer, Q. (2012) 'Systems of Objectives in Complex Product Development'. In *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2012*, Karlsruhe.

Albers, Geier & Merkel 2011

Albers, A., Geier, M. and Merkel, P. (2011) 'Validation Activities in the X-in-the-Loop Framework'. In *Vehicle Property Validation*, Bad Nauheim, Germany.

Albers, Lohmeyer & Alink 2010

Albers, A., Lohmeyer, Q. and Alink, T. (2010) 'On the Importance of Handling Objectives in Design Education Project Work'. In *12th International Conference on Engineering and Product Design Education E&PDE 2010*, Trondheim, Norway.

Albers, Lohmeyer & Ebel 2011

Albers, A., Lohmeyer, Q. and Ebel, B. (2011) 'Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects'. In *18th International Conference on Engineering Design ICED'11*, Copenhagen, Denmark, Vol.2, pp.256-265.

Albers, Lohmeyer & Radimersky 2012

Albers, A., Lohmeyer, Q. und Radimersky, A. (2012) 'Individuelle und organisatorische Akzeptanz von Methoden des Systems Engineering'. In *Tag des Systems Engineering TdSE 2012*, Paderborn.

Albers, Lohmeyer & Schmalenbach 2011

Albers, A., Lohmeyer, Q. and Schmalenbach, H. (2011) 'TRIZ-Box in Design Education – A Study on Supporting Creativity'. In *13th International Conference on Engineering and Product Design Education E&PDE 2011*, London, UK, No.260.

Albers, Muschik & Braun 2010

Albers, A., Muschik, S. und Braun, A. (2010) 'Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs im System der Produktentstehung'. In *Tag des Systems Engineering TdSE 2010*, München, S.87-96.

Albers, Muschik & Ebel 2010

Albers, A., Muschik, S. und Ebel, B. (2010) 'Einflüsse auf Entscheidungsprozesse in frühen Aktivitäten der Produktentstehung'. In *Symposium für Vorausschau und Technologieplanung*, Berlin.

Albers, Sadowski & Marxen 2011

Albers, A., Sadowski, E. and Marxen, L. (2011) 'A New Perspective on Product Engineering Overcoming Sequential Process Models'. In Birkhofer, H. (Ed.) *The Future of Design Methodology*, Springer, London, pp.199-209.

Albers, Schmalenbach & Lohmeyer 2011

Albers, A., Schmalenbach, H. and Lohmeyer, Q. (2011) 'Ontology Development for Knowledge Representation'. In *International Journal of Product Development IJPD*, Vol.14, No.1-4, pp.53-71.

Albers, Turki & Lohmeyer 2012

Albers, A., Turki, T. and Lohmeyer, Q. (2012) 'Transfer of Engineering Experience by Shared Mental Models'. In *14th International Conference on Engineering and Product Design Education E&PDE 2012*, Antwerp, Belgium, No.5101.

Albers, Walch & Lohmeyer 2012

Albers, A., Walch, M. und Lohmeyer, Q. (2012) 'Zielsystemorientiertes Variantenmanagement einbaufertiger Systembaugruppen'. In *23. Symposium Design for X, DfX 2012*, Bamberg.

Alink 2010

Alink, T. (2010) *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*. Dissertation, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Almfelt, Berglund, Nilsson & Malmqvist 2006

Almfelt, L., Berglund, F., Nilsson, P. and Malmqvist, J. (2006) 'Requirements Management in Practice: Findings from an Empirical Study in the Automotive Industry'. In *Research in Engineering Design*, Vol.17, No.3, pp.113-134.

Anderl 2011

Anderl, R. (2011) 'Managing Virtual Product Creation'. In Birkhofer, H. (Ed.) *The Future of Design Methodology*, Springer, London, pp. 147-156.

Andreasen 2005

Andreasen, M.M. (2005) 'Vorgehensmodelle und Prozesse für die Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen'. In Schäppi, B., Andreasen M.M., Kirchgeorg, M. und Radermacher F.J. (Hrsg.) *Handbuch Produktentwicklung*, Hanser, München, S.247-263.

Bader 1858

Bader, J. (1858) *Die Residenzstadt Karlsruhe: ihre Geschichte und Beschreibung*. Festgabe der Stadt zur 34. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte, Verlag der Chr. Fr. Müller'schen Hofbuchhandlung, Karlsruhe.

Bader 2007

Bader, J. (2007) *Die Hauptstellgrößen des Produktzielmanagements am Beispiel der Automobilentwicklung*. Dissertation, TU Dresden.

Badke-Schaub & Frankenberger 2004

Badke-Schaub, P. und Frankenberger, E. (2004) *Management kritischer Situationen: Produktentwicklung erfolgreich gestalten*. Springer-Verlag, Berlin.

Badke-Schaub, Daalhuizen & Roozenburg 2011

Badke-Schaub, P., Daalhuizen, J. and Roozenburg, N. (2011) 'Towards a Designer-Centred Methodology'. In Birkhofer, H. (Ed.) *The Future of Design Methodology*, Springer, London, pp.181-197.

Badke-Schaub, Neumann, Lauche & Mohammed 2007

Badke-Schaub, P., Neumann, A., Lauche, K. and Mohammed, S. (2007) 'Mental Models in Design Teams: A Valid Approach to Performance in Design Collaboration?'. In *CoDesign*, Vol.3, No.1, pp.5-20.

Beitz 1970

Beitz, W. (1970) 'Systemtechnik in der Konstruktion'. In *DIN-Mitteilungen*, Nr.49, S.295-302.

Bender 2004

Bender, B. (2004) *Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung*. Dissertation, TU Berlin.

Bertalanffy 1949

Bertalanffy, L. von (1949) 'Zu einer allgemeinen Systemlehre'. In *Biologia Generalis*, Nr.195, S.114-129 (Nachdruck in Bleicher K. (1972) *Organisation als System*, Gabler, Wiesbaden, S.29-46).

Bertalanffy 1969

Bertalanffy, L. von (1969) *General System Theory – Foundations, Development, Applications*. George Braziller, New York.

Bierhals, Kohler & Badke-Schaub 2007

Bierhals, R., Kohler, P. and Badke-Schaub, P. (2007) 'The Influence and Development of Shared Mental Models in Multidisciplinary Project Teams'. In *16th International Conference on Engineering Design ICED'07*, Paris, France, No.427.

Birkhofer 2004

Birkhofer, H. (2004) 'There is Nothing as Practical as a Good Theory – An Attempt to Deal with the Gap between Design Research and Design Practice'. In *8th International Design Conference DESIGN 2004*, Dubrovnik, Croatia, pp.177-182.

Birkhofer & Jänsch 2003

Birkhofer, H. and Jänsch, J. (2003) 'Interaction between Individuals'. In Lindemann, U. (Ed.) *Human Behaviour in Design – Individuals, Teams, Tools*, Springer, Berlin, pp.105-110.

Blessing & Chakrabarti 2009

Blessing, L.T.M. and Chakrabarti, A. (2009) *DRM, a Design Research Methodology*, Springer, London.

Bortz & Döring 2006

Bortz, J. und Döring, N. (2006) *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, Springer Medizin Verlag, Heidelberg.

Browning, Fricke & Negele 2006

Browning, T.R., Fricke, E. and Negele H. (2006) 'Key Concepts in Modeling Product Development Processes'. In *Systems Engineering*, Vol.9, No.2, pp.104-128.

Bucciarelli 1994

Bucciarelli, L.L. (1994) *Design Engineers*. MIT Press, Cambridge, MA.

Cannon-Bowers, Salas & Converse 1993

Cannon-Bowers, J.A., Salas, E. and Converse, S. (1993) Shared Mental Models in Expert Team Decision Making. In Castellan, N. (ed.) *Individual and Group Decision Making*, pp. 221-246.

Chakrabarti, Morgenstern & Knaab 2004

Chakrabarti, A., Morgenstern, S. and Knaab, H. (2004) 'Identification and Application of Requirements and their Impact on the Design Process: A Protocol Study'. In *Research in Engineering Design*, Vol.15, pp.22-39.

Chalupnik, Wynn & Clarkson 2009

Chalupnik, M.J., Wynn D.C. and Clarkson P.J. (2009) 'Approaches to Mitigate the Impact of Uncertainty in Development Processes'. In *17th International Conference on Engineering Design ICED'09*, Stanford, USA, 2009, Vol.1, pp.459-470.

Cooper 1990

Cooper, R.G. (1990) 'Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products'. In *Business Horizons*, Vol.33, No.3, pp.44-54.

Cooper, Wootton & Bruce 1998

Cooper, R., Wootton, A.B. and Bruce, M. (1998) 'Requirements Capture: Theory and Practice'. In *Technovation*, Vol.18, No.8/9, pp.497-511.

Costa & Sobek 2003

Costa, R. and Sobek, D.K. (2003) 'Iteration in Engineering Design: Inherent and Unavoidable or Product Choices Made?'. In ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference DETC'03, Chicago, Illinois, USA.

Craik 1943

Craik, K.J.W. (1943) *The Nature of Explanation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Cross 1984

Cross, N. (1984) *Developments in Design Methodology*. Wiley, Chichester.

Cross 2008

Cross, N. (2008) *Engineering Design Methods – Strategies for Product Design*. Wiley, Chichester.

Cross 2011

Cross, N. (2011) *Design Thinking – Understanding How Designers Think and Work*. Berg, Oxford, UK.

Daalhuizen, Badke-Schaub & Batill 2009

Daalhuizen, J., Badke-Schaub, P. and Batill, S. (2009) 'Dealing with Uncertainty in Design Practice: Issue for Designer-Centered Methodology'. In *17th International Conference on Engineering Design ICED'09*, Stanford, USA, Vol.9, pp.147-158.

Danner 1996

Danner, S. (1996) *Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse*. Dissertation, TU München, Shaker Verlag, Aachen.

Darlington & Culley 2002

Darlington, M.J. and Culley, S.J. (2002) 'Current Research in the Engineering Design Requirement'. In *Journal of Engineering Manufacture*, Vol.216, No.3 pp.375-388.

Darlington & Culley 2004

Darlington, M.J. and Culley, S.J. (2004) 'A Model of Factors Influencing the Design Requirement'. In *Design Studies*, Vol.25, No.4, pp.329-350.

de Weck, Eckert & Clarkson 2007

de Weck, O., Eckert, C. and Clarkson J. (2007) 'A Classification of Uncertainty for Early Product and System Design'. In *16th International Conference on Engineering Design ICED'07*, Paris, France.

Deigendesch 2009

Deigendesch, T. (2009) *Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel*. Dissertation, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Deming 1982

Deming, W.E. (1982) *Out of the Crisis*. MIT Press, Cambridge, MA.

Doran 1981

Doran, G.T. (1981) 'There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and Objectives. In *Management Review*, Vol.70, No.11, pp.35-36.

Dörner 1979

Dörner, D. (1979) *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Kohlhammer, Stuttgart.

Dörner 1994

Dörner, D. (1994) 'Selbstreflexion und Handlungsregulation: Die psychologischen Mechanismen und ihre Bedingungen'. In Lübbecke, W. (Hrsg.) *Kausalität und Zurechnung*, de Gruyter, Berlin, S.199-222.

Dörner 2000

Dörner, D. (2000) *Die Logik des Mißlingens – Strategisches Denken in komplexen Situationen*. Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg.

Dorst & Cross 2001

Dorst, K. and Cross, N. (2001) 'Creativity in the Design Process: Co-Evolution of Problem-Solution'. In *Design Studies*, Vol.22, No.5, pp.425-437.

Dorst & Dijkhuis 1995

Dorst, K. and Dijkhuis, J. (1995) 'Comparing Paradigms for Describing Design Activity'. In *Design Studies*, Vol.16, No.2, pp.261-274.

Dorst & Valkenburg 1998

Dorst, K. and Valkenburg, R. (1998) 'The Reflective Practice of Design Teams'. In *Design Studies*, Vol.19, No.3, pp.249-271.

Dünser 2004

Dünser, T. (2004) *Unterstützung der Zielorientierung und -formulierung in der Entwicklung komplexer Produkte – am Beispiel einer neuen Aufzugstechnologie*. Dissertation, ETH Zürich.

Düser 2010

Düser, T. (2010) *X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Dylla 1990

Dylla, N. (1990) *Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren*. Dissertation, TU München.

Earl, Johnson & Eckert 2005

Earl, C., Johnson, J. and Eckert, C. (2005) 'Complexity'. In Clarkson, J. and Eckert, C. (Eds.) *Design Process Improvement - A Review of Current Practice*, Springer, London, pp.174-197.

Eben & Lindemann 2010

Eben, K.G.M. and Lindemann, U. (2010) 'Structural Analysis of Requirements – Interpretation of Structural Criteria'. In *12th International Dependency and Structure Modelling Conference DSM'10*, Cambridge, UK, pp.249-261.

Eckert 1997

Eckert, C. (1997) *Intelligent Support for Knitwear Design*. Dissertation, The Open University.

Eckert & Stacey 2001

Eckert, C.M. and Stacey, M.K. (2001) 'Dimensions of Communication in Design'. In *13th International Conference on Design ICED'01*, Glasgow, UK, Vol.2, pp.473-480.

Eckert & Stacey 2010

Eckert, C.M. and Stacey, M.K. (2010) 'What is a Process Model? Reflections on the Epistemology of Design Process Models'. In *1st International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP 2010*, Cambridge, UK, pp.3-14.

Eder & Hubka 2004

Eder, W.E. and Hubka, V. (2004) 'Reflections about Reflective Practice'. In *8th International Design Conference DESIGN 2004*, Dubrovnik, Croatia, pp.177-182.

Ehrlenspiel 1995

Ehrlenspiel, K. (1995) *Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozeßorganisation, Produkt-erstellung und Konstruktion*. Hanser, München.

Ehrlenspiel 2003

Ehrlenspiel, K. (2003) 'On the Importance of the Unconscious and the Cognitive Economy in Design'. In Lindemann, U. (Ed.) *Human Behaviour in Design – Individuals, Teams, Tools*, Springer, Berlin, pp.25-41.

Ehrlenspiel 2007

Ehrlenspiel, K. (2007) *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Hanser, München.

Eiletz 1999

Eiletz, R. (1999) *Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Beispiel PKW-Entwicklung*. Dissertation, TU München, Shaker Verlag, Aachen.

Franke 1975

Franke, H.-J. (1975) 'Methodische Schritte beim Klären der konstruktiver Aufgabenstellungen'. In *Konstruktion*, Nr.27, S.395-402.

Fritz & Ontl 2011

Fritz, G. and Ontl, R. (2011) *Dust Suction Module for Hand-held Power Tool*. United States Patent and Trademark Office, Patent No.: US7938873B2.

Gebauer 2001

Gebauer, M. (2001) *Kooperative Produktentwicklung auf Basis verteilter Anforderungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Shaker Verlag, Aachen.

Gericke & Blessing 2011

Gericke, K. and Blessing, L. (2011) 'Comparisons of Design Methodologies and Process Models across Disciplines: A Literature Review'. In *18th International Conference on Engineering Design ICED'11*, Copenhagen, Denmark, 2011, Vol.1, pp.393-404.

Goode & Machol 1957

Goode, H.H. and Machol, R.E. (1957) *System Engineering - An Introduction to the Design of Large-Scale Systems*. McGraw-Hill, New York.

Gramann 2004

Gramann, J. (2004) *Problemmodelle und Bionik als Methode*. Dissertation, TU München.

Größer 1992

Größer, H. (1992) *Systemische rechnerunterstützte Ermittlung von Produkthanforderungen*. Dissertation, TU Darmstadt.

Günther 1998

Günther, J. (1998) *Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozeß – Eine empirische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Konstrukteuren aus der Praxis*. Dissertation, TU München.

Haberfellner, de Weck, Fricke & Vössner 2012

Haberfellner, R., de Weck, O., Fricke, E. und Vössner, S. (2012) *Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung*. Orell Füssli, Zürich.

Hacker 2002

Hacker, W. (2002) 'Konstruktives Entwickeln - Psychologische Grundlagen'. In Hacker, W. (Hrsg.) *Denken in der Produktentwicklung - Psychologische Unterstützung der frühen Phasen*, vdf Hochschulverlag, Zürich, S.9-25.

Hacker 2005

Hacker, W. (2005) *Allgemeine Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit*. Huber, Bern.

Hall 1962

Hall, A.D. (1962) *A Methodology for Systems Engineering*. Van Nostrand, Princeton, New Jersey.

Hanselka & Platz 2010

Hanselka, H. und Platz, R. (2010) 'Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus'. In *Konstruktion*, Vol.11/12, pp.55-62.

Hansen & Andreassen 2007

Hansen, C.T. and Andreassen M.M. (2007) 'Specifications in Early Conceptual Design Work'. In *16th International Conference on Engineering Design ICED'07*, Paris, France, No. 498.

Hastings & McManus 2004

Hastings, D. and McManus, H. (2004) 'A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems'. In *Engineering Systems Symposium 2004*, Massachusetts, USA.

Hatchuel & Weil 2003

Hatchuel, A. and Weil B. (2003) 'A New Approach of Innovative Design: An Introduction to C-K Theory'. In *14th International Conference on Engineering Design ICED'03*, Stockholm, Sweden, No.1794.

Hatchuel & Weil 2009

Hatchuel, A. and Weil B. (2009) 'C-K Design Theory: An Advanced Formulation'. In *Research in Engineering Design*, Vol.19, pp.181-192.

Hubka 1984

Hubka, V. (1984) *Theorie technischer Systeme – Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. Springer, Berlin.

Humpert 1995

Humpert, A. (1995) *Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn.

Jahn 2009

Jahn, T. (2009) *Portfolio- und Reifegradmanagement für Innovationsprojekte zur Multiprojektsteuerung in der frühen Phase der Produktentwicklung*. Dissertation, Universität Stuttgart.

Jänsch 2007

Jänsch, J. (2007) *Akzeptanz und Anwendung von Methoden im industriellen Einsatz – Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht*. Dissertation, TU Darmstadt, VDI Verlag, Düsseldorf.

Jörg 2005

Jörg, M.A.J. (2005) *Ein Beitrag zur ganzheitlichen Erfassung und Integration von Produktanforderungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Shaker Verlag, Aachen.

Johnson-Laird 1983

Johnson-Laird, P.N. (1983) *Mental Models*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jonas & Krause 2010

Jonas, H. und Krause, D. (2010) Produktfamilienentwicklung im Rahmen des Variantenmanagements. In *21. Design for X Symposium DfX 2010*, Buchholz/Hamburg.

Jones, Ross, Lynam, Perez & Leitch 2011

Jones, N.A., Ross, H., Lynam, T., Perez, P. and Leitch, A. (2011) 'Mental Models: An Interdisciplinary Synthesis of Theory and Methods'. In *Ecology and Society* Vol.16, No.1, Art.46.

Jung 2006

Jung, C. (2006) *Anforderungskklärung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung*. Dissertation, TU München, Dr. Hut Verlag, München.

Kickermann 1995

Kickermann, H. (1995) *Rechnerunterstützte Verarbeitung von Anforderungen im methodischen Konstruktionsprozeß*. Dissertation, TU Braunschweig, Mainz Verlag, Aachen.

Kittel & Vajna 2009

Kittel, K. & Vajna, S. (2009) 'Development of an Evolutionary Based Design Method'. In *17th International Conference on Engineering Design ICED'09*, Stanford, USA.

Kläger 1995

Kläger, R. (1993) *Modellierung von Produktanforderungen als Basis für Problemlösungsprozesse in intelligenten Konstruktionssystemen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).

Klaus 1963

Klaus, G. (1963) *Kybernetik in philosophischer Sicht*. Dietz, Berlin

Klaus 1967

Klaus, G. (1967) *Wörterbuch der Kybernetik*. Dietz, Berlin.

Klix 1971

Klix, F. (1971) *Information und Verhalten – Kybernetische Aspekte der organismischen Informationsverarbeitung*. Huber, Bern.

Krehmer, Meerkamm & Wartzack 2009

Krehmer, H., Meerkamm, H. and Wartzack, S. (2009) 'The Product's Degree of Maturity as a Measurement for the Efficiency of Design Iterations. In *17th International Conference on Engineering Design ICED'09*, Stanford, USA.

Kreye, Goh & Newnes 2011

Kreye, M.E., Goh, Y.M. and Newnes, L.B. (2011) 'Manifestation of Uncertainty – A Classification'. In *18th International Conference on Engineering Design ICED'11*, Copenhagen, Denmark.

Krusche 2000

Krusche, T. (2000) *Strukturierung von Anforderungen für eine effiziente und effektive Produktentwicklung*. Dissertation, TU Braunschweig, Mainz Verlag, Aachen.

Kruse 1996

Kruse, P.J. (1996) *Anforderungen in der Systementwicklung*. Dissertation, TU Clausthal, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Keuth 1978

Keuth, H. (1978) *Realität und Wahrheit. Zur Kritik des kritischen Rationalismus*. Mohr, Tübingen.

Langan-Fox, Anglim & Wilson 2004

Langan-Fox, J., Anglim, J. and Wilson, J.R. (2004) 'Mental Models, Team Mental Models, and Performance: Process, Development and Future Directions'. In *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, Vol.14, No.4, pp.331-352.

Lawson 1990

Lawson, B. (1990) *How Designers Think*, Butterworth Architecture, Oxford, UK.

Lenders 2009

Lenders, M. (2009) *Beschleunigung der Produktentwicklung durch Lösungsraum-Management*. Dissertation, RWTH Aachen, Apprimus Verlag, Aachen.

Lindemann 1980

Lindemann, U. (1980) *Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt*. Dissertation, TU München.

Lindemann 2009

Lindemann, U. (2009) *Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Springer, Berlin.

Lindemann & Baumberger 2006

Lindemann, U. und Baumberger, G.C. (2006) 'Individualisierte Produkte'. In Lindemann, U., Reichwald, R. und Zäh, M.F. (Hrsg.) *Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*, Springer, Berlin, S.7-16.

Lindemann & Lorenz 2008

Lindemann, U. and Lorenz, M. (2008) 'Uncertainty Handling in Integrated Product Development'. In *10th International Design Conference DESIGN 2008*, Dubrovnik, Croatia, pp.175-182.

Lindemann, Maurer & Braun 2009

Lindemann, U., Maurer, M. and Braun, T. (2009) *Structural Complexity Management - An Approach for the Field of Product Design*, Springer, Berlin.

Lossack 2006

Lossack, R.-S. (2006) *Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnergestützte Konstruktion*, Springer, Berlin.

Luettich et al. 2012

Luettich, T., Link, B., Chen, H., Wang, S. und Kümmerl, M: (2012) *Saugmodul und Handwerkzeugmaschine mit Saugmodul*. Deutsches Patent- und Markenamt, Patent-Nr. DE10210063515A1.

Maher 2000

Maher, M.L. (2000) 'A Model of Co-evolutionary Design'. In *Engineering with Computers*, Vol.16, pp.195-208.

Matthiesen 2002

Matthiesen, S. (2002) *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).

Matthiesen 2011

Matthiesen, S. (2011) 'Seven Years of Product Development in Industry – Experiences and Requirements for Supporting Engineering Design with 'Thinking Tools''. In *18th International Conference on Engineering Design ICED'11*, Copenhagen, Denmark.

Matthiesen & Ruckpaul 2012

Matthiesen, S. and Ruckpaul, A. (2012) 'New Insights on the Contact&Channel-Approach – Modelling of Systems with Several Logical States'. In *12th International Design Conference DESIGN 2012*, Dubrovnik, Croatia.

Maurer 2007

Maurer, M. (2007) *Structural Awareness in Complex Product Design*. Dissertation, TU München.

Meboldt 2008

Meboldt, M. (2008) *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. Dissertation, IPEK, Universität Karlsruhe (TH).

Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer 2012

Meboldt, M., Matthiesen, S. and Lohmeyer, Q. (2012) 'The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-Market Development Processes'. In *2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes MMEP 2012*, Cambridge, UK.

Miller 1956

Miller, G.A. (1956) 'The Magical Number Seven Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information'. In *Psychological Review*, Vol.63, pp.81–97.

Miller, Galanter & Pribram 1960

Miller, G.A., Galanter, E. and Pribram, K.A. (1960) *Plans and the Structure of Behavior*. Holt, Rhinehart, & Winston, New York.

Müller 2007

Müller, A. (2007) *Iterative Zielklärung und Handlungsplanung als Faktoren erfolgreichen Gruppenhandels bei der Lösung komplexer Probleme*. Dissertation, TU München.

Muschik 2011

Muschik, S. (2011) *Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering*. Dissertation, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mußnug 2012

Mußnug, M. (2012) *Untersuchung des Advanced System Triples im Zuge der Entwicklung der Interaktion zwischen Saugmodul und Anwender*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Negele 1998

Negele, H. (1998) *Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung*. Dissertation, TU München.

Negele, Fricke & Igenbergs 1997

Negele, H., Fricke, E. and Igenbergs, E. (1997) 'ZOPH – A Systemic Approach to the Modeling of Product Development Systems'. In *7th International INCOSE Symposium*, Los Angeles, USA, pp.773–780.

Neumann, Badke-Schaub & Lauche 2006

Neumann, A., Badke-Schaub, P. and Lauche, K. (2006) 'A Framework for Measuring Team Mental Models in Design'. In *9th International Design Conference DESIGN 2006*, Dubrovnik, Croatia.

Newell & Simon 1972

Newell, A. and Simon, H.A. (1972) *Human Problem Solving*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

North 2011

North, K. (2011) *Wissensorientierte Unternehmensführung – Wertschöpfung durch Wissen*. Gabler Verlag, Wiesbaden.

O'Donovan, Eckert, Clarkson & Browning 2005

O'Donovan, B., Eckert, C., Clarkson, J. and Browning T.R. (2005) 'Design Planning and Modelling'. In Clarkson, J. and Eckert, C. (Eds.) *Design Process Improvement - A Review of Current Practice*, Springer, London, pp.60-87.

Oerding 2009

Oerding, J. (2009) *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung - Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM*. Dissertation, IPEK, Universität Karlsruhe (TH).

Pahl 1972

Pahl, G. (1972) 'Klären der Aufgabenstellung und Erarbeitung der Anforderungsliste'. In *Konstruktion*, Nr.24, S.195-199.

Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. und Grote, K.-H. (2007) *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer, Berlin.

Patzak 1982

Patzak, G. (1982) *Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*. Springer, Berlin.

Picot & Franck 1988

Picot, A. und Franck, E. (1988) 'Die Planung der Unternehmensressource Information (II)'. In *WISU – das Wirtschaftsstudium*, Vol.17, No.11, pp.608-614.

Probst, Raub & Romhardt 2010

Probst, G., Raub, S. und Romhardt, K. (2010) *Wissen managen – Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. Gabler, Wiesbaden.

Pulm 2004

Pulm, U. (2004) *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*. Dissertation, TU München.

Redtenbacher 1848

Redtenbacher, F. (1848) *Resultate für den Maschinenbau*. Bassermann Verlag, Mannheim.

Redtenbacher 1852

Redtenbacher, F. (1852) *Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaues*. Bassermann Verlag, Mannheim.

Restrepo & Christiaans 2003

Restrepo, J. and Christiaans, H. (2003) 'Design Requirements: Conditioners or Conditioned'. In *14th International Conference on Engineering Design ICED'03*, Stockholm, Sweden.

Reymen 2003

Reymen, I. (2003) 'Research on Design Reflection: Overview and Directions'. In *14th International Conference on Engineering Design ICED'03*, Stockholm, Sweden.

Römer, Pache, Weißhahn, Lindemann & Hacker 2001

Römer, A., Pache, M., Weißhahn, G., Lindemann, U. and Hacker, W. (2003) 'Effort-Saving Product Representations in Design – Results of a Questionnaire Survey'. In *Design Studies*, Vol.22, No.6, pp.473-491.

Roozenburg 2002

Roozenburg, N. (2002) 'Defining Synthesis: On the Senses and the Logic of Design Synthesis'. In Chakrabarti, A. (Ed.) *Engineering Design Synthesis – Understanding, Approaches and Tools*. Springer, London, pp.3-18.

Roozenburg & Dorst 1991

Roozenburg, N.F.M. and Dorst, K. (1991) 'Some Guidelines for the Development of Performance Specifications in Product Design'. In *8th International Conference on Engineering Design ICED'91*, Zürich, Switzerland, Vol.1, pp.359-366.

Ropohl 1975

Ropohl, G. (1975) 'Einleitung in die Systemtechnik'. In *Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung*, Hanser, München, S.1-77.

Ropohl 2009

Ropohl, G. (2009) *Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik*. Universitätsverlag Karlsruhe.

Rude 1998

Rude, S. (1998) *Wissensbasiertes Konstruieren*, Habilitation, Universität Karlsruhe (TH), Shaker Verlag, Aachen.

Rutz 1985

Rutz, A. (1985) *Konstruieren als gedanklicher Prozess*, Dissertation, TU München.

Sachse 2006

Sachse, P. (2006) 'Denken im Handeln und durch das Handeln'. In Sachse, P. & Weber, W.G. (Hrsg.) *Zur Psychologie der Tätigkeit*, Huber, Bern, S.29-43.

Sachse & Leinert 2002

Sachse, P. und Leinert, S. (2002) 'Skizzen und Modelle – Wieso Hilfsmittel des Denkens und Handelns beim Konstruieren'. In Hacker, W. (Hrsg.) *Denken in der Produktentwicklung - Psychologische Unterstützung der frühen Phasen*, vdf Hochschulverlag, Zürich, S.63-82.

Sauter 2011

Sauter, C. (2011) *Ein Beitrag zur Integration von Wikis und Social Tagging in die Produktentstehung*. Dissertation, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Schneider 2012

Schneider, P. (2012) *Investigation into the Feasibility of Onboard Weight and Balance Systems for Rotary Wing Aircraft with Wheeled Landing Gear*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Schneider, Thräne, Wenzl & Matthiesen 2012

Schneider, P. (2012) 'Investigation into the Feasibility of an Onboard Weight and Balance System for Rotary Wing Aircraft with Wheeled Landing Gear'. In *71th Annual Conference of Society of Allied Weight Engineers SAWE*, No. 3573-S.

Schön 1983

Schön, D.A. (1983) *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. Basic Books, London.

Schön 1987

Schön, D.A. (1987) *Educating the Reflective Practitioner*. Basic Books, London.

Schulte 2006

Schulte, S. (2006) *Integration von Kundenfeedback in die Produktentwicklung zur Optimierung der Kundenzufriedenheit*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.

Simon 1981

Simon, H.A. (1981) *The Sciences of the Artificial*, MIT Press, Cambridge, MA.

Skogstad & Leifer 2011

Skogstad, P. and Leifer, L. (2011) 'A Unified Innovation Process Model for Engineering Designers and Managers'. In Plattner, H., Meinel, C. and Leifer, L. (Eds.) *Design Thinking*, Springer, Berlin, pp.19-43.

Specht, Beckmann & Amelingmeyer 2002

Specht, G., Beckmann, C. und Amelingmeyer, J. (2002) *F&E-Management – Kompetenz im Innovationsmanagement*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.

Stacey & Lauche 2005

Stacey, M. and Lauche, K. (2005) 'Thinking and Representing in Design'. In Clarkson, J. and Eckert, C. (Eds.) *Design Process Improvement - A Review of Current Practice*, Springer, London, pp.198-229.

Stachowiak 1973

Stachowiak, H. (1973) *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, Wien.

Stechert 2010

Stechert, C. (2010) *Modellierung komplexer Anforderungen*. Dissertation, TU Braunschweig.

Stempfle 2004

Stempfle, J. (2004) 'Eine integrative Theorie des Problemlösens in Gruppen'. *Gruppendynamik & Organisationsberatung*, Vol.35, No.2, S.335-354.

Stempfle & Badke-Schaub 2002

Stempfle, J. and Badke-Schaub, P. (2002) 'Thinking in Design Teams - An Analysis of Team Communication'. *Design Studies*, Vol. 23, pp.473-496.

Steward 1981

Steward, D.V. (1981) 'The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems'. In *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol.28, No.3, pp.71-74.

Strohschneider 1990

Strohschneider, S. (1990) *Wissenserwerb und Handlungsregulation*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden.

Suh 1999

Suh, N.P. (1999) 'A Theory of Complexity, Periodicity and the Design Axioms'. In *Research in Engineering Design*, Vol. 11, pp.116-131.

Unger 2003

Unger, D.W. (2003) *Product Development Process Design: Improving Development Response to Market, Technical and Regulatory Risks*, Dissertation, MIT.

VDI 2206

VDI-Richtlinie 2206 (2004) *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Beuth, Berlin.

VDI 2221

VDI-Richtlinie 2221 (1993) *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Beuth, Berlin.

von der Weth 1994

von der Weth, R. (1994) 'Konstruieren: Heuristische Kompetenz, Erfahrung und individuelles Vorgehen'. In *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, Vol.38, No.3, S.102-111.

Wallmeier 2001

Wallmeier, S. (2001) *Potenziale in der Produktentwicklung – Möglichkeiten und Grenzen von Tätigkeitsanalyse und Reflexion*. Dissertation, TU Darmstadt.

Ward, Shefelbine & Clarkson 2003

Ward, J., Shefelbine, S. and Clarkson, P.J. (2003) 'Requirements Capture for Medical Device Design'. In *14th International Conference on Engineering Design ICED'03*, Stockholm, Sweden.

Weber 2005

Weber, C. (2005) 'What is "Complexity"?'. In *15th International Conference on Engineering Design ICED 05*, Melbourne, Australia.

Wecht 2005

Wecht, C.H. (2005) *Frühe aktive Kundenintegration in den Innovationsprozess*. Dissertation, Universität St. Gallen.

Willke 1998

Willke, H. (1998) 'Organisierte Wissensarbeit'. In *Zeitschrift für Soziologie*, Vol.27, No.3, S.161-177.

Wynn 2007

Wynn, D.C. (2007) *Model-Based Approaches to Support Process Improvement in Complex Product Development*. Dissertation, University of Cambridge (UK).

Wynn & Clarkson 2005

Wynn, D. and Clarkson, J. (2005) 'Models of Designing'. In Clarkson, J. and Eckert, C. (Eds.) *Design Process Improvement - A Review of Current Practice*, Springer, London, pp.60-87.

Wynn, Eckert & Clarkson 2007

Wynn, D.C., Eckert, C.M. and Clarkson, P.J. (2007) 'Modelling Iteration in Engineering Design'. In *16th International Conference on Engineering Design ICED'07*, Paris, France, No. 561.

Zangemeister 1969

Zangemeister, C. (1969) *Zur Charakteristik der Systemtechnik*. Vorlesungsmanuskript am Brennpunkt Systemtechnik der TU Berlin.

Zangemeister 1973

Zangemeister, C. (1973) *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. Wittemann Verlag, München.

Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Breitschuh 2012

Breitschuh, J. (2012) *Skalierbare netzwerkbasierte Analyse von Interaktionen zur informationsflussgerechten Optimierung von Ressourcensystemen*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Dworschak 2012

Dworschak, J. (2012) *Konzeptionelle Neuentwicklung eines Fliehkraftkupplungssystems unter Anwendung des erweiterten ZHO-Modells*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Gauger 2011

Gauger, M. (2011) *Untersuchung der iterativen Generierung von Zielen bei der Entwicklung einer Energieverstellung für gasbetriebene Direktbefestigungsgeräte*. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruhe.

Hegenbart 2012

Hegenbart, C. (2012) *Analyse der konzeptionellen Entwicklung eines Einzwecksaugers unter Verwendung des erweiterten ZHO-Modells*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Holubarsch 2009

Holubarsch, M. (2009) *Methodenentwicklung zur Zielkonfliktidentifikation am Beispiel der Metallsubstitution durch Kunststoff*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Kern 2010

Kern, A. (2010) *Analyse der Ziel- und Objektsystementwicklung bei der Konzeption eines Versuchsstandes für ein modulares Schlagwerk*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Köster 2011

Köster, L. (2011) *Entwicklung eines crash-sicheren Kindersitzes zur Integration im Hubschrauber anhand der Charakterisierung von Zielen in Zieldimension-Matrizen*. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruhe.

Lorenz 2010

Lorenz, M. (2010) *Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung von Technologieeinflüssen*. Studienarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Martin 2009

Martin, P. (2009) *Early Detection of Conflicts of Objectives by Developing Concept Ideas for Hammering Mechanisms*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Martin 2012

Martin, D. (2012) *Evaluierung des erweiterten ZHO-Modells am Entwicklungsprozess einer akkubetriebenen Motorsäge*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Moch 2010

Moch, K. (2010) *Entwicklung einer Methode zur Untersuchung und Beschreibung von Zielabhängigkeiten und Anwendung am Beispiel Fahrzeugzielsystem*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Mußnug 2012

Mußnug, M. (2012) *Untersuchung des Advanced System Triples im Zuge der Entwicklung der Interaktion zwischen Saugmodul und Anwender*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Schneider 2012

Schneider, P. (2012) *Investigation into the Feasibility of Onboard Weight and Balance Systems for Rotary Wing Aircraft with Wheeled Landing Gear*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

Werber 2009

Werber, A. (2009) *Requirements Mapping am Beispiel der Substitution der Sicherheitskupplung in einem Kombihammer*. Diplomarbeit. IPEK, Karlsruhe.

11 Glossar

Definition 2-1: Ziel (engl.: objective)

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 2-2: Anforderung (engl.: requirement)

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 2-3: Randbedingung (engl.: constraint)

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.

Definition 2-4: Zielsystem (engl.: system of objectives)

Ein Zielsystem beinhaltet alle expliziten Ziele eines zu entwickelnden Produktes, einschließlich derer Abhängigkeiten und Randbedingungen, innerhalb eines definierten Interessenbereichs (d.h. innerhalb eines System-of-Interest) zu einem bestimmten Zeitpunkt (vgl. Bild 2-35).

Definition 2-5: Initiales Zielsystem (engl.: initial system of objectives)

Ein initiales Zielsystem beinhaltet die ersten grundlegenden Ziele. Es wird zu Beginn des Produktentstehungsprozesses in der Aktivität Projektierung erstellt. Das initiale Zielsystem entspricht meist dem Lasten-/Pflichtenheft bzw. der Produktspezifikation.

Definition 5-1: Wissen (engl.: knowledge)

Wissen bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge⁴¹⁴.

⁴¹⁴ vgl. Probst, Raub & Romhardt 2010, S.23

Definition 5-2: Wissensbasis (engl.: state of knowledge)

Wissensbasis bezeichnet die Menge an Domänenwissen und fallspezifischem Wissen, welches innerhalb des Handlungssystems eines bestimmten Produktentstehungsprozesses bereitsteht. Da Wissen immer personengebunden ist, kann die Wissensbasis durch Erkenntnisgewinn oder aber durch die Integration zusätzlicher Personen (z.B. Kunden oder Fachspezialisten) in das Handlungssystem zielgerichtet erweitert werden⁴¹⁵. Sie umfasst darüber hinaus die Daten und Informationsbestände, auf welchen individuelles und organisationales Wissen aufbaut⁴¹⁶.

Definition 5-3: Problemraum (engl.: problem space)

Der Problemraum ist die mentale, multidimensionale Repräsentation eines Problems auf Basis von gesetzten Zielen und erkannten Randbedingungen. Der Problemraum entspricht dem subjektiven Verständnis eines Problems und bildet somit eine Teilmenge der Wissensbasis.

Definition 5-4: Lösungsraum (engl.: solution space)

Der Lösungsraum ist die mentale, multidimensionale Repräsentation der Schnittmenge aller durch den Problemraum definierten Freiheitsgrade. Der Lösungsraum entspricht dem subjektiven Verständnis der Menge aller zulässigen Lösungen zu einem Problem und richtet so die mentale, virtuelle und physische Modellierung von Objekten aus.

Definition 5-5: Analyse (engl.: analysis)

Die Analyse beschreibt eine Handlung, die das Verstehen eines existierenden Systems bezweckt. Das Resultat einer Analyse ist Erkenntnis.

Definition 5-6: Synthese (engl.: synthesis)

Die Synthese beschreibt eine Handlung, die das Erschaffen eines bis dato noch nicht existierenden Systems bezweckt. Das Resultat einer Synthese ist ein Ziel oder ein Objekt.

⁴¹⁵ vgl. Albers, Ebel & Lohmeyer 2012

⁴¹⁶ vgl. Probst, Raub & Romhardt 2010, S.23

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Quentin Lohmeyer
Geburtsdatum: 19. August 1981
Geburtsort: Düsseldorf
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet

Bildungsgang

1987 – 1991 Brehm-Schule, Düsseldorf (Grundschule)
1991 – 2000 Max-Planck-Gymnasium, Düsseldorf (Abschluss: Abitur)
2000 – 2001 Zivildienst am Marienkrankenhaus Kaiserswerth in Düsseldorf im Bereich OP/Anästhesie
2001 – 2007 Studium des Maschinenbaus mit Vertiefungsrichtung Produktentwicklung und Konstruktion an der Universität Karlsruhe (TH) (Abschluss: Diplom)

Berufstätigkeit

2001 Praktikum bei der Firma Kannegiesser, Vlotho (Grundpraktikum)
2004 – 2005 Wissenschaftliche Hilfskraft am IPEK – Institut für Produktentwicklung an der Universität Karlsruhe (TH) im Bereich CAE/Optimierung
2006 Praktikum bei der Firma tech-solute in Karlsruhe im Bereich Technische Produktentwicklung
2006 – 2007 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Produktionstechnik (wbk) an der Universität Karlsruhe (TH) im Bereich Werkzeugmaschinen und Handhabungstechnologie
2007 Praktikum bei der Firma HILTI in Schaan (Fürstentum Liechtenstein) im Bereich Vorentwicklung Schleifgeräte
2008 – 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), ehemals Universität Karlsruhe (TH) in der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management
Seit 03/2013 Postdoktorand in der Product Development Group, ETH Zürich