

Jonas Reinemann

Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Development of an Approach for the Validation of Interactive Products in Augmented Reality Environments in the Early Phase in the Model of PGE – Product Generation Engineering

Band 133

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Jonas Reinemann

**Entwicklung einer Systematik zur Validierung
interaktiver Produkte in Augmented-Reality-
Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der
PGE – Produktgenerationsentwicklung**

**Development of an Approach for the Validation of Inter-
active Products in Augmented Reality Environments in
the Early Phase in the Model of PGE – Product Genera-
tion Engineering**

Band 133

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2020
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

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

ISSN 1615-8113

Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M. Sc. Jonas Reinemann

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2020

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Vorwort der Herausgeber (Stand: Juli 2017)

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird 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 seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zur Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Krafftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 133

Die Produkte und technischen Lösungen haben sich in den letzten 20 Jahren in allen Branchen stürmisch weiterentwickelt. Die Leistungspotenziale konnten durch die zunehmende Integration von Mechanik, Elektronik und Software zu mechatronischen Gesamtlösungen auf ein Niveau geführt werden, das einen hohen Funktionsumfang und gleichzeitig vielfältige Potenziale zur Produktdifferenzierung in den zunehmend globalen und sich zu Käufermärkten entwickelnden Absatzsegmenten bietet. Dieses Potenzial zur Produktdifferenzierung ist im Wettbewerb zwingend erforderlich. Es führt zu einem steten Wettbewerb in der Anreicherung neuer Produktgenerationen mit zusätzlichen Funktionen, um den Kundennutzen und den Anwendernutzen zu steigern. Dabei muss allerdings gleichzeitig der sogenannte Anbieternutzen berücksichtigt werden, das heißt, Lösungen müssen so entwickelt werden, dass die Kostenstruktur es erlaubt, die Produkte auch mit den notwendigen Margen am Markt zu vertrieben zu können. Insgesamt führt diese Entwicklung zu einer dramatisch gesteigerten Dynamik in den Entwicklungsprozessen. Die Produktgenerationsfolge verkürzt sich, wobei sich hier natürlich die jeweiligen Produktsegmente unterschiedlich entwickeln. Im Bereich der Verbraucherelektronik ist es heute durchaus üblich, dass Produktgenerationen weniger als ein Jahr am Markt vertrieben werden. In der Automobilindustrie hat sich dieser Generationswechsel zwar ziemlich konstant bei vier bis fünf Jahren gehalten, allerdings werden hier die technischen Lösungen durch Updates auch während dieser Time-In-Market der Produktgeneration über sogenannte *Face-Lifts* immer wieder angereichert. Im Bereich der Haushaltselektronik ist ebenfalls eine erhebliche Beschleunigung der Generationsfolgen festzustellen, so dass von einem generellen Trend gesprochen werden kann.

Diese Dynamik in den Entwicklungsprozessen so antizipieren zu können, dass die erarbeiteten technischen Lösungen marktattraktiv sind und dabei gleichzeitig bei möglichst geringen Entwicklungskosten eine hohe Sicherheit und Zuverlässigkeit erreichen, ist eine große Herausforderung. In diesem Kontext kommt der Validierung, die die zentrale Aktivität zur Wissensgenerierung im Entwicklungsprozess darstellt, eine hohe Bedeutung zu. Die Gruppe von Albers forscht auf diesem Gebiet seit vielen Jahren und hat hierzu neue Vorschläge und Lösungen erarbeitet, die mehr und mehr auch bereits in den Unternehmen eingesetzt werden. Ziel ist es, wegzukommen von einer Validierung am Ende des Entwicklungszyklus hin zu einer *kontinuierlichen Validierung*. Diese kontinuierliche Validierung als Abgleich zwischen den *im Zielsystem* festgelegten und durch entsprechende Anforderungen *konkretisierten Zielen* im Bereich des Kunden-, Anwender- und auch des Anbieternutzens sowie den Ergebnissen der Syntheseprozesse der neuen Produktgeneration in den zugehörigen *Entwicklungsgenerationen* ist Kern des wissenschaftlichen Ansatzes. Dabei wird von Anfang an bereits in der *Frühen Phase* sowohl das Produktprofil – das die oben beschriebenen Nutzenpotentiale konkretisiert – als auch das frühe Lösungskonzept validiert. Dies setzt sich dann kontinuierlich fort über alle Entwicklungsgenerationen bis hin zu den finalen Frei-

gaben des marktreifen Produktes. Der Lösungsansatz ist eine ganzheitliche Betrachtung, bei der die Validierung des Produktes und seiner Teilsysteme immer im Kontext der kundennahen Anwendung durch eine systematische Einbindung in eine Umwelt-, Umfeld- und Kundensimulation erfolgt. Dabei werden dann tatsächliche Produkt-Funktionen unter realitätsnahen Echtzeit-Randbedingungen untersucht und abgesichert. Hier konnte mit dem *IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz* eine ganzheitliche Methodik erforscht und realisiert werden, die kontinuierlich weiter ausgebaut wird.

An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Jonas Reinemann an. Die neuen Möglichkeiten, die sich in der Anwendung der *Augmented Reality* ergeben, hat er im Kontext der *Frühen Validierung* im Produktentstehungsprozess systematisch untersucht und in Methoden überführt. Das Potenzial der Augmented Reality hat sich gerade in den letzten Jahren durch die stürmische Entwicklung im Bereich der Verbraucherelektronik – insbesondere getrieben von der Spieleindustrie – dramatisch gesteigert. Während noch vor zehn Jahren im Kontext der virtuellen Produktentwicklung oft große Anlagen – sogenannten *Caves* – installiert werden mussten, um die Potenziale der virtuellen Modellbildung zu nutzen, und diese Lösungen durch hohe Kosten und Komplexität nur eine geringe Verbreitung erreichten, erlaubt die Nutzung der für die Spieleindustrie erarbeiteten Lösungen zur Augmented Reality, diese auch in großer Breite – auch in KMUs – einzusetzen. Wie dies geschehen kann, ist Gegenstand der Forschungsarbeit von Herrn Dr.-Ing. Jonas Reinemann. Er hat mit seiner Arbeit einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag zur Integration der Augmented Reality in die Validierungsprozesse im Rahmen der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung geleistet und gleichzeitig mit seiner Methodik auch die Nutzung der Potentiale in der Praxis der Unternehmen vorbereitet.

Januar, 2021

Albert Albers

Kurzfassung

Die Fähigkeit von Unternehmen möglichst genau und schnell auf Kundenwünsche zu reagieren ist angesichts des globalen Wettbewerbs und sich verkürzender Produktlebenszyklen ein zentraler Erfolgsfaktor in vielen Branchen. Produktentwickler¹ stehen dadurch vor der Herausforderung die Unsicherheit hinsichtlich der marktlichen Anforderungen an ein Produkt bereits frühzeitig zu reduzieren. Als zentraler wissensgenerierender Aktivität im Produktentwicklungsprozess kommt dabei der Produktvalidierung eine besondere Bedeutung zu. Gerade Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses sind jedoch mit besonderen Herausforderungen verbunden. Der Einsatz der Virtual-Reality- und Augmented-Reality-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in frühen Entwicklungsphasen bietet das Potenzial diesen Herausforderungen zu begegnen. Die Technologien ermöglichen es mithilfe illusorischer Stimuli unterschiedliche Varianten eines Produkts frühzeitig für den Anwender erfahrbar zu machen. Im Vergleich zur Virtual-Reality-Technologie besteht das besondere Potenzial für den Einsatz der Augmented-Reality-Technologie bei der Validierung interaktiver Produkte in der Möglichkeit zur bedarfsgerechten Kombination physischer und virtueller Prototypen.

Aufbauend auf den Inhalten der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung als modelltheoretischem und methodischem Rahmen wird in dieser Arbeit eine Systematik zur methodischen Unterstützung der Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in frühen Entwicklungsphasen entwickelt und in drei Fallstudien angewandt und evaluiert. Zu den zwei zentralen Bestandteilen der Systematik zählen ein Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen sowie ein Referenzprozessmodell. Das Referenzprozessmodell unterstützt Produktentwickler und Produktentwicklungsteams entlang des gesamten Vorgehens zur AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung in der Frühen Phase. Es umfasst das Festlegen und Konkretisieren der Validierungsziele, das Konfigurieren und den Aufbau der AR-basierten Validierungsumgebung, die Durchführung des Tests und die abschließende Interpretation der Testergebnisse. Die Evaluationsergebnisse aus den durchgeführten Fallstudien bestätigen die grundsätzliche Eignung der Systematik für die praktische Anwendung und zeigen ihren Beitrag zur Reduktion von Unsicherheiten bzgl. Kunden- und Anwenderanforderungen in frühen Entwicklungsphasen.

¹ Unter *Produktentwickler* wird gleichermaßen auch *Produktentwicklerinnen* verstanden und stets mitgedacht. Um die Lesbarkeit zu erleichtern, wird jedoch in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet.

Abstract

In the face of global competition and shortening product life cycles, the ability of companies to react as effectively and quickly as possible to customer requirements is a key success factor in many industries. Product developers are therefore faced with the challenge of reducing uncertainty regarding a product's market requirements already at an early stage. As the central knowledge-generating activity in the product development process, product validation plays a particularly important part in this. However, validation activities in the early phase of the product development process pose particular challenges. The use of Virtual Reality and Augmented Reality technology for the validation of interactive products in early development phases has the potential to meet these challenges. Using illusory stimuli, these technologies allow users to experience different variants of a product already at an early stage. When compared to Virtual Reality technology, the special potential for using Augmented Reality technology for validation of interactive products lies in the possibility of a tailored combination of physical and virtual prototypes.

Building on the concepts of the KaSPro – Karlsruhe School of Product Development as a conceptual framework, this thesis presents an approach to methodologically support validation of interactive products in Augmented Reality environments in the early stages of product development. The approach is then applied and evaluated in three case studies. The two main elements of the approach are a descriptive model for AR-based validation environments as well as a reference process model. The reference process model supports product developers and product development teams along the entire process of AR-supported, customer-integrated product validation in early development phases. It covers the definition and concretization of the validation objectives, the configuration and setup of the AR-based validation environment, the test execution and the final interpretation of the test results. The evaluation results from the conducted case studies support the practical applicability of the approach and demonstrate its contribution to a reduction of uncertainties regarding customer and user requirements in early development phases.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie als Unternehmensberater bei McKinsey & Company.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Menschen beigetragen. Mein besonders herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die wertvollen Gespräche. Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, der mir wichtige Impulse für diese Arbeit gegeben hat.

Ich danke dem gesamten IPEK-Team und insbesondere den Kolleginnen und Kollegen der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management für die gemeinsamen Diskussionen und die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen aus dem Stuttgarter Büro von McKinsey & Company möchte ich mich herzlich für die Anregungen und die zuweilen ebenso wichtige Ablenkung bedanken.

Mein Dank gilt außerdem den Projektpartnern und Studienteilnehmern sowie, in besonderem Maße, allen studentischen Abschlussarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften, die ich während meiner Zeit am IPEK betreuen durfte und die mich in meiner Forschung tatkräftig unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern Margrit und Hans-Georg möchte ich für alles danken, was sie mir mitgegeben und ermöglicht haben. Meiner Frau Miriam danke ich von ganzem Herzen für ihre beständige Unterstützung und die vielen schönen gemeinsamen Momente in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit, die mir eine große Motivation und willkommene Abwechslung waren.

Stuttgart, den 18. Dezember 2020

Jonas Reinemann

“I do think that a significant portion of the population of developed countries, and eventually all countries, will have AR experiences every day, almost like eating three meals a day. It will become that much a part of you.”

Tim Cook, CEO, Apple Inc., 2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Fokus der Arbeit	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Systemtechnisches Verständnis der Produktentwicklung	7
2.1.1 Modell- und Systemtheorie	8
2.1.2 Technische Systeme	17
2.1.3 Produktmodelle.....	32
2.1.4 Prozessmodelle	38
2.1.5 Zwischenfazit.....	49
2.2 Frühe Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung	49
2.2.1 Innovationsbegriff	50
2.2.2 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung	54
2.2.3 Frühe Phase der Produktentwicklung	58
2.2.4 Agile Ansätze in der Produktgenerationsentwicklung.....	62
2.2.5 Zwischenfazit.....	67
2.3 Produktvalidierung.....	68
2.3.1 Wissen und Unsicherheit in der Produktentwicklung.....	69
2.3.2 Produktqualität.....	71
2.3.3 Validierung und Verifikation	74
2.3.4 Frühe und kontinuierliche Validierung.....	86
2.3.5 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz.....	90
2.3.6 Zwischenfazit.....	94
2.4 Augmented Reality	95
2.4.1 Grundlagen der Augmented-Reality-Technologie	95
2.4.2 Funktionsweise von Augmented-Reality-Systemen	99
2.4.3 Eigenschaften von Augmented-Reality-Umgebungen.....	103
2.4.4 Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung.....	109
2.4.5 Zwischenfazit.....	115
2.5 Fazit	116

3	Zielsetzung	119
3.1	Forschungsbedarf	119
3.2	Forschungsfragen	121
4	Vorgehensweise	123
4.1	Einordnung in die Design Research Methodology	123
4.2	Empirische Methoden	126
4.2.1	Interview	127
4.2.2	Umfrage	128
4.2.3	Delphi-Befragung	130
4.2.4	Dokumentenanalyse	131
5	Untersuchung der Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase	132
5.1	Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung in der Frühen Phase in der Entwicklungspraxis	132
5.1.1	Studiendesign	133
5.1.2	Studienergebnisse	135
5.1.3	Zwischenfazit	140
5.2	Potenziale der AR-Technologie in der Validierung interaktiver Produkte	141
5.2.1	Studiendesign	142
5.2.2	Studienergebnisse	146
5.2.3	Zwischenfazit	149
5.3	Anforderungen an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase	150
5.3.1	Studiendesign	151
5.3.2	Studienergebnisse	153
5.3.3	Zwischenfazit	157
5.4	Fazit	158
6	Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase	161
6.1	Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen	164
6.2	Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR- Umgebungen	170
6.2.1	Validierungsziele festlegen und konkretisieren	172
6.2.2	Validierungsumgebung konfigurieren	180
6.2.3	Validierungsumgebung aufbauen	187
6.2.4	Test durchführen	193
6.2.5	Testergebnisse interpretieren	197
6.2.6	Nachbereiten und Lernen	202
6.3	Fazit	203

7	Evaluation.....	205
7.1	Fallstudie A: Entwicklung von Lösungen für die Förderung und den Transport von Georesourcen	206
7.1.1	Studiendesign	208
7.1.2	Studienergebnisse.....	211
7.2	Fallstudie B: Entwicklung einer Dunstabzugshaube	216
7.2.1	Studiendesign	216
7.2.2	Studienergebnisse.....	218
7.3	Fallstudie C: Entwicklung eines Lokalisierungssystems für die Blechfertigung	221
7.3.1	Studiendesign	222
7.3.2	Studienergebnisse.....	223
7.4	Fazit	227
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	233
8.1	Zusammenfassung	233
8.2	Ausblick	237
	Literaturverzeichnis.....	I
	Glossar	XXXIX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Adressierte Forschungsfelder mit Bezug zur vorliegenden Forschungsarbeit	3
Abbildung 1.2:	Aufbau der vorliegenden Forschungsarbeit	4
Abbildung 2.3:	Modellbildung und Modellnutzung nach Lohmeyer (2013, S. 17)	9
Abbildung 2.4:	Klassifizierung von Systemdefinitionen nach Ropohl (2009, S. 76)	11
Abbildung 2.5:	Schematische Darstellung einer Systemhierarchie nach Göpfert (1998, S. 20) und Haberfellner, Weck, Fricke & Vössner (2012, S. 47)	13
Abbildung 2.6:	Klassifikation der Systemkomplexität nach Gottschalk (2006, S. 59) und Ulrich & Probst (1995, S. 61)	15
Abbildung 2.7:	Erweiterte Dimensionen der Komplexität eines Systems nach Gartzen (2012, S. 55)	16
Abbildung 2.8:	Schematische Darstellung der Produktarchitektur nach Göpfert (1998, S. 75)	20
Abbildung 2.9:	Gliederung eines Produktprogramms nach Sekolec (2005, S. 20)	21
Abbildung 2.11:	Exemplarische Beziehung zwischen Produktmerkmalen und Produkteigenschaften nach Wintergerst (2015, S. 56)	25
Abbildung 2.13:	Abhängigkeiten zwischen Produkt, Kunde und Unternehmen nach Schubert et al. (2012, S. 431), zit. nach Heitger (2019, S. 23)	29
Abbildung 2.14:	Kano-Modell nach Kano et al. (1984)	31
Abbildung 2.15:	Klassifikation von Produktmodellen nach ihrem Zweck nach Ponn & Lindemann (2011)	32
Abbildung 2.16:	Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 39) zit. nach Ponn & Lindemann (2011, S. 24)	33
Abbildung 2.17:	Aufbau des Product Profile Scheme nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018, S. 257)	35
Abbildung 2.18:	Visualisierung der unterschiedlichen Ebenen des Eigenschaftsprofils nach Heitger (2019, S. 126)	36

Abbildung 2.20:	Produktentstehung und -verwendung als sozio-technisches System nach Ropohl (2009, S. 44)	39
Abbildung 2.25:	V-Modell als Makrozyklus für die Entwicklung mechatronischer Systeme nach VDI 2206 (2004, S. 29).....	44
Abbildung 2.27:	Integriertes Produktentstehungsmodell iPeM nach Albers, Braun & Muschik (2010) zit. nach Albers, Reiß, Bursac & Richter (2016, S. 104).....	47
Abbildung 2.30:	Modell des Produktlebenszyklus nach Wesner (1977) zit. nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015, S. 3)	53
Abbildung 2.31:	Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers, Bursac & Rapp (2017, S. 29)	56
Abbildung 2.32:	Produktgenerationen am Beispiel des Zweimassenschwungrads nach Albers, Bursac & Rapp (2017, S. 22).....	58
Abbildung 2.34:	Schematische Darstellung der Frühen Phase im Modell der PGE im Zusammenhang mit Vorentwicklungsprojekten nach Bursac (2016, S. 46), zit. nach Heitger (2019, S. 49).....	62
Abbildung 2.35:	Modell zur Bestimmung eines situations- und bedarfsgerechten Maßes an Flexibilität im ASD-Ansatz nach Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019, S. 10).....	65
Abbildung 2.37:	Klassen von Qualitätsmerkmalen nach DIN EN ISO 9000 (2015)	73
Abbildung 2.38:	Validierung im System der Produktentstehung nach Albers, Behrendt et al. (2016, S. 545).....	75
Abbildung 2.40:	Klassifizierung von Prototypen nach Integrationsgrad und Wiedergabetreue nach Türk et al. (2014, S. 3)	81
Abbildung 2.41:	Filter-Fidelity-Profil eines exemplarischen Prototypen nach Kohler et al. (2013, S. 80)	82
Abbildung 2.42:	Vorgehen zur Durchführung von Tests zur Präferenzmessung nach Steiner (2007, S. 41).....	84
Abbildung 2.43:	Klassifizierung von Methoden der Präferenzmessung	85
Abbildung 2.48:	Überlagerung der realen Umgebung (links) durch virtuelle Objekte (rechts) zur Augmented Reality (Mitte), Bilder aufgenommen im IPEK XR-Lab	96
Abbildung 2.49:	Virtuality Continuum nach Milgram & Kishino (1994)	97

Abbildung 2.51:	Aufbau von Augmented-Reality-Systemen nach Schilling (2008, S. 9)	99
Abbildung 2.53:	Virtuelle Überlagerung des Kamerabildes bei einem Video-See-Through-System am Beispiel eines Tablets (links) und virtuelle Überlagerung der realen Umgebung bei einem Optical-See-Through-System am Beispiel der Microsoft® HoloLens™ (rechts), Bilder aufgenommen im IPEK XR-Lab	101
Abbildung 2.58:	Parametrisches Modell (links) und Polygonnetz-Modell (rechts) desselben 3D-Objekts	111
Abbildung 4.1:	Mögliche Typen von Forschungsprojekten in der Produktentwicklungsforschung nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 18)	124
Abbildung 4.2:	Ausstattung des IPEK XR-Lab	125
Abbildung 5.1:	Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Branchen (n = 66)...	134
Abbildung 5.2:	Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Unternehmensgröße (n = 66).....	134
Abbildung 5.3:	Umfrageergebnisse zu Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase der Produktentwicklung (n = 66).....	136
Abbildung 5.5:	Umfrageergebnisse zu Erfahrungen im Einsatz der AR-Technologie (n = 66)	138
Abbildung 5.9:	Ergebnisse aus der Bewertung der Wiedergabetreue der verglichenen Prototypen (n = 68) nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 43).....	146
Abbildung 5.11:	Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Tätigkeitsfeldern (n = 52).....	152
Abbildung 5.12:	Ergebnisse der Relevanzbewertung der Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik (n = 52)	154
Abbildung 5.13:	Ergebnisse der Relevanzbewertung der Anforderungen an die Anwendbarkeit der Systematik (n = 52).....	155
Abbildung 5.14:	Ergebnisse der Relevanzbewertung der Anforderungen an den Erfolgsbeitrag der Systematik (n = 52)	157
Abbildung 6.1:	Umfang der Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase	162
Abbildung 6.2:	Verortung der Systematik im integrierten Produktentstehungsmodell iPeM.....	163
Abbildung 6.3:	Modellebenen und Anwendungsbereich des spezifischen Beschreibungsmodells für AR-basierte	

	Validierungsumgebungen im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 437)....	165
Abbildung 6.6:	Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen nach Reinemann, Albers et al. (2018, S. 313).....	171
Abbildung 6.7:	Modellierung des entwickelten Referenzprozesses im iPeM	172
Abbildung 6.8:	Methodisches Vorgehen zur Auswahl und Konkretisierung von Produkteigenschaften für die AR-gestützte Validierung in der Frühen Phase an einem Beispiel aus der Entwicklung einer neuen PKW-Generation nach Albers, Reinemann, Hirschter et al. (2019, S. 634)	175
Abbildung 6.9:	Vorgehen zur Bestimmung der Anforderungen an die Wiedergabetreue einzelner Produktmerkmale nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 441)	182
Abbildung 6.10:	Beispielhaftes Referenzprofil auf Grundlage empirischer Daten zur Wiedergabetreue des AR-basierten Modells eines Quadropters (n = 68).....	183
Abbildung 6.13:	Vervollständigung der Validierungskonfiguration durch Integration der Connected Systems und Auswahl des AR-Interface	187
Abbildung 6.14:	Dokumentation der Präferenzen im entwickelten Softwaretool.....	196
Abbildung 6.15:	Automatisierte Interpretation der Testergebnisse im entwickelten Softwaretool	201
Abbildung 7.1:	Ablauf des Live-Labs IP – Integrierte Produktentwicklung	207
Abbildung 7.7:	Anwendung der Systematik in Fallstudie B im Modell der PGE	217
Abbildung 7.10:	Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik in Fallstudie B (n = 8)	221
Abbildung 7.12:	Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung in Fallstudie C.....	225
Abbildung 7.14:	Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik in Fallstudie C (n = 3)	227
Abbildung 8.1:	Unterscheidung weiterführender Forschungsarbeiten nach ihrem Bezug zur entwickelten Systematik.....	237

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auswahl strukturaler Systemdefinitionen nach Breunig (2017)	12
Tabelle 2.2:	Systemdefinition nach Bossel (2004)	12
Tabelle 2.3:	Ganzheitliche Systemdefinition nach Ropohl (2009)	14
Tabelle 2.4:	Klassifizierung von Produkten nach Dauerhaftigkeit und Beständigkeit	22
Tabelle 2.5:	Klassifizierung von Produkten nach Kaufgewohnheiten	23
Tabelle 2.6:	Beispielhafte Ausprägungen von Produktmerkmalen und -eigenschaften	26
Tabelle 2.7:	Möglichkeiten zur marktorientierten Klassifizierung von Produkteigenschaften nach Steiner (2007), zit. nach Heitger (2019, S. 22)	29
Tabelle 2.8:	Klassifizierung von Produktmodellen nach Kohn (2014, S. 58)	34
Tabelle 2.9:	Charakteristika der Frühen Phase von Produktentwicklungsprozessen nach Verworn & Herstatt (2007, S. 13)	59
Tabelle 2.10:	Ansätze zur zeitlichen Abgrenzung der Frühen Phase nach Bursac (2016, S. 44)	60
Tabelle 2.11:	Grundprinzipien des Agile Systems Design nach Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019, S. 8–10)	66
Tabelle 2.12:	Ansätze zur Klassifizierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung	70
Tabelle 2.13:	Übersicht über die gängigsten menschlichen Sinnessysteme nach Schermer & Drinkmann (2017, S. 52)	106
Tabelle 2.14:	Beispiele für Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung	112
Tabelle 5.1:	Dimensionen der Wiedergabetreue AR-basierter Prototypen nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 41)	144
Tabelle 5.2:	Mögliche Meta-Funktionen AR-basierter Prototypen nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 41)	145
Tabelle 5.3:	Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik (Support Evaluation)	153

Tabelle 5.4:	Anforderungen an die Anwendbarkeit der Systematik (Application Evaluation)	155
Tabelle 5.5:	Anforderungen an den Erfolgsbeitrag der Systematik (Success Evaluation).....	156
Tabelle 6.1:	Übersicht der AR-spezifischen Konkretisierungen an den Beschreibungsmodellen des IPEK-XiL-Ansatzes nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 437)	166
Tabelle 6.2:	Mögliche Bewertungsergebnisse aus der Präferenzmessung auf der Ebene von Produktmerkmalen.....	199
Tabelle 7.1:	Übersicht über die durchgeführten Fallstudien zur Evaluation der entwickelten Systematik	206

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
ASD	Agile Systems Design
BIC	Best in class
CAD	Computer-aided design
CAE	Computer-aided engineering
CPM	Characteristics-Properties-Modelling
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DRM	Design Research Methodology
DS	Deskriptive Studie
FEM	Finite-Elemente-Methode
FF	Forschungsfrage
GPS	Global Positioning System
GV	Gestaltvariation
HMD	Head-Mounted-Display
IBC	In best class
IMU	Inertial measurement unit
IP	Integrierte Produktentwicklung
IPEK	Institut für Produktentwicklung am KIT
iPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell

KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PLM	Product lifecycle management
PLT	Problemlösungsteam
PS	Präskriptive Studie
PV	Prinzipvariation
SoS	System of Systems
USP	Unique selling point
ÜV	Übernahmevariation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VR	Virtual Reality
XiL	X-in-the-Loop
XR	Extended Reality
ZHO	Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem

1 Einleitung

Die Entwicklung technischer Produkte unterliegt in marktwirtschaftlichen Verhältnissen stets dem Einfluss des Marktumfeldes. Dieses ist in zahlreichen Branchen durch einen immer stärkeren globalen Wettbewerbsdruck gekennzeichnet. Um der Wettbewerbssituation Rechnung zu tragen, ist eine starke Kundenorientierung zum Leitbild vieler Unternehmen geworden. Sie findet Ausdruck in immer stärker differenzierten Marktsegmenten mit zunehmend individuelleren Produkten. Gleichzeitig steigt die Frequenz der Markteinführungen neuer Produkte, während sich Entwicklungszyklen im selben Maße verkürzen. Die Fähigkeit eines Unternehmens noch exakter und schneller auf Kundenwünsche zu reagieren wird in einem solchen Marktumfeld immer erfolgskritischer. Produktentwickler stehen dabei vor der Herausforderung die Unsicherheit hinsichtlich der marktlichen Anforderungen an ein Produkt frühzeitig zu reduzieren.

In diesem Zusammenhang kommt der Produktvalidierung eine besondere Bedeutung zu. Sie stellt nach Albers (2010) die zentrale wissensgenerierende Aktivität im Produktentwicklungsprozess dar. Die Validierung ist als fortlaufende Aktivität entlang des gesamten Produktentwicklungsprozesses zu verstehen. Mit jedem Validierungsschritt findet dabei ein Abgleich von Kunden-, Anwender und Anbieternutzen mit dem jeweils aktuellen Entwicklungsstand eines Produkts statt. Der Abgleich ist insbesondere bei interaktiven Produkten, die eine direkte Interaktion mit dem Anwender vorsehen, nur dann effektiv möglich, wenn dieser Anwender sowie ggf. weitere relevanten Stakeholder direkt in die Validierung eingebunden werden. Validierungsaktivitäten müssen angesichts ihrer Hebelwirkung auf nachgelagerte Prozesse zudem bereits frühzeitig im Produktentwicklungsprozess stattfinden. Jeder Fehler, der in der sogenannten Frühen Phase eines Entwicklungsprojekts etwa aufgrund eines mangelnden Verständnisses der Anforderungen von Kunden und Anwendern gemacht wird, zieht potenziell kostenintensive und zeitaufwändige Änderungen in späteren Entwicklungsphasen nach sich oder kann im schlimmsten Fall gar nicht mehr mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand korrigiert werden.

Gerade Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses sind dabei jedoch mit besonderen Herausforderungen verbunden. Physische Prototypen stehen in dieser Phase oft noch nicht als Kristallisationspunkt für zielgerichtetes Kundenfeedback zu interaktiven Produkten zur Verfügung. Auch weil ihr Aufbau kostenintensiv ist, kommen in der Entwicklungspraxis vermehrt Techniken der virtuellen Produktentwicklung zum Einsatz. Virtuelle Produktmodelle wie

CAD-Modelle oder digitale Produktskizzen sind jedoch aufgrund der Verkürzungen im Vergleich zum späteren Produkt unter Umständen nicht in der Lage ein realistisches Produkterlebnis zu erzeugen. Mit der fortschreitenden Entwicklung und der zunehmenden Verbreitung der Virtual-Reality- und Augmented-Reality-Technologie besteht das Potenzial diese Einschränkungen virtueller Produktmodelle für den Einsatz bei der Validierung interaktiver Produkte in frühen Entwicklungsphasen zu überwinden. Die Technologien ermöglichen dem Anwender über illusorische Stimuli eine realitätsnahe Wahrnehmung von vollständig virtuellen oder gemischt physisch-virtuellen Umgebungen. Sie erzeugen so ein Präsenzgefühl, das es dem Anwender im Extremfall nicht mehr erlaubt zwischen der realen und der virtuellen Umwelt zu unterscheiden. Im Vergleich zur Virtual-Reality-Technologie besteht das besondere Potenzial für den Einsatz der Augmented-Reality-Technologie bei der Validierung interaktiver Produkte in der Möglichkeit zur bedarfsgerechten Kombination physischer und virtueller Prototypen.

1.1 Fokus der Arbeit

Die vorliegende Arbeit adressiert die Anwendung der Augmented-Reality-Technologie zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte. Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie befinden sich in der heutigen Entwicklungspraxis vielfach noch im Versuchsstadium. Ein umfangreiches Erfahrungswissen sowie etablierte Vorgehensweisen zum zielgerichteten Einsatz der Augmented-Reality-Technologie in der Produktvalidierung sind in der Regel nicht vorhanden. Die Arbeit zielt vor diesem Hintergrund auf die Entwicklung einer entsprechenden methodischen Unterstützung für den Einsatz in der Entwicklungspraxis ab, welche die Nutzung von Potenzialen aus der Anwendung der Augmented-Reality-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte ermöglicht. Zumal die Potenziale der Augmented-Reality-Technologie besonders den spezifischen Herausforderungen von Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses gegenüberstehen, fokussiert die methodische Unterstützung auf ebendiese Phase. Die Frühe Phase ist dabei nicht als ein klar abgegrenzter Zeitraum zu verstehen. Vielmehr lässt sie sich anhand spezifischer Charakteristika von nachfolgenden Phasen abgrenzen, zu denen etwa ein hohes Maß an Unsicherheit zählt.

Den modelltheoretischen und methodischen Rahmen für die vorliegende Forschungsarbeit bilden die Inhalte der *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung*. Hierzu zählt insbesondere das Verständnis der Produktentwicklung aus dem *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach Albers, wonach Produkte in Generationen und auf Basis eines Referenzsystems entwickelt werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Weitere wesentliche Grundlagen für diese Arbeit und die entwickelte

methodische Unterstützung stellen zudem der *IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz* (vgl. Kapitel 2.3.5), das *Produktprofil* (vgl. Kapitel 2.1.3.1), das *Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation* (vgl. Kapitel 2.1.3.2), die Problemlösungsmethode *SPALTEN* (vgl. Kapitel 2.1.4.1) sowie das *integrierte Produktentstehungsmodell iPeM* (vgl. Kapitel 2.1.4.5) dar. Die Arbeit verfolgt die Übertragung und Konkretisierung bestehender Forschungsinhalte der KaSPro auf den Kontext der AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung. Abbildung 1.1 zeigt die dafür wesentlichen Forschungsfelder, die im Zuge dieser Arbeit adressiert werden.

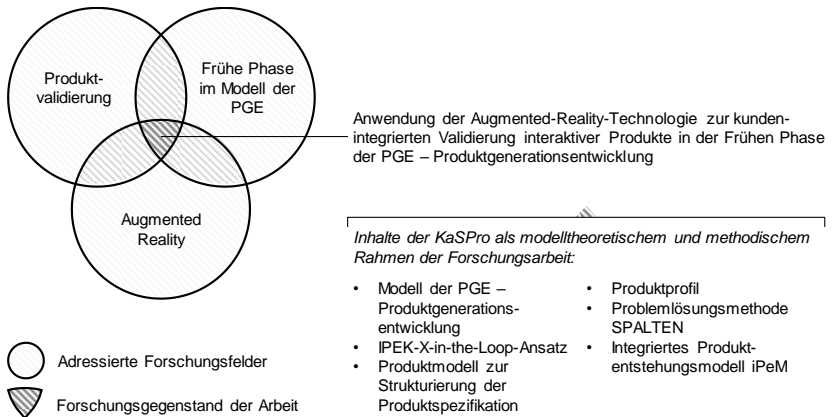


Abbildung 1.1: Adressierte Forschungsfelder mit Bezug zur vorliegenden Forschungsarbeit

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Forschungsarbeit ist in 8 Kapitel gegliedert. Die inhaltliche Struktur der Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt und wird im Folgenden vorgestellt.

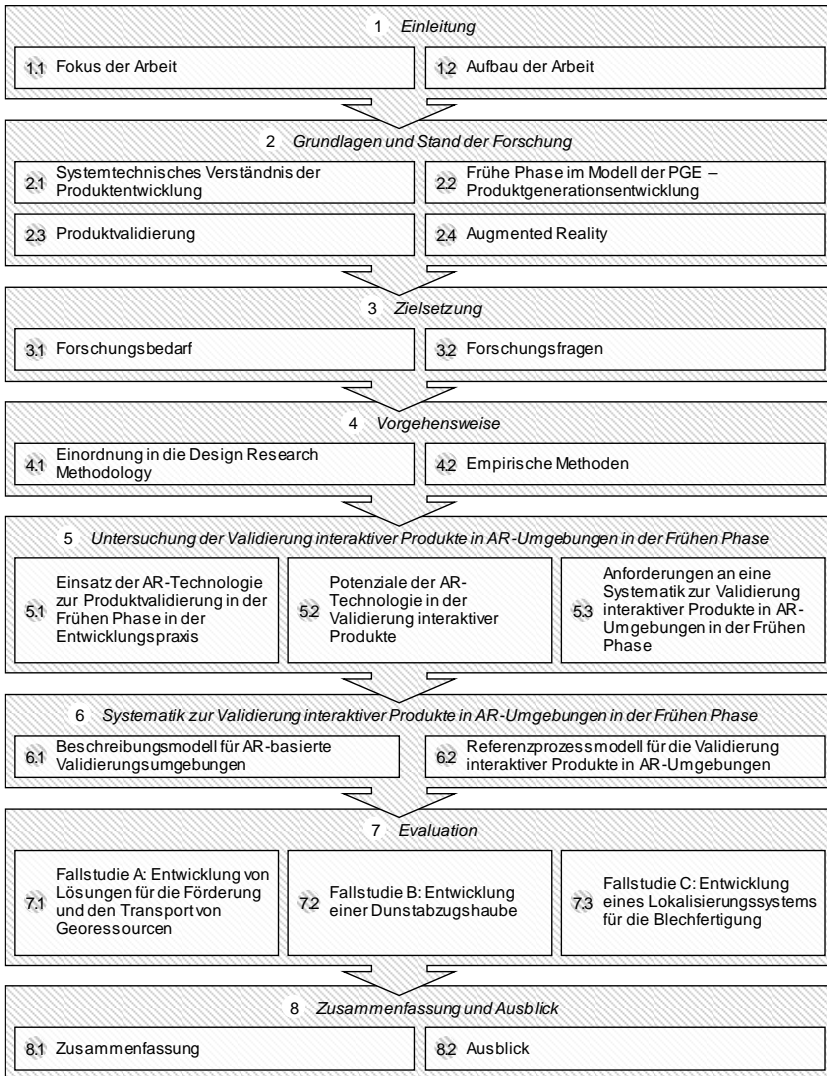


Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Forschungsarbeit

In Kapitel 2 werden die relevanten Grundlagen und der Stand der Forschung beschrieben. Dazu wird zunächst in die Grundlagen der System- und Modelltheorie im Kontext der Produktentwicklung eingeführt und im Zuge dessen etablierte Produkt- und Prozessmodelle der Produktentwicklung vorgestellt. Darauf aufbauend wird der Stand der Forschung zur Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung sowie zur Produktvalidierung dargelegt. Dabei wird auf die Bedeutung von Prototypen sowie von Methoden der Präferenzmessung in der Produktvalidierung eingegangen. Weiterhin wird die besondere Rolle früher und kontinuierlicher Validierungsaktivitäten herausgestellt und der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz als einer der modelltheoretischen und methodischen Grundlagen der vorliegenden Arbeit vorgestellt. Anschließend wird ein Überblick über die Grundlagen der Augmented Reality gegeben. Dabei wird auf Funktionsweise und Eigenschaften sowie auf Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung eingegangen.

Aufbauend auf dem Stand der Forschung wird in Kapitel 3 die Zielsetzung dieser Arbeit dargelegt. Dazu wird zunächst der Forschungsbedarf anhand der dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungshypothese beschrieben und anschließend anhand von Forschungsfragen operationalisiert. In Kapitel 4 wird daraufhin das wissenschaftliche Vorgehen zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen beschrieben, das an die Forschungsmethodik *Design Research Methodology (DRM)* angelehnt ist. Weiterhin werden die im Rahmen der Arbeit verwendeten empirischen Methoden eingeführt.

Kapitel 5 beschreibt die Ergebnisse dreier empirischer Vorstudien, anhand derer das Verständnis für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase vertieft wird. Für jede der Vorstudien wird dabei auf das Studiendesign sowie auf die Studienergebnisse eingegangen. Anhand der Ergebnisse einer fragebogengestützten Umfrage unter deutschen Industrieunternehmen wird zunächst der Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung in der Entwicklungspraxis näher betrachtet. Anschließend werden die Ergebnisse einer weiteren empirischen Studie dargelegt, die auf die Bewertung der Potenziale durch den Einsatz AR-basierter Prototypen in der Frühen Phase abzielt. Abschließend werden die Ergebnisse einer Delphi-Befragung zur Ermittlung von Anforderungen an die methodische Unterstützung beschrieben.

Ausgehend von den Erkenntnissen sowie den ermittelten Anforderungen aus Kapitel 5 wird in Kapitel 6 die entwickelte Systematik zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE beschrieben. Das Kapitel ist dabei entlang der zwei zentralen Bestandteile der Sys-

tematik strukturiert, einem Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen sowie einem Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse aus der Anwendung und Evaluation der in Kapitel 6 beschriebenen Systematik in drei unterschiedlichen Fallstudien beschrieben. Für jede der Fallstudien wird dabei auf das Studiendesign sowie auf die Studienergebnisse eingegangen. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit und die daraus gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 8 zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten gegeben, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit stehen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die theoretische Fundierung des Betrachtungsgegenstands dieser Arbeit. Dazu wird in Kapitel 2.1 zunächst in die Grundlagen der System- und Modelltheorie im Kontext der Produktentwicklung eingeführt. Aufbauend auf dem systemtechnischen Verständnis der Produktentwicklung wird in den Kapiteln 2.2 und 2.3 der Stand der Forschung zur Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung sowie zur Produktvalidierung dargelegt. Kapitel 2.4 gibt einen Überblick über die Grundlagen der Augmented Reality (AR).

2.1 Systemtechnisches Verständnis der Produktentwicklung

Produktentwicklung bezeichnet die Aktivität innerhalb eines Unternehmens, die darauf abzielt „funktionsfähige und produzierbare Produkte zu generieren, die am Markt erfolgreich sind“ (Ebel, 2015, S. 34). Sie ist Grundlage der Geschäftstätigkeit eines Unternehmens und von maßgeblicher Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg (Akcali & Sismanoglu, 2015; Mueller-Oerlinghausen & Sauder, 2003). Die Produktentwicklung ist Teil der Produktentstehung (Albers & Gausemeier, 2012). Nach VDI 2221 Blatt 1 (2019) umfasst die Produktentstehung über die Produktentwicklung hinaus noch die Produktplanung sowie die Produktionseinführung. Die Zuständigkeit für die Produktentwicklung liegt in der Regel innerhalb der Entwicklungsorganisation, die jedoch über vielfältige Schnittstellen zu anderen Organisationseinheiten verfügt, sodass letztlich „praktisch alle Abteilungen des Unternehmens [an der Produktentwicklung] beteiligt sind“ (Ehrlenspiel, 2009, S. 158). Neben unternehmensinternen Einflüssen unterliegt die Produktentwicklung einer Vielzahl an Abhängigkeiten von unternehmensexternen Faktoren (Albers & Gausemeier, 2012). Nach VDI 2221 Blatt 2 (2019) lassen sich diese Kontextfaktoren der Produktentwicklung fünf verschiedenen Kontextebenen zuordnen (vgl. Abbildung 2.1). Die Ausprägungen der Kontextfaktoren können sich im Laufe des Betrachtungszeitraums ändern (VDI 2221 Blatt 2, 2019).

Moderne technische Produkte wie auch die sozio-technischen Prozesse zu ihrer Entwicklung sind von einer Komplexität gekennzeichnet, die einen intuitiven kognitiven Zugang nicht länger ermöglicht. Die nötige Transparenz über die konstituierenden Elemente von Produkten und Produktentwicklungsprozessen und deren Wirkzusammenhänge erfordert daher den Einsatz formalisierter Modelle. Die

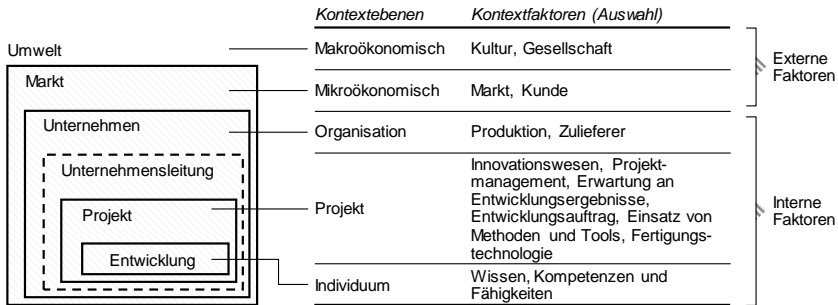


Abbildung 2.1: Einflussbereiche auf die Produktentwicklung nach Hales & Gooch (2004, S. 21), zit. nach VDI 2221 Blatt 2 (2019, S. 11)

Grundlage für solche Modelle bildet die allgemeine Modell- und Systemtheorie, die in Kapitel 2.1.1 vorgestellt wird. Die Terminologie der allgemeinen Modell- und Systemtheorie wird in Kapitel 2.1.2 auf technische Systeme übertragen. Zwei Arten von Modellen, die in der Produktentwicklung Anwendung finden, sind Produkt- und Prozessmodelle. Sie werden anhand einiger gängiger Beispiele in den Kapiteln 2.1.3 und 2.1.4 näher betrachtet.

2.1.1 Modell- und Systemtheorie

2.1.1.1 Allgemeine Modelltheorie

Der Modellbegriff findet sich bereits in Schriften der antiken Erkenntnistheorie (Müller, 1983). Seine heutige Verwendung wurde maßgeblich durch Stachowiak (1973) geprägt. In seiner *Allgemeinen Modelltheorie* präzisiert er den Modellbegriff mithilfe von drei Merkmalen: dem *Abbildungsmerkmal*, dem *Verkürzungsmerkmal* sowie dem *pragmatischen Merkmal* (vgl. Abbildung 2.2). Dabei besagt das Abbildungsmerkmal des Modellbegriffs, dass es sich bei Modellen stets um Abbildungen von Originalen handelt, „die selbst wieder Modelle sein können“ (Stachowiak, 1973, S. 131).

Das Verkürzungsmerkmal drückt wiederum aus, dass ein Modell nicht alle Merkmale des Originals umfasst, sondern lediglich solche, „die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen“ (Stachowiak, 1973, S. 132). Mit dem pragmatischen Merkmal des Modellbegriffs verbindet Stachowiak die Aussage wonach Modelle einen definierten Zweck erfüllen, der an einen bestimmten

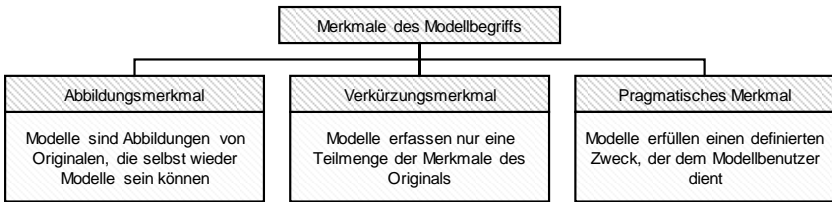


Abbildung 2.2: Merkmale des Modellbegriffs nach Stachowiak (1973)

Zeitpunkt und begleitende Aktivitäten gebunden ist und der den beteiligten „modellbenutzende[n] Subjekte[n]“ (Stachowiak, 1973, S. 132) dient und von einem Modellerschaffer festgelegt wird. Keuth (1978) und Klaus (1961) weisen darauf hin, dass der Zweck eines Modells nicht allein in der Zusammenfassung bekannter Informationen im Zuge der Modellbildung besteht, sondern vielmehr in der Gewinnung neuer Erkenntnisse und der Erklärung und Prognose unvollständiger Aspekte der Realität durch die Modellnutzung.

Die Merkmale des Modellbegriffs nach Stachowiak implizieren die Unterscheidung zwischen dem *Modellerschaffer* und dem *Modellbenutzer* sowie den mit diesen Rollen verbundenen Aktivitäten der *Modellbildung* und *Modellnutzung* (vgl. Abbildung 2.3). Bei dem Modellerschaffer und dem Modellbenutzer muss es sich dabei nicht zwangsläufig um unterschiedliche Personen handeln. Vielmehr ist es denkbar, dass beide Rollen von derselben Person eingenommen werden (Stachowiak, 1973). In diesem Fall ist die Explizierung eines gebildeten Modells nicht immer notwendig. Stattdessen kann das Modell als mentales Modell vorliegen und als solches für den Erkenntnisgewinn genutzt werden (Meboldt, 2008).

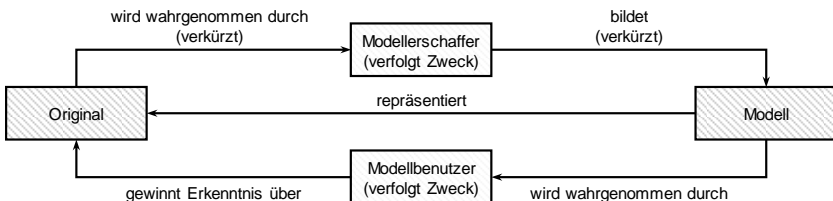


Abbildung 2.3: Modellbildung und Modellnutzung nach Lohmeyer (2013, S. 17)

Handelt es sich bei Modellerschaffer und Modellbenutzer um unterschiedliche Personen, kann der Austausch des explizierten Modells die Kommunikation zwischen beiden unterstützen und letztendlich zu einer Angleichung der unterschiedlichen mentalen Modelle beitragen (Birkhofer & Jänsch, 2003). Dabei kann es jedoch auch zu Konflikten kommen, sofern unterschiedliche Modelle desselben Originals vorliegen, die untereinander nicht kompatibel sind. Dies ist häufig dann der Fall, wenn viele unterschiedliche Personen Modelle eines Originals zu unterschiedlichen Zeitpunkten und zu unterschiedlichen Zwecken erstellen. Lohmeyer (2013) spricht in diesem Zusammenhang vom sogenannten Reduktions-Dilemma. Er bezeichnet ferner moderne Produktentwicklungsprozesse als besonders anfällig für das Auftreten eines Reduktions-Dilemmas, zumal sie dadurch gekennzeichnet sind, dass „verschiedenste Produktmerkmale (viele Zwecke) durch zumeist interdisziplinäre Entwicklungsteams (viele Personen) entlang des gesamten Produktlebenszyklus (viele Zeitpunkte) berücksichtigt werden müssen“ (Lohmeyer, 2013, S. 19) und in der Folge eine Vielzahl unterschiedlicher, mitunter inkompatibler Produktmodelle entstehen. Ein Ansatz, um dem Reduktions-Dilemma zu begegnen besteht im Einsatz transdisziplinärer Metamodelle, die einheitliche Regeln für die Modellbildung vorgeben (Albers & Lohmeyer, 2012; Bursac, 2016; Winzer, 2013). Mit der *Allgemeinen Systemtheorie* existiert eine solche Modelltheorie, „die Axiome, Ableitungen und Regeln für die korrekte Bildung von Modellen umfasst“ (Ropohl, 2005, S. 27).

2.1.1.2 Allgemeine Systemtheorie

Die Allgemeine Systemtheorie ist als Metatheorie für das wissenschaftliche Arbeiten unabhängig von der konkreten Disziplin von besonderer Relevanz. „Sie bildet einen einheitlichen methodischen Unterbau für eine systematische Analyse vielfältiger Zusammenhänge in Natur-, Technik-, Geistes-, Sozial- oder Betriebswissenschaften.“ (Breunig, 2017, S. 14) Der wesentliche Ursprung der modernen Systemtheorie ist die allgemeine Systemlehre, die von dem Biologen Bertalanffy (1949) in den 1930er Jahren begründet wurde. Eine der zentralen Aussagen der allgemeinen Systemlehre ist die Feststellung, dass sich ein System nicht allein als die Summe seiner Elemente beschreiben lässt. So besagt das Phänomen der Emergenz, dass sich gewisse Eigenschaften eines Systems nicht anhand der Eigenschaften seiner Elemente erklären lassen, sondern vielmehr erst durch die wechselseitigen Beziehungen der Elemente zueinander entstehen (Küppers & Krohn, 1992). Ein System ist daher stets als die Summe seiner Elemente und die Summe der Beziehungen zwischen diesen Elementen aufzufassen (Ropohl, 2009).

Dieser Ansatz wurde von anderen Autoren aufgegriffen und findet sich in weiter konkretisierter Form in verschiedenen Systemdefinitionen wieder. Entsprechend der Vielseitigkeit der Gegenstandsbereiche der Systemtheorie haben sich verschieden-

artige Systemdefinitionen herausgebildet, die in unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen Anwendung finden. Ein Ansatz zur Differenzierung verschiedener Systemdefinitionen findet sich bei Ropohl (2009). Er identifiziert drei Aspekte des Systembegriffs, die sich isoliert oder in Kombination in verschiedenen Systemdefinitionen wiederfinden lassen (vgl. Abbildung 2.4).

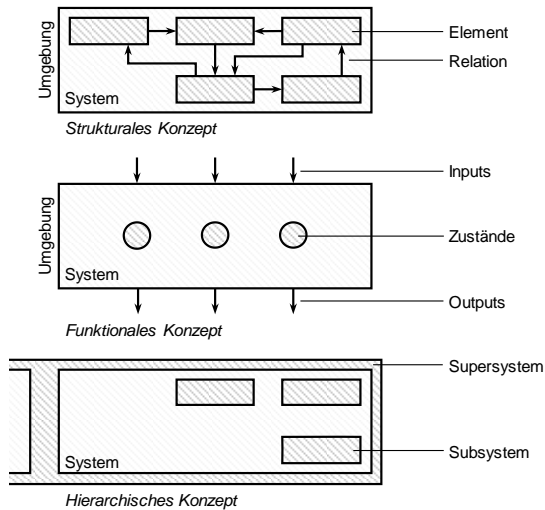


Abbildung 2.4: Klassifizierung von Systemdefinitionen nach Ropohl (2009, S. 76)

Vor allem in den Ingenieurwissenschaften finden strukturelle Systemdefinitionen die größte Verbreitung. Sie stellen diejenige Eigenschaft von Systemen in den Vordergrund, wonach sie aus einer Menge von Elementen bestehen, die durch Relationen miteinander verknüpft sind (Ropohl, 2009). Der allgemeine Begriff der Relation aus der Systemtheorie findet seine reale Entsprechung etwa in räumlichen, funktionalen, energetischen oder informationellen Beziehungen zwischen verschiedenen Systemelementen. Göpfert (1998) spricht in diesem Zusammenhang von unterschiedlichen Beziehungsdimensionen, die auch parallel zueinander existieren können. Die Gesamtheit der Elemente und Relationen eines Systems bildet dessen Struktur (Frank et al., 2009). Es findet sich eine Vielzahl von Systemdefinitionen in der Literatur, die den strukturellen Aspekt betonen. Eine Auswahl davon ist in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Auswahl strukturaler Systemdefinitionen nach Breunig (2017)

<i>Autor</i>	<i>Definition</i>
Beer	“A system consists of a group of elements dynamically related in time according to some coherent pattern.” (Beer, 1979, S. 7)
Bertalanffy	“A system can be defined as a complex of interacting elements. Interaction means that elements, p , stand in relations, R , so that the behavior of an element p in R is different from its behavior in another relation, R' .” (Bertalanffy, 1968, S. 55–56)
Hall & Fagen	“A system is a set of objects together with relationships between the objects and between their attributes.” (Hall & Fagen, 1956, S. 18)
Patzak	„Ein System besteht aus einer Menge von Elementen, welche Eigenschaften besitzen und welche durch Relationen miteinander verknüpft sind.“ (Patzak, 1982, S. 19)
Ulrich	„Unter einem System verstehen wir eine geordnete Gesamtheit von Elementen, zwischen denen irgendwelche Beziehungen bestehen oder hergestellt werden können.“ (Ulrich, 1970, S. 105)

Das funktionale Systemkonzept kommt verstärkt in den Erfahrungswissenschaften zur Anwendung, etwa um die Reaktion eines Probanden auf einen Reiz schematisch abzubilden. Für derartige Zwecke ist der konkrete Aufbau des Systems von nachrangiger Bedeutung. Vielmehr sind die Eingangs- (Inputs) und die Ausgangsgrößen (Outputs) des Systems von Interesse. Von der inneren Struktur des Systems wird hingegen im Sinne einer Black Box abstrahiert (Ropohl, 2009). Eine Systemdefinition, die das strukturale Konzept um den funktionalen Ansatz ergänzt, findet sich bei Bossel (2004) (vgl. Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Systemdefinition nach Bossel (2004)

<i>Autor</i>	<i>Definition</i>
Bossel	„Ein System existiert in einer bestimmten Systemumgebung (Umwelt), von der es durch seine Systemgrenze getrennt ist. Es steht unter dem Einfluss von Einwirkungen aus der Umwelt (Input) und wirkt selbst mit seinen Auswirkungen auf die Umwelt (Output). Die Systemelemente sind durch eine charakteristische Struktur miteinander verbunden. Einige dieser strukturellen Verknüpfungen können Teile von Rückkopplungsschleifen sein.“ (Bossel, 2004, S. 36)

Die Unterscheidung zwischen Input- und Outputgrößen rückt den Begriff der Systemgrenze in das Betrachtungsfeld, die auch Teil der Systemdefinition Bossels ist.

Die Systemgrenze trennt die Elemente des Systems von der Systemumwelt. Sie dient also dazu, einen Betrachtungsausschnitt festzulegen. Dies geschieht im Zuge der Modellbildung oft vor dem Hintergrund der zweckgebundenen Vereinfachung (Ludwig, 2001; Matthiesen et al., 2018). Die Festlegung der Systemgrenze ist dabei keinesfalls objektiv gegeben, sondern ist vielmehr ein „willkürlicher Akt“ (Göpfert, 1998, S. 12). Sie bestimmt gleichwohl maßgeblich den Informationsgehalt eines Systemmodells sowie den Aufwand, der mit dessen Erstellung verbunden ist (Eggert, 2010; Töllner, 2010).

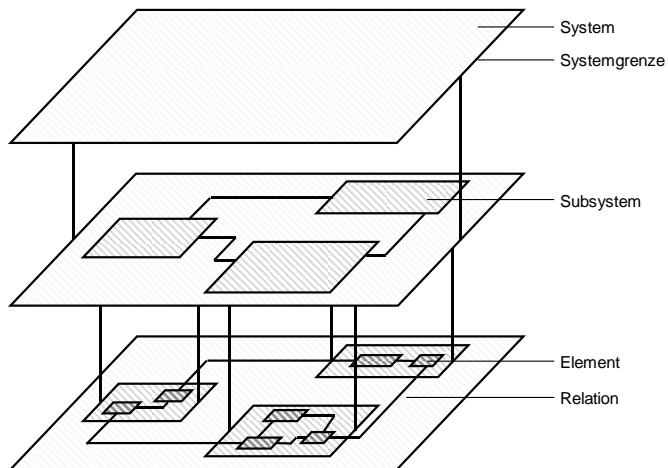


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Systemhierarchie nach Göpfert (1998, S. 20) und Haberfellner, Weck, Fricke & Vössner (2012, S. 47)

Das hierarchische Konzept als drittem Aspekt des Systembegriffs betont den Umstand, dass ein System selbst wiederum als Teil eines übergeordneten Systems fungieren kann (Ropohl, 2009). Diese übergeordneten Systeme bezeichnet man auch als *Supersysteme*, während ihnen untergeordnete Systeme als *Subsysteme* bekannt sind. Streng genommen wird der Terminus *Element* nur für solche Subsysteme verwendet, die nicht weiter aufgelöst werden können (Schwaninger, 1998). Die inhaltliche Abgrenzung von Elementen und weiter zerlegbaren Subsystemen ist dabei in der Praxis dem subjektiven Einfluss des Betrachters unterworfen, der an einem bestimmten Detaillierungsgrad interessiert ist und dementsprechend auf eine weitere Untergliederung verzichtet, sobald dieser erreicht ist (Göpfert, 1998). Die

Zerlegung eines Systems in seine Subsysteme wird als Dekomposition oder Subsystembildung bezeichnet, während man im umgekehrten Fall der Zusammensetzung eines Supersystems aus untergeordneten Subsystemen von Systembildung spricht (Göpfert, 1998). Ein durch Dekomposition zerlegbares Supersystem lässt sich entlang verschiedener Systemebenen bis zur Elementarebene als Hierarchie darstellen (Haberfellner et al., 2012). Abbildung 2.5 zeigt die schematische Darstellung einer solchen Systemhierarchie. Das Beispiel verschiedener realer Systeme wie dem Internet oder globaler Satellitennetze zeigt, dass die einzelnen Subsysteme eines Supersystems einen Umfang annehmen können, der es rechtfertigt, sie selbst wiederum als eigenständige Systeme zu betrachten (Albers, Mandel, Yan & Behrendt, 2018; Maier, 1998). Maier (1998) hat für solche Supersysteme den Begriff des *System of Systems* (SoS) geprägt. Albers, Mandel et al. (2018) identifizieren anhand der Literatur neun kennzeichnende Attribute von Systemen innerhalb eines SoS, die diese von Subsystemen eines monolithischen Supersystems abgrenzen.

Tabelle 2.3: Ganzheitliche Systemdefinition nach Ropohl (2009)

<i>Autor</i>	<i>Definition</i>
Ropohl	„Ein System ist das Modell einer Ganzheit, die Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht, und die von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.“ (Ropohl, 2009, S. 77)

In dem Bestreben um die ganzheitliche Beschreibung eines Systems kombiniert Ropohl den strukturalen, funktionalen und hierarchischen Systembegriff und gelangt damit zu der Systemdefinition, wie sie in Tabelle 2.3 wiedergegeben wird.

2.1.1.3 Komplexitätsbegriff

Im Zuge der Übertragung der hier dargelegten Allgemeinen Systemtheorie auf technische Systeme ist es zweckmäßig zunächst eine für reale Systeme zentrale Eigenschaft näher zu betrachten. Realen Systemen wird oft die Eigenschaft der *Komplexität* zugeschrieben (Willke, 2000). Das systemwissenschaftliche Verständnis von Komplexität geht dabei in seiner Konkretisierung über das Alltagsverständnis hinaus. Wie die Systemtheorie selbst, findet auch der Komplexitätsbegriff Anwendung in verschiedensten Wissenschaftsdisziplinen. Dies führte zu einer Reihe unterschiedlicher Komplexitätsdefinitionen, die in der Literatur zu finden sind (Kirchhof, 2003). Patzak (1982) folgt in seiner Definition dem verbreiteten Verständnis von

Komplexität im Sinne einer komplexen Systemstruktur. Als wesentliche Determinanten der Komplexität eines Systems identifiziert er daher die Vielfalt seiner Elemente (Varietät) und die seiner Relationen (Konnektivität). Dimensionen der Vielfalt sind dabei sowohl Anzahl als auch Verschiedenheit der Elemente und Relationen.

Den von Patzak hergeleiteten Komplexitätsbegriff mit seinen Dimensionen der Konnektivität und der Varietät bezeichnen Ulrich & Probst (1995) lediglich als einen die Komplexität verstärkenden Faktor, der für sich genommen jedoch noch kein komplexes System impliziert. Konstituierendes Merkmal des komplexen Charakters eines Systems ist für Ulrich & Probst vielmehr die Dynamik, also die „Fähigkeit eines Systems, in einer gegebenen Zeitspanne eine große Zahl von verschiedenen Zuständen annehmen zu können“ (Ulrich & Probst, 1995, S. 58). Aufbauend auf dieser Komplexitätsdefinition identifizieren Ulrich & Probst vier grundsätzliche Systemtypen in Abhängigkeit der Dynamik des Systems sowie der Vielfalt der Elemente und Relationen (vgl. Abbildung 2.6).

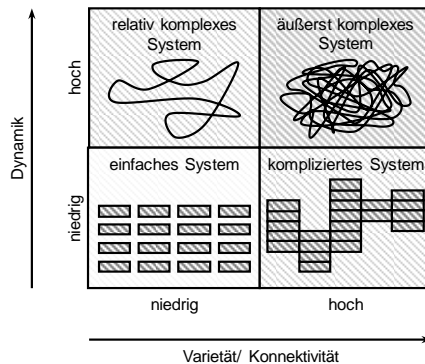


Abbildung 2.6: Klassifikation der Systemkomplexität nach Gottschalk (2006, S. 59) und Ulrich & Probst (1995, S. 61)

Äußerst komplexe Systeme zeichnen sich demnach sowohl durch eine hohe Varietät und Konnektivität als auch durch eine starke systemimmanente Dynamik aus (Gartzen, 2012). Vor dem Hintergrund einer vollständigen Erfassung komplexitäts-induzierender Mechanismen muss die zweigegliederte Darstellung der Dimensionen der Komplexität eines Systems nach Patzak daher um die Dynamik ergänzt werden (vgl. Abbildung 2.7).

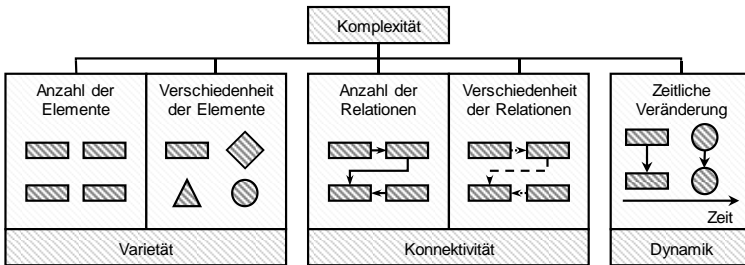


Abbildung 2.7: Erweiterte Dimensionen der Komplexität eines Systems nach Gartzien (2012, S. 55)

Komplexität als Merkmal eines Systems hat sowohl konstitutiven als auch beschreibenden Charakter (Kirchhof, 2003). In ihrer konstitutiven Funktion prägt sie wie vorstehend hergeleitet die Struktur eines Systems in den Dimensionen der Varietät, Konnektivität und Dynamik. Der beschreibende Charakter der Komplexität zeigt sich insofern, als sie durch ihre Auswirkung auf das Systemverhalten eine Reihe spezifischer Eigenschaften impliziert, die komplexen Systemen gemein sind. Ausführungen dazu finden sich in der Literatur etwa bei Reither (1996) und Ashby (1974). Letzterer stellte Mitte des 20. Jahrhunderts grundlegende Forschungen auf dem Gebiet der komplexen Systeme an und prägte damit die Wissenschaftsdisziplin der Kybernetik, einer Teildisziplin der Systemtheorie, die insbesondere die Untersuchung und Regelung komplexer Systeme zum Gegenstand hat (Beer, 1962; Krieg, 1971). Ashby stellt fest, dass es komplexe Systeme nicht zulassen, jeweils nur einen Faktor zu verändern. Dies folgt aus dem hohen Grad der Varietät, Konnektivität und Dynamik komplexer Systeme, der wiederum zur Folge hat, dass die Veränderung eines Faktors unmittelbar auch die Veränderung anderer Faktoren verursacht (Ashby, 1974).

Diese charakteristische Eigenschaft komplexer Systeme ist mitursächlich für die Schwierigkeit, die dem Umgang mit komplexen Systemen anhaftet. In einer weiter gefassten Komplexitätsdefinition wird diese subjektive Perspektive der Komplexität selbst zum Teil des Komplexitätsbegriffes. Kirchhof (2003) spricht in diesem Zusammenhang von funktionaler Komplexität, die er von der strukturalen Komplexität abgrenzt, welche sich mit dem zuvor hergeleiteten Komplexitätsbegriff deckt.

Das Maß der funktionalen Komplexität lässt sich im Gegensatz zur strukturalen Komplexität nicht objektiv erfassen. Es hängt vielmehr vom Betrachter des Systems und seinen individuell empfundenen Schwierigkeiten im Umgang mit dem System ab. Die funktionale Komplexität manifestiert sich demnach in einer „Lücke zwischen

dem Problemlösungsbedarf einerseits und Problemlösungserkenntnis, -potenzial, und -kompetenz andererseits“ (Kirchhof, 2003, S. 15). Durch diesen subjektiven Zugang zum Komplexitätsbegriff lassen sich neben der Varietät, Konnektivität und Dynamik eines Systems zusätzliche komplexitätsinduzierende Faktoren identifizieren, welche die Komplexität aus funktionaler Sicht bedingen. Als solche führen Malik (2008) und Suh (1999) die vorherrschende Unsicherheit im Umgang mit einem System an, die sich in Form von Wissens- und Definitionslücken (vgl. auch Kapitel 2.3.1) ausdrückt (Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012; Ebel, 2015).

Komplexe Systeme sind in der Praxis eher die Regel denn die Ausnahme und oft von besonders großem Interesse. Dies trifft insbesondere auf die Klasse der technischen Produktsysteme zu. Während bisher von der realen Entsprechung der beschriebenen Systeme weitgehend abstrahiert wurde, soll die systemtheoretische Terminologie im folgenden Kapitel 2.1.2 auf das konkrete Produktsystem übertragen werden.

2.1.2 Technische Systeme

Die im vorangegangenen Kapitel dargelegte Terminologie zur Systemtheorie erlaubt den wissenschaftlichen Zugang zum Begriff des Produkts. Ein Produkt lässt sich dabei als eine reale Entsprechung des abstrakten Konstrukts eines Systems auffassen und wird dieser Logik folgend auch als *Produktsystem* bezeichnet. Synonym zum Produktbegriff wird in der Literatur häufig der Begriff des Erzeugnisses verwendet. So ist nach Renner (2007, S. 9) unter einem Produkt „jedes künstlich geschaffene Erzeugnis zu verstehen, das einem bestimmten vordefinierten Zweck dient“. DIN 199-1 (2002, S. 11) definiert ein Erzeugnis als ein „durch die Produktion entstandener gebrauchsfähiger bzw. verkaufsfähiger Gegenstand“. Im Gegensatz zu ingenieurwissenschaftlich geprägten Definitionen zielt das betriebswirtschaftliche Begriffsverständnis auf die nutzenstiftende Funktion eines Produkts ab. So definiert Homburg (2017, S. 557) ein Produkt etwa als „Bündel von Eigenschaften, das auf die Schaffung von Kundennutzen (jedweder Art) abzielt“. Ein weiter gefasstes Produktverständnis formuliert auch Maune (2002), der von einem Produkt als einem Objekt spricht, das am Markt angeboten wird und ein Bedürfnis erfüllt. Diese Definition umfasst neben Produkten materieller Art etwa auch immaterielle Dienstleistungen. In dieser Arbeit soll das Verständnis des Produktbegriffs, den Ausführungen in DIN 199-1 folgend, jedoch auf materielle bzw. technische Erzeugnisse beschränkt bleiben. Diese werden als technische Produkte bezeichnet und finden ihre systemtheoretische Entsprechung im Begriff des technischen Systems (Ehrlenspiel, 2009).

Die domänenspezifische Ausprägung der Allgemeinen Systemtheorie zur Beschreibung technischer Produkte und deren Entwicklungsprozesse wird als *Systemtheorie*

der Technik, Systemtechnik oder Systems Engineering bezeichnet (Pulm, 2004). Dieser Theorie folgend, lassen sich auch Produktsysteme hinsichtlich einer strukturalen, funktionalen und hierarchischen Dimension beschreiben. Zur strukturalen Beschreibung von Produktsystemen ist anstelle des systemtheoretischen Begriffs des Elements der des Bauteils gebräuchlich. Analog zum Element eines allgemeinen Systems existieren Bauteile auf der niedrigsten Gliederungsebene eigenständiger Produktbestandteile. Sie lassen sich durch Demontage nicht weiter unterteilen (Ruppert, 2007). Bauteile sind analog zu den Elementen eines allgemeinen Systems ebenfalls durch Relationen miteinander verknüpft. Relationen zwischen Bauteilen werden als Schnittstellen bezeichnet. Schnittstellen sind oft physischer Natur wie etwa im Fall einer Passverzahnung zwischen Welle und Nabe oder einer Schraubverbindung. Letzteres Beispiel macht außerdem deutlich, dass Schnittstellen ggf. ein zusätzliches Medium, wie in diesem Fall eine Schraube, erfordern können. Neben physischen Beziehungen zwischen Bauteilen sind aber ebenso auch berührungslose Schnittstellen wie z. B. in Form einer Infrarotverbindung denkbar (Ulrich, 1995). Über den strukturellen Zusammenhalt hinaus ermöglichen Schnittstellen zum Teil auch den Austausch von In- und Output-Größen anderer Beziehungsdimensionen wie Materie, Energie oder Information, deren Betrachtung insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung mechatronischer Systeme an Relevanz gewinnt (Feldhusen, Grote, Göpfert & Tretow, 2013). Dem hierarchischen Konzept der Systemdefinition entsprechend, lassen sich mehrere Bauteile auf einer höheren Ebene des Produktsystems zu einer zweckmäßigen Einheit zusammenfassen, die als Baugruppe bezeichnet wird (Ehrlenspiel, 2009). Die Gesamtheit aller physischen Elemente und deren Schnittstellen, also die physische Gliederung eines Produkts in Baugruppen und Bauteile, wird analog zur systemtheoretischen Terminologie als *Produktstruktur* oder *Baustruktur* bezeichnet (Feldhusen, Grote, Göpfert & Tretow, 2013).

An vielen Stellen in der Literatur wird über den strukturalen Aspekt hinaus die funktionale Dimension der Produktdefinition betont. So halten etwa Feldhusen, Grote, Göpfert & Tretow (2013, S. 242) fest, dass Produkte dazu dienen „eine Funktion zu erfüllen“. Dabei folgt die formale Definition des Funktionsbegriffs dem bereits zuvor eingeführten Verständnis als Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Produktsystems. Dieser Zusammenhang entsteht durch einen technischen Prozess, „in dem Energien, Stoffe und Signale geleitet und/oder verändert werden“ (Feldhusen, Grote, Göpfert & Tretow, 2013, S. 240). Andere Autoren zielen mit ihrem Funktionsverständnis nicht auf die physikalischen Wirkzusammenhänge innerhalb eines Systems ab, sondern vielmehr auf die Wechselwirkungen eines Produkts mit seiner Umwelt. Eckert, Alink, Ruckpaul & Albers (2011) sprechen daher von einer Unterscheidung „zwischen Funktion als beabsichtigte Wirkung und Funktion als Beschreibung der Vorgänge im System“ (zit. nach Alink, 2010, S. 25).

Analog zur räumlichen Beziehungsdimension lässt sich auch für die funktionale Beschreibung eines Produkts eine hierarchische Beziehung zwischen Funktionen unterschiedlicher Aggregationsebene herstellen. Dabei wird die Gesamtfunktion auf der Ebene des Gesamtprodukts durch Dekomposition in Teilfunktionen auf niedrigeren Hierarchieebenen aufgegliedert (Göpfert, 1998). Analog zur Baustruktur wird die „Gesamtheit der funktionalen Elemente eines Produkts sowie deren Beziehungen untereinander“ (Arnoscht, 2011, S. 13), also die funktionale Beschreibung des Produkts durch Verknüpfung der Teilfunktionen zur Gesamtfunktion, als *Funktionsstruktur* eines Produkts bezeichnet (Pahl, Beitz, Grote & Feldhusen, 2007).

Die Produkt- und Funktionsstruktur beschreiben ein Produkt aus zwei verschiedenen Perspektiven, einer physischen und einer funktionalen. Beide Perspektiven sind auch im Produktentwicklungsprozess von Bedeutung. So sehen klassische Ansätze der Entwicklungsmethodik vor, zunächst durch Dekomposition der vom Kunden geforderten Gesamtfunktion des Produkts die Funktionsstruktur des Produkts zu generieren, um diese anschließend in iterativen Analyse- und Syntheseschritten in eine gestalterische Lösung zu überführen (Feldhusen, Grote, Nagarajah et al., 2013). Albers & Matthiesen (2002) und Matthiesen (2011) stellen jedoch fest, dass der Einsatz von Funktionsstrukturen in der Konstruktionspraxis oft nicht zielgerichtet erfolgt, zumal die Produktfunktionen nicht eindeutig formuliert werden oder die Verknüpfung zur Baustruktur fehlt.

Die Zuordnung der vom Produkt zu erfüllenden Teilfunktionen aus der Funktionsstruktur zu physischen Funktionsträgern in der Baustruktur wird als *Transformationsbeziehung* oder als *Wirkzusammenhang* bezeichnet, die in ihrer Gesamtheit die *Wirkstruktur* bilden (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2002). Die Gesamtheit aus Funktions- und Baustruktur sowie den Transformationsbeziehungen zwischen diesen beiden Strukturen bestimmt den grundlegenden Aufbau und die Kernfunktionen eines Produktes und wird in Anlehnung an Ulrich (1995) als *Produktarchitektur* bezeichnet (vgl. Abbildung 2.8).

Technischen Systemen aus der industriellen Praxis wird oft eine hohe strukturelle Komplexität zugesprochen, die sich analog zum allgemeinen Komplexitätsbegriff in einer großen Anzahl und Verschiedenheit der Bauteile und Baugruppen solcher Systeme und deren Schnittstellen ausdrückt und auch als *Produktkomplexität* bezeichnet wird (Bliss, 2000). Beispiele für komplexe technische Produktsysteme finden sich unter anderem in der Automobil- und Zuliefererindustrie oder dem Maschinen- und Anlagenbau (Ponn & Lindemann, 2011). Die gesamte Reichweite des Komplexitätsproblems in der betrieblichen Praxis der produzierenden Industrie erschließt sich jedoch erst bei einer Ausweitung des Betrachtungsbereichs vom einzelnen Produkt hin zum *Produktprogramm*.

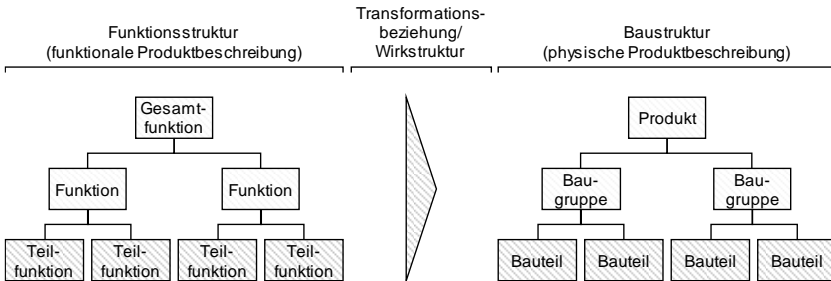


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Produktarchitektur nach Göpfert (1998, S. 75)

Der Begriff des Produktprogramms bezeichnet allgemein „die Gesamtheit der Produkte, die ein Unternehmen am Markt anbietet“ (Blees, 2011, S. 7). Das Produktprogramm setzt sich wiederum aus Produktfamilien zusammen, in denen jeweils Produkte zusammengefasst werden, die „gemeinsame Technologien (Komponenten und Funktionen) teilen und ähnliche Marktsegmente bedienen“ (Göpfert, 1998, S. 82). Die Produktfamilien bestehen ihrerseits aus einzelnen *Produktvarianten*.

Der Begriff der Variante ist in DIN 199-1 (2002, S. 15) definiert als „Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“. In einer allgemeineren Definition sprechen Franke & Firchau (1998) von einer Variante eines technischen Systems als einem „andere[n] technische[n] System gleichen Zwecks, das sich in mindestens einer Beziehung oder einem Element unterscheidet“ (zit. nach Firchau, 2003, S. 50). Im Gegensatz zu den Definitionen des Variantenbegriffs nach DIN 199-1 sowie nach Franke & Firchau setzt die Definition des VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1976, S. 179) die Existenz einer Referenzeinheit voraus, um die Variante als „Abart einer Grundausführung“ von ihr abzugrenzen. Auch Peglow, Powelske, Birk, Albers & Bursac (2017, S. 11) definieren eine Variante im Kontext ihres sogenannten Varianten-Referenzprodukts, von dem sie sich „durch eine differente Ausprägung der charakterisierenden Merkmale abgegrenzt, um individuellen Kunden- und Marktanforderungen gerecht zu werden“. Der Zusammenhang zwischen Produktprogramm, Produktfamilie und Produktvariante ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

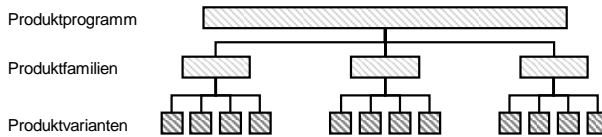


Abbildung 2.9: Gliederung eines Produktprogramms nach Sekolec (2005, S. 20)

Das Produktprogramm eines Unternehmens lässt sich anhand seiner Breite und seiner Tiefe beschreiben (Renner, 2007). Die Produktprogrammbreite wird durch die Anzahl unterschiedlicher Produktfamilien bestimmt. Sie bestimmt damit die Anzahl der Marktsegmente, die ein Unternehmen mit seinem Produktprogramm abdeckt. Die Einführung zusätzlicher Produktfamilien kommt demnach einer Markterweiterung gleich. Die Produktprogrammtiefe ist hingegen durch die Anzahl der Produktvarianten in den einzelnen Produktfamilien gekennzeichnet und stellt ein Maß für die Marktdurchdringung in den Segmenten dar (Sekolec, 2005).

2.1.2.1 Klassifizierung technischer Systeme

Um das Verständnis für ihre Vielfalt zu erleichtern, lassen sich technische Systeme, und damit auch technische Produkte als ihrer realen Entsprechung, nach verschiedenen Kriterien klassifizieren. Ehrlenspiel (2009) schlägt eine Unterscheidung technischer Produkte nach einer Reihe ingenieurwissenschaftlich begründeter Kriterien vor. Dazu zählt die Unterscheidung nach der Hauptumsatzart sowie die nach der Komplexität eines Produkts. Die Klassifizierung technischer Produkte nach ihrer Hauptumsatzart beruht auf der Feststellung, dass diese um ihre Funktion zu erfüllen in der Regel eine Zustandsänderung eines sogenannten Umsatzproduktes bewirken. Nach dem DIN-Fachbericht 12 (1987) wird dabei zwischen den Umsatzarten (Art des Umsatzprodukts) Stoff, Energie und Information unterschieden. Für die Klassifikation technischer Produkte nach ihrer Komplexität zieht Ehrlenspiel (2009) den systemtheoretisch fundierten Komplexitätsbegriff heran (vgl. Kapitel 2.1.1.3). Nach der Anzahl und Vielfalt der Elemente eines technischen Systems sowie der Relationen zwischen ihnen unterscheidet er in Anlehnung an Koller (1998) zwischen technischen Anlagen (hohe Komplexität), Aggregaten, Maschinen, Baugruppen und Maschinenelementen bis hin zu Bauteilen und einzelnen Bauteilmerkmalen (niedrige Komplexität). Über die Komplexität und die Hauptumsatzart hinaus führt Ehrlenspiel (2009) eine Reihe weiterer, vorwiegend technischer Eigenschaften an, nach denen sich Produkte klassifizieren lassen, wie etwa die Werkstoffart, die Fertigungsart, die Leistung oder das Gewicht eines Produkts.

Neben den ingenieurwissenschaftlich begründeten, produktzentrierten Ansätzen zur Produktklassifizierung existieren in der betriebswissenschaftlichen Literatur alternative Ansätze, die eine Unterscheidung verschiedener Produkte aus Kunden- und Anwendersicht vorsehen. Diese gehen in der Regel über den Bereich der technischen Produkte hinaus und schließen auch immaterielle Produkte mit ein. Gausemeier et al. (2018) sprechen dabei allgemein von einer Marktleistung. Eine Möglichkeit der marktorientierten Klassifizierung von Produkten bietet die Unterscheidung nach ihrer Dauerhaftigkeit und Beständigkeit. Demnach lassen sich Produkte in die drei Klassen der Gebrauchsgüter, Verbrauchsgüter und Dienstleistungen einteilen (vgl. Tabelle 2.4). Bei Gebrauchsgütern handelt es sich nach Steiner (2007, S. 32–33) um „materielle Produkte, die viele Gebrauchseinsätze überdauern“ und lange Wiederkaufzeiten aufweisen. Technische Produkte fallen fast ausschließlich in diese Kategorie. Verbrauchsgüter werden dagegen „in einem oder wenigen Verbrauchseinsätzen verbraucht“ und haben entsprechend kurze Wiederkaufzeiten. Bei Dienstleistungen handelt es sich wiederum um immaterielle Produkte, die „im engen Verbund zwischen Anbieter und Kunde erstellt werden“. (Kotler & Bliemel, 2001; Steiner, 2007)

Tabelle 2.4: Klassifizierung von Produkten nach Dauerhaftigkeit und Beständigkeit

	<i>Gebrauchsgüter</i>	<i>Verbrauchsgüter</i>	<i>Dienstleistungen</i>
<i>Charakteristika</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Materiell • Überdauern viele Gebrauchseinsätze • Lange Wiederkaufzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiell • Werden in einem oder wenigen Verbrauchseinsätzen verbraucht • Kurze Wiederkaufzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Immateriell • Werden in einem engen Verbund zwischen Anbieter und Kunde erstellt
<i>Beispiel</i>	Automobil	Nahrungsmittel	Taxifahrt

Eine weitere Möglichkeit der marktorientierten Produktklassifizierung bietet die Unterscheidung nach den Kaufgewohnheiten der Konsumenten (vgl. Tabelle 2.5). Sogenannte Produkte des mühelosen Kaufs bezeichnen dabei Produkte, für die der Kunde nur sehr geringe Aufwände für einen Angebotsvergleich in Kauf nimmt. Dabei wird wiederum zwischen Produkten des Regelkaufs, Spontankaufs und des Notfallkaufs unterschieden. Produkte des Such- und Vergleichskaufs zeichnen sich durch eine gezielte Kaufentscheidung aus. Der Kunde wählt dabei aus verschiedenen Produktalternativen, die er anhand ihrer Eigenschaften bewertet. Dabei lassen sich wiederum homogene Produkte, bei denen lediglich der Preis kaufentscheidend ist, von

heterogenen Produkten unterscheiden, die aus Sicht des Kunden Qualitätsunterschiede in verschiedenen kaufentscheidungsrelevanten Eigenschaften aufweisen. Weiterhin werden in der Literatur Produkte des Spezialkaufs und Produkte des fremdinduzierten Kaufs unterschieden. (Kotler & Bliemel, 2001; Steiner, 2007)

Tabelle 2.5: Klassifizierung von Produkten nach Kaufgewohnheiten

	<i>Güter des mühelosen Kaufs</i>	<i>Produkte des Such- und Vergleichskaufs</i>	<i>Produkte des Spezialkaufs</i>	<i>Produkte des fremdinduzierten Kaufs</i>
<i>Charakteristika</i>	<ul style="list-style-type: none"> Keine bewusste oder gezielte Kaufentscheidung Keine Zeit für Angebotsvergleich 	<ul style="list-style-type: none"> Gezielte Kaufentscheidung nach Preis (homogene Produkte) oder Qualität (heterogene Produkte) 	<ul style="list-style-type: none"> Angebotsvergleich nicht möglich durch fehlenden Markt Hoher Kaufaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> Informationsbeschaffung fremdinduziert Kein objektiver Angebotsvergleich möglich
<i>Beispiel</i>	<i>Nahrungsmittel</i>	<i>Benzin (homogenes Produkt), Automobil (heterogenes Produkt)</i>	<i>Antiquitäten</i>	<i>Lebensversicherung</i>

Ein weiterer Ansatz zur Klassifizierung von Produkten bietet der Grad ihrer Interaktivität. Dazu wurde in der Literatur der Begriff des *interaktiven Produkts* geprägt. Als interaktive Produkte werden nach DIN EN ISO 9241-210 (2011, S. 6) solche Produkte verstanden, „die Eingaben von einem (einer) Benutzer(in) [empfangen] und Ausgaben zu einem (einer) Benutzer(in) [übermitteln]“. Hassenzahl (2006, S. 149) spricht von interaktiven Produkten als Produkte, „mit denen man auf eine bestimmte Art und Weise interagieren kann“. Auch Maeng, Lim & Lee (2012) erheben in Anlehnung an Dix (2004) die Möglichkeit der Interaktion mit einem Produkt durch einen Anwender zum Charakteristikum interaktiver Produkte. Die Interaktion erfolgt dabei über eine Schnittstelle, die selbst Teil des Produkts ist (vgl. Abbildung 2.10).

Alle Definitionen machen damit das menschliche Subjekt zum Bestandteil des Begriffsverständnisses interaktiver Produkte, das als Benutzer oder Anwender auftritt und in dieser Rolle in einer Beziehung zum Produkt steht. Interaktiven Produkten stehen damit Produkte gegenüber, die in keiner Interaktion mit einem menschlichen

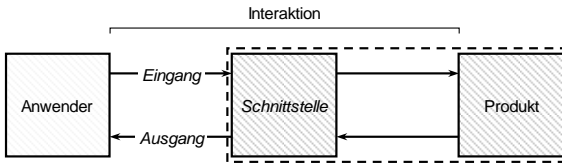


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung eines interaktiven Produkts nach Maeng et al. (2012, S. 449)

Anwender stehen, sondern etwa ausschließlich mit anderen technischen Produkten interagieren (Yogasara, 2014).

2.1.2.2 Eigenschaften technischer Systeme

Ein Produkt zeichnet sich allgemein gesprochen durch ein bestimmtes Produktverhalten aus. Das Verhalten eines technischen Produkts bezeichnet dabei „dessen Reaktion auf äußere Einflüsse [...], die durch Interaktion mit Umgebungssystemen induziert werden“ (Wintergerst, 2015, S. 37). Wanke (2010) stellt fest, dass sich das Produktverhalten nicht in Gänge durch die Funktion eines Produkts beschreiben lässt. Er verdeutlicht dies anhand der Eigenschaft Wartungsfreiheit eines Produkts. Dabei handle es sich nicht um eine Funktion. Die Eigenschaft erlaube aber dennoch „eine Aussage darüber, wie sich ein Produkt im Betrieb verhält“ (Wanke, 2010, S. 100). Wintergerst (2015, S. 48) folgert daraus in Anlehnung an Roozenburg (2002), dass der Fokus bei der Produktentwicklung „nicht nur auf den Funktionen im Sinne des beabsichtigten Zwecks eines Produkts, sondern ebenso auf dessen Eigenschaften liegen“ sollte.

Der Eigenschaftsbegriff sowie der eng damit verwandte Begriff des Produktmerkmals sind in der Literatur nicht einheitlich definiert. Hubka (1984, S. 14) versteht unter einer Eigenschaft „jedes Merkmal, das einem beliebigen Objekt eigen ist und das dieses Objekt charakterisiert“. Er unterscheidet darüber hinaus zwischen internen Eigenschaften wie grundlegenden Wirkprinzipien oder Geometrie, die vom Konstrukteur im Sinne einer Stellgröße festgelegt werden können und externen Eigenschaften, die das Produktverhalten im Sinne einer Folgegröße charakterisieren und „nicht unmittelbar beim Konstruieren festgelegt werden können“ (Wintergerst, 2015, S. 49). Einem ähnlichen Eigenschaftsverständnis folgen auch Birkhofer & Wäldele (2009), die von unabhängigen Eigenschaften (independent properties) als Stellgrößen und abhängigen Eigenschaften (dependent properties) als Folgegrößen sprechen. Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 30) definieren Eigenschaften als „alles, was durch Beobachtungen, Messergebnisse, allgemein akzeptierte Aussagen usw.

von einem Gegenstand festgestellt werden kann“. Weiterhin grenzen sie den Eigenschafts- von Merkmalsbegriff ab, indem sie festhalten, dass „wichtige kennzeichnende Eigenschaften [...] zur besseren Hervorhebung mit dem Begriff Merkmal bezeichnet werden [können]“. Dagegen folgt Weber (2012) in Anlehnung an Andreasen (1980) im von ihm beschriebenen Ansatz des Characteristics-Properties-Modelling (CPM) einem Verständnis von Merkmalen als vom Produktentwickler direkt zu beeinflussenden Parametern und Eigenschaften als den daraus resultierenden Folgegrößen, die das Verhalten des Produkts beschreiben. Weber (2012, S. 32) führt weiter aus, dass „Eigenschaften [...] vom Produktentwickler nicht direkt festgelegt werden [können]“. Sie lassen sich stattdessen nur indirekt durch die Veränderung bestimmter Merkmale beeinflussen, „welche sich ihrerseits in der gewünschten Weise auf bestimmte Eigenschaften auswirken“.

Die Diskussion der verschiedenen in der Literatur verwendeten Begrifflichkeiten zeigt, dass insbesondere die Abgrenzung des Eigenschafts- und Merkmalsbegriffs nicht einheitlich erfolgt. In dieser Arbeit soll dem von Weber und Andreasen geprägten Verständnis von Merkmalen als Stellgrößen und Eigenschaften als Folgegrößen in der Produktentwicklung gefolgt werden. Jede Produkteigenschaft ergibt sich demnach aus einer Kombination verschiedener Produktmerkmale (vgl. Abbildung 2.11). Für eine Veränderung der Produkteigenschaften – und damit des Produktverhaltens – bedarf es also immer auch einer Veränderung der Produktmerkmale.

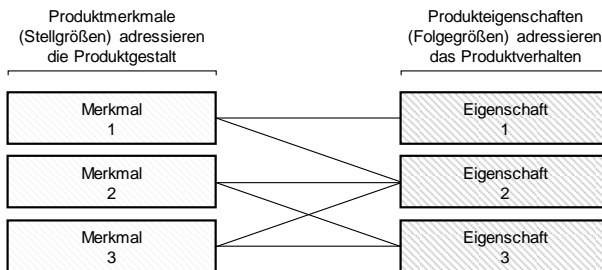


Abbildung 2.11: Exemplarische Beziehung zwischen Produktmerkmalen und Produkteigenschaften nach Wintergerst (2015, S. 56)

Eigenschaften und Merkmale dienen der Beschreibung und Klassifizierung mehrerer unterschiedlicher Produkte. Sie allein sind dafür jedoch noch nicht ausreichend. Erst die Ausprägung eines Merkmals oder einer Eigenschaft ist spezifisch für ein Produkt und ermöglicht so einen sinnvollen Vergleich. Ausprägungen können dabei

sowohl qualitativ als auch quantitativ skaliert sein. Tabelle 2.6 zeigt beispielhaft sowohl quantitative wie auch qualitative Ausprägungen ausgewählter Produktmerkmale und Produkteigenschaften für zwei Fahrzeuge. (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013; Steiner, 2007)

Tabelle 2.6: Beispielhafte Ausprägungen von Produktmerkmalen und -eigenschaften

		<i>Ausprägungen</i>	
		<i>Fahrzeug 1</i>	<i>Fahrzeug 2</i>
<i>Merkmale</i>	Karosserieform	Coupé	Limousine
	Hubraum	3,0 l	1,8 l
	Radstand	2,6 m	2,8 m
<i>Eigenschaften</i>	Höchstgeschwindigkeit	250 km/h	220 km/h
	Fahrkomfort	gering	hoch
	Kraftstoffverbrauch	9 l/100km	6 l/100km

Merkmale und Eigenschaften beschreiben mit ihren jeweiligen Ausprägungen nicht nur das Gesamtprodukt. Vielmehr lassen sie sich auch zur Beschreibung einzelner Subsysteme des Gesamtsystems heranziehen. Eigenschaften unterschiedlicher Systemebenen stehen dabei in Wechselwirkung zueinander. So ergeben sich die Eigenschaftsausprägungen des Gesamtsystems durch die Ausprägungen der Eigenschaften auf Subsystemebene. Genauso können auch Eigenschaften gleicher Systemebene voneinander abhängen. (Heitger, 2019)

Produktmerkmale und -eigenschaften lassen sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren. In der Literatur werden dazu unterschiedliche Ansätze diskutiert. Eine verbreitete Möglichkeit zur Klassifizierung ist die Unterscheidung zwischen Beschaffenheits-, Funktions- und Relationsmerkmalen in Anlehnung an DIN 2330 (2013). Eine solche Einteilung findet sich etwa bei Lindemann (2009) und bei Ehrlenspiel & Meerkamm (2013) (vgl. Abbildung 2.12). Dabei beschreiben Beschaffenheitsmerkmale die geometrische oder stoffliche Beschaffenheit eines Produkts, während sich Funktionsmerkmale auf die Funktionserfüllung bzw. den gewollten Zweck eines Produkts beziehen. Relationsmerkmale beschreiben wiederum die Bedingungen an die Funktionserfüllung, die sich aus der Beziehung eines Produkts mit seiner Umgebung ergeben. Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 30) führen weiter aus, dass es sich bei Beschaffenheitsmerkmalen um „unmittelbar festgelegte Merkmale [handelt], während Funktions- und Relationsmerkmale dadurch mittelbar festgelegt werden“. Funktions- und Relationsmerkmale nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013) und

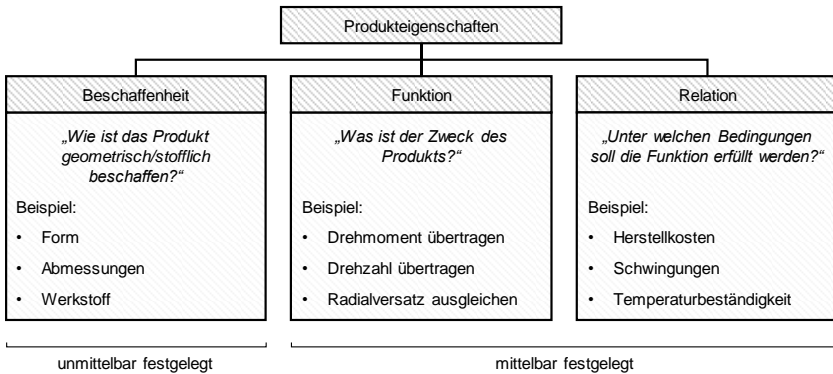


Abbildung 2.12: Gliederung von Produkteigenschaften nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 31)

Lindemann (2009) entsprechen also dem zuvor eingeführten Verständnis einer Produkteigenschaft als Folgegröße in der Produktentwicklung, während der Begriff des Gestaltmerkmals dem oben beschriebenen Merkmalsbegriff im Sinne einer Stellgröße folgt.

Albers & Wintergerst (2014) und Thau (2013) nehmen im sogenannten *Contact and Channel Approach (C&C²-A)* eine ähnliche Klassifizierung von Produkteigenschaften vor. Sie unterscheiden zwischen Gestalteigenschaften, Funktionseigenschaften und Wirkungseigenschaften. Gestalteigenschaften beschreiben dabei die „geometrische, räumliche und stoffliche Beschaffenheit von Wirkflächen und Leitstützstrukturen“ (Wintergerst, 2015, S. 53) und bestimmen damit die Funktions- und Wirkungseigenschaften eines Produkts. Wirkungseigenschaften charakterisieren die „Wirkung in einem Wirkflächenpaar oder einer Leitstützstruktur“ (Wintergerst, 2015, S. 53). Funktionseigenschaften ergeben sich wiederum aus der Summe aller „Eigenschaften der an einer Funktion beteiligten Wirkungen“ (Thau, 2013, S. 134).

Ponn & Lindemann (2011, S. 30) nennen ein weiteres Kriterium zur Klassifizierung von Eigenschaften. Demnach lässt sich zwischen Eigenschaften unterscheiden, „die unmittelbar für den Nutzer des Produkts dienend sind“ und Eigenschaften, die wiederum dem Hersteller dienen. Bei ersteren handelt es sich um „kaufentscheidende Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Gewicht und Kosten“. Auch Steiner (2007, S. 153) spricht von Produkteigenschaften als Beurteilungskriterien aus einer Kunden- oder Anwendersicht, „die dazu dienen, Produkte miteinander vergleichen zu können“. Er spricht Eigenschaften und ihren Ausprägungen in dem Zusammenhang

eine zentrale Bedeutung als Bewertungsgrundlage im Rahmen der Untersuchung von Konsumentenbedürfnissen durch Verfahren der *Präferenzmessung* zu. Lancaster (1966) beschreibt in diesem Zusammenhang, dass die *Präferenz* eines Kunden oder Anwenders für ein bestimmtes Produkt nicht unmittelbar von den Ausprägungen der Produkteigenschaften abhängt, sondern vielmehr vom individuellen Nutzen, den diese für die jeweilige Person stiften. Steiner (2007) betont daher unter Verweis auf Böcker & Helm (2003), Voeth (2000) und Kotler & Bliemel (2001), dass ein Produkt aus Kunden- und Anwendersicht nicht allein als ein Bündel von Eigenschaften zu verstehen ist, sondern vielmehr als ein *Nutzenbündel*. Weist ein Produkt eine Menge an Eigenschaften z_1, z_2, \dots, z_n auf, so ergibt sich der Nutzen des Produkts für einen Kunden oder Anwender aus der dazugehörigen Nutzenfunktion:

$$U = f(z_1, z_2, \dots, z_n) \quad (1)$$

Zur Abgrenzung eines marktorientierten Eigenschaftsverständnisses aus der Sicht von Kunden und Anwendern definieren Albers, Heitger et al. (2018) den Begriff der *kundenerlebbar*en *Produkteigenschaft* wie folgt (zit. nach Heitger (2019, S. 22)):

*„Kundenerlebbar*e Produkteigenschaften sind Produkteigenschaften, welche das Verhalten des technischen Gesamtsystems aus Sicht des Kunden bzw. Anwenders beschreiben. Sie ermöglichen dem Kunden bzw. Anwender (ähnliche) Produkte subjektiv, zum Teil objektiviert, miteinander zu vergleichen und damit Produktdifferenzierung zu beschreiben.“

Aus der Definition geht hervor, dass kundenerlebbar

Produkteigenschaften ein Produkt auf der Gesamtsystemebene beschreiben. Dies deckt sich mit Aussagen aus der Literatur, wonach Anwender ein Produkt stets holistisch beurteilen (Rutherford, 2005). Der Nutzen eines Produkts für Kunden und Anwender wird durch das Gesamtsystem erfüllt. Die Beschreibung und Bewertung dieses Nutzens hat somit ebenfalls im Kontext des Gesamtsystems zu erfolgen (Albers, Fischer, Klingler & Behrendt, 2014, 27.-28. Mai). Die Bewertung des wahrgenommenen Nutzens eines Produkts durch Kunden und Anwender anhand der kundenerlebbar

Produkteigenschaften und ihr Vergleich mit den wahrgenommenen Kosten ist Grundlage für die Kaufentscheidung (Day, 1990). Gleichzeitig beeinflussen die kundenerlebbar

Produkteigenschaften durch ihre Realisierung in Form einer konkreten technischen Lösung wiederum maßgeblich die Kosten eines Produktes (vgl. Abbildung 2.13). (Heitger, 2019; Schubert, Heller & Feldhusen, 2012)

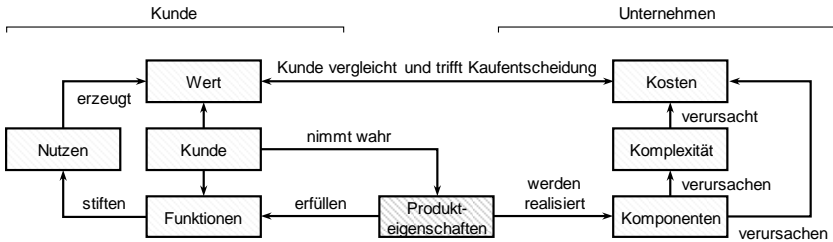


Abbildung 2.13: Abhängigkeiten zwischen Produkt, Kunde und Unternehmen nach Schubert et al. (2012, S. 431), zit. nach Heitger (2019, S. 23)

Nicht alle kundenerlebbaaren Produkteigenschaften sind für einen Kunden oder Anwender tatsächlich relevant für die Produktbewertung und haben damit einen Einfluss auf die Kaufentscheidung. Steiner (2007) nennt als Indikatoren für die Relevanz von Produkteigenschaften für Kunden und Anwender deren Bekanntheit und Wichtigkeit sowie ihre Salienz und Determinanz. Saliente Produkteigenschaften bezeichnen dabei solche Eigenschaften, die „besonders leicht aus dem Gedächtnis abrufbar sind“ (Steiner, 2007, S. 199). Als determinant gelten Produkteigenschaften, „die in enger Beziehung zur Präferenz [...] stehen“ (Steiner, 2007, S. 201). Neben ihrer Relevanz für die Kaufentscheidung diskutiert Steiner (2007) verschiedene weitere Kriterien zur marktorientierten Klassifizierung von Produkteigenschaften. Tabelle 2.7 gibt einen Überblick über die von ihm aufgeführten Unterscheidungsmöglichkeiten.

Tabelle 2.7: Möglichkeiten zur marktorientierten Klassifizierung von Produkteigenschaften nach Steiner (2007), zit. nach Heitger (2019, S. 22)

Unterscheidungskriterium	Eigenschaftsarten
Informationsasymmetrie zwischen Hersteller und Kunde	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Suceigenschaften</i>: Eigenschaften, deren Ausprägungen Konsumenten bereits vor dem Kauf einschätzen können • <i>Erfahrungseigenschaften</i>: Eigenschaften, deren Ausprägungen sich erst bei Gebrauch feststellen lassen • <i>Vertrauenseigenschaften</i>: Eigenschaften, deren Ausprägungen auch nach Gebrauch nur schwer festgestellt werden können

<i>Unterscheidungskriterium</i>	<i>Eigenschaftsarten</i>
<i>Herkunft</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Intrinsische Eigenschaften</i>: Physische bzw. funktionale Eigenschaften, die dem Produkt unmittelbar eigen sind (Geschmack, Geruch, Geschwindigkeit, etc.)• <i>Extrinsische Eigenschaften</i>: Eigenschaften ohne Zusammenhang zur Funktionalität des Produkts, die jedoch als Qualitätsindikator dienen (Marke, Preis, Herkunftsland, etc.)
<i>Skalenniveau der Ausprägungen</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Qualitative Eigenschaften</i>: Eigenschaften mit qualitativen Ausprägungen (nominal oder ordinal)• <i>Quantitative Eigenschaften</i>: Eigenschaften mit quantitativen Ausprägungen
<i>Relevanz im Kaufentscheidungsprozess</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Schwelleneigenschaften</i>: Eigenschaften, die Mindestanforderungen an ein Produkt definieren• <i>Trade-off-Eigenschaften</i>: Eigenschaften, die gegen andere Eigenschaften abgewogen werden• <i>Added-value-Eigenschaften</i>: Eigenschaften, die über den Grundnutzen hinaus gehen, aber die Kaufwahrscheinlichkeit beeinflussen
<i>Zugehörigkeit zum Produktkern</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Substantielle Eigenschaften</i>: Objektiv nachweisbare technisch-konstruktive oder physisch-chemische Eigenschaften• <i>Erweiterte Eigenschaften</i>: Zusatzleistungen wie Garantie- oder Finanzierung, Bedienungsanleitung oder Lieferung• <i>Generische Eigenschaften</i>: Mit einem Produkt verbundene Nutzenvorstellungen des Kunden
<i>Deutungsspielraum</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Objektive Eigenschaften</i>: Direkt beobachtbare oder objektiv messbare Eigenschaften (PS-Zahl, Farbe, Preis, etc.)• <i>Subjektive Eigenschaften</i>: Resultat der subjektiven Produktwahrnehmung durch den Kunden (gutes Design, guter Geschmack, etc.)

Eine weitere verbreitete Form der marktorientierten Klassifizierung von Produkteigenschaften, geht auf das sogenannte Kano-Modell nach Kano, Seraku, Takahashi & Tsuji (1984) zurück (vgl. Abbildung 2.14). Nach dem Einfluss von Produkteigenschaften auf die Kundenzufriedenheit unterscheiden sie zwischen Begeisterungs-, Leistungs- und Basismerkmale. Letztere werden dabei von Kunden als selbstverständlich vorausgesetzt. Ihre Erfüllung führt nicht zu Zufriedenheit, wohingegen jedoch ihre Nichterfüllung eine starke Unzufriedenheit hervorruft. Leistungsmerkmale weisen wiederum einen linearen Zusammenhang zwischen ihrem Erfüllungsgrad und der dadurch hervorgerufenen Kundenzufriedenheit auf. Begeisterungsmerk-

male werden nicht vom Kunden erwartet und führen dementsprechend bei Nichterfüllung nicht zu Unzufriedenheit. Ihre Erfüllung ruft jedoch eine überproportional starke Steigerung der Kundenzufriedenheit hervor. Bei Begeisterungsmerkmalen handelt es sich dementsprechend um sogenannte latente oder implizite Bedürfnisse, die von Kunden und Anwendern nicht explizit geäußert werden, aber trotzdem einen großen Einfluss auf die Kundenzufriedenheit haben (Hölzing, 2008). Der Identifizierung derartiger Produkteigenschaften kommt in der Produktentwicklung eine wichtige Bedeutung zu (Katičić, 2012).

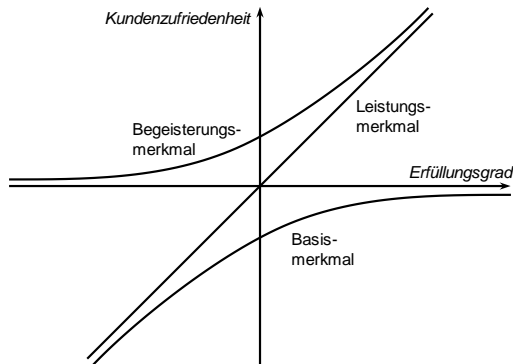


Abbildung 2.14: Kano-Modell nach Kano et al. (1984)

Das Kano-Modell beschreibt damit für jede der drei Eigenschaftsarten den Zusammenhang zwischen der objektiven Eigenschaftsausprägung und der Kundenzufriedenheit als Ergebnis einer subjektiv gebildeten Produktwahrnehmung durch Kunden und Anwender (Hölzing, 2008). Es ermöglicht damit eine Gewichtung von Produkteigenschaften nach ihrer Relevanz für Kunden und Anwender. Dabei ist zu beachten, dass die Zuordnung einer bestimmten Produkteigenschaft zu einer der drei Eigenschaftsarten nicht statisch ist. Vielmehr führen Kano et al. (1984) aus, dass Begeisterungsmerkmale mit fortschreitender Produktlebensdauer zu Leistungsmerkmalen und diese wiederum letztendlich zu Basismerkmalen werden.

2.1.3 Produktmodelle

Technische Produkte mit ihren Merkmalen und Eigenschaften werden im Rahmen der Produktentwicklung in Form von Modellen abstrahiert. Diese sogenannten Produktmodelle sind „formale Abbilder realer oder geplanter Produkteigenschaften“ (Ponn & Lindemann, 2011, S. 20). Die Verkürzung der Vielzahl realer Produkteigenschaften im Rahmen der Modellbildung erleichtert dabei den kognitiven Zugang zu komplexen Problemstellungen und macht Produktmodelle so zu einem wichtigen Werkzeug in der Produktentwicklung (Lindemann, 2009). Produktmodelle werden erstellt, um den aktuellen Entwicklungsstand in einer strukturierten, oft vereinfachten Form zu explizieren und dienen den Produktentwicklern etwa als Kommunikationsgrundlage, als Unterstützung für die Analyse und Synthese der Entwicklungsergebnisse oder als Dokumentation relevanter Produkteigenschaften (Bursac, 2016; Lindemann, 2009). Explizierte Produktmodelle liegen in der Produktentwicklung in verschiedensten Formen vor. Diese umfassen zum Beispiel grafische oder symbolische Darstellungen von Bau- und Funktionsstruktur, Prinzipskizzen von Lösungskonzepten, Texte, technische Dokumentationen, Berechnungen oder virtuelle und physische Prototypen (Braun, 2014; Lindemann, 2009). Ein Produktmodell wird stets aufgabenspezifisch erstellt und ist an einen vorgesehenen Zweck gebunden. Nach diesem Zweck unterscheiden Ponn & Lindemann (2011) zwischen Zielmodellen, Problemmodellen, Entwicklungsmodellen und Verifikationsmodellen (vgl. Abbildung 2.15).

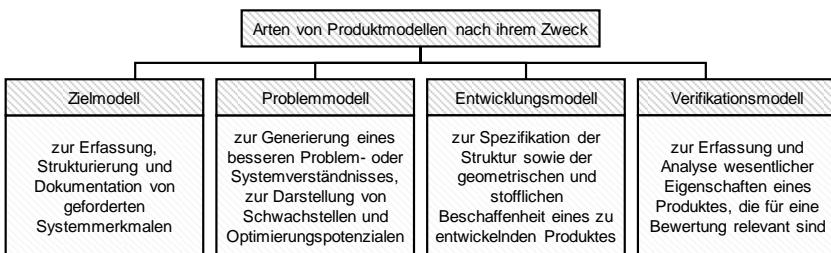


Abbildung 2.15: Klassifikation von Produktmodellen nach ihrem Zweck nach Ponn & Lindemann (2011)

Während der Entwicklung eines komplexen technischen Produkts wird eine große Zahl zum Teil sehr unterschiedlicher Produktmodelle erstellt (Lohmeyer, 2013). Dabei nimmt mit fortschreitendem Entwicklungsstand in der Regel der Konkretisierungs- bzw. Detaillierungsgrad von abstrakten, stark verkürzten Produktmodellen

bis hin zu konkreten, detaillierten Produktmodellen stetig zu (Ponn & Lindemann, 2011). Ponn & Lindemann (2011) beschreiben diesen Zusammenhang in Anlehnung an Ehrlenspiel & Meerkamm (2013) anhand des sogenannten Pyramidenmodells der Produktkonkretisierung (vgl. Abbildung 2.16). Demnach erfolgt die Überführung von Anforderungen in ein konkretes Produkt entlang der Ebenen funktionelle Lösungsmöglichkeiten, prinzipielle physikalische Lösungsmöglichkeiten, gestalterische und stoffliche Lösungsmöglichkeiten sowie fertigungs- und montagetechnische Lösungsmöglichkeiten. Zu jeder der Ebenen existieren Produktmodelle eines entsprechenden Konkretisierungsgrads und Informationsgehalts (Ponn & Lindemann, 2011).

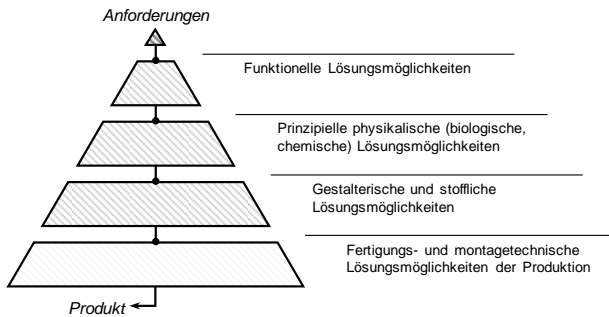


Abbildung 2.16: Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 39) zit. nach Ponn & Lindemann (2011, S. 24)

Neben dem Einsatzzweck und dem Konkretisierungsgrad existieren eine Vielzahl weiterer Kriterien zur Klassifizierung von Produktmodellen. Dazu zählen etwa die Phase im Produktentwicklungsprozess, in der sie zum Einsatz kommen, ihre Darstellungsform, die Häufigkeit mit der sie Änderungen unterworfen sind, die Herkunft der in ihnen abgebildeten Informationen oder ihre Vollständigkeit (Kohn, 2014). Kohn (2014) gibt einen umfangreichen Überblick über die in der Literatur diskutierten Kriterien zur Klassifizierung von Produktmodellen (vgl. Tabelle 2.8).

Tabelle 2.8: Klassifizierung von Produktmodellen nach Kohn (2014, S. 58)

<i>Unterscheidungs-kriterium</i>	<i>Exemplarische Ausprägungen</i>
Einsatzzweck	Zielmodell, Problemmodell, Entwicklungsmodell, Verifikationsmodell
Konkretisierungsgrad	Anforderungen, funktionelle, prinzipiell physikalische, gestalterisch-stoffliche, fertigungs-/montagetechnische Lösungsmöglichkeiten
Phase im Produktentwicklungsprozess	Produktplanung, Entwicklung und Konstruktion, Fertigungsplanung, Montage, Prüfung, Vertrieb, Beratung, Verkauf, Gebrauch, Änderung, Instandhaltung, Aufbereitung/Auflösung
Inhalt	Bauteile, Funktionen, Material, Verhalten, Fluss, Spezifikation, Zusammenbau, Bedingungen, Anforderungen
Darstellungsform	Semantisch, grafisch, tabellarisch, physikalisch
Struktureller Aufbau	Morphologie, Relationen, Taxonomie, Veränderung, Abstraktion, Hierarchie, Selektivität, Kapselung, Zerlegbarkeit, Vererbung, Assoziation
Änderungsverhalten	Stationär, dynamisch
Herkunft	Unternehmensintern, unternehmensextern
Fachdisziplin	Geometriemodell, physikalisches Modell, betriebswirtschaftliches Modell
Vollständigkeit	Vollständig, unvollständig
Anwendungsaufwand	Vorkenntnisse nötig, keine Vorkenntnisse nötig

Zwei Modelle zur Beschreibung von Produkten und den mit ihnen verbundenen Nutzensvorstellungen, die im Kontext dieser Arbeit von besonderer Bedeutung sind, sind das sogenannte *Produktprofil* sowie das *Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation*. Beide werden im Folgenden vorgestellt.

2.1.3.1 Produktprofil

Das Finden von Produktprofilen ist eine der zentralen Aktivitäten zu Beginn eines Produktentwicklungsprojekts. Nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) ist ein Produktprofil „ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht“ (Heitger, 2019, S. 27). Das Produktprofil gibt damit den Lösungsraum für ein Produktentwicklungsprojekt, nicht aber die konkrete technische Lösung vor. Vielmehr geschieht die Modellierung des Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens im Produktprofil lösungs-offen. Gleichzeitig bietet das Produktprofil die Möglichkeit Einschränkungen des

Lösungsraums durch bereits vorhandene technische Lösungen – etwa aus unternehmensinternen Produktbaukästen – vorzunehmen. (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018)

Durch die lösungsoffene Modellierung des mit einem Produkt angestrebten Nutzens lassen sich Produktprofile bereits sehr früh im Produktentwicklungsprozess erstellen, zumal sie keine Kenntnis der technischen Lösung voraussetzen. Produktprofile eignen sich daher als Ausgangspunkt für ein Produktentwicklungsprojekt. Sie bleiben gleichwohl während der gesamten Projektlaufzeit relevant, zumal sie als Grundlage für eine kontinuierliche Validierung der später im Projekt entwickelten technischen Lösungen hinsichtlich der Erfüllung des initial im Produktprofil definierten Nutzenbündels fungieren. Die Ausrichtung der Entwicklungsaktivitäten am Produktprofil unterstützt so die durchgängige Berücksichtigung der Kunden- und Anwendersicht in der Produktentwicklung. Cooper & Kleinschmidt (1993) bezeichnen dies als einen wesentlichen Erfolgsfaktor in der Produktentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.1).

Neben der Validierung technischer Lösungen mithilfe des im Produktprofil definierten angestrebten Produktnutzens betonen Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) die Bedeutung der Validierung des Produktprofils selbst. Diese umfasst die Absicherung der tatsächlichen Relevanz des postulierten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens des zukünftigen Produkts. In der Praxis werden dazu zu Beginn eines Produktentwicklungsprojekts in der Regel mehrere alternative Produktprofile entwickelt und unter Einbeziehung repräsentativ ausgewählter Kunden und Anwender gegeneinander bewertet.

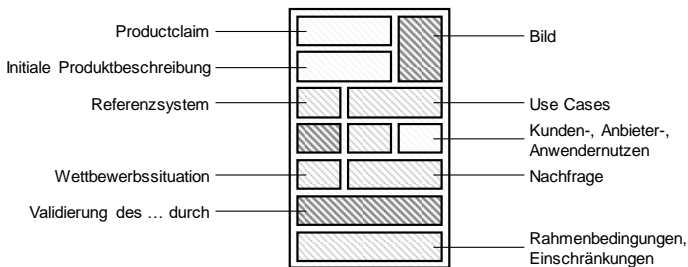


Abbildung 2.17: Aufbau des Product Profile Scheme nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018, S. 257)

Ein solches Vorgehen erfordert zunächst die Explizierung des Produktprofils. Zu diesem Zweck existieren verschiedene Ansätze. Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) beschreiben mit dem sogenannten *Product Profile Scheme* ein Beispiel für ein expliziertes Produktprofil. Dabei handelt es sich um einen modular aufgebauten Steckbrief, der das zukünftige Produkt, seinen angestrebten Nutzen sowie bekannte Einschränkungen und Randbedingungen für die Produktentwicklung entlang von zwölf Abschnitten beschreibt (vgl. Abbildung 2.17).

Heitger (2019) schlägt mit dem Eigenschaftsprofil eine weitere, insbesondere in der Automobilentwicklung etablierte Form der Explizierung des Produktprofils vor. Der angestrebte Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen eines Produkts wird im Eigenschaftsprofil „durch vorgegebene Ausprägungen einer Reihe produktspezifischer, kundenerlebbarer Eigenschaften [beschrieben]“ (Reinemann, Hirschter, Mandel, Heimicke & Albers, 2018, S. 309). Die angestrebte Ausprägung jeder kundenerlebbarer Produkteigenschaft wird dabei in Form einer Soll-Veränderung gegenüber einem Referenzprodukt angegeben, bei dem es sich etwa um ein Vorgänger- oder ein Wettbewerbsprodukt handeln kann. Darüber hinaus lassen sich die Produkteigenschaften auch hinsichtlich ihrer Kundenrelevanz – durch Zuordnung zu einer Eigenschaftsart des Kano-Modells (vgl. Kapitel 2.1.2.2) – oder ihrer Positionierung gegenüber Wettbewerbsprodukten beschreiben (Reinemann, Albers et al., 2018). Die Ausprägungen der kundenerlebbarer Eigenschaften im Eigenschaftsprofil lassen sich zudem über mehrere Hierarchieebenen hinweg definieren. Für die Visualisierung der obersten Hierarchieebene schlägt Heitger (2019) eine Eigenschaftsspinne und für die darunterliegenden Ebene die Verwendung von Polaritätsprofilen und Eigenschaftssteckbriefen vor (vgl. Abbildung 2.18)

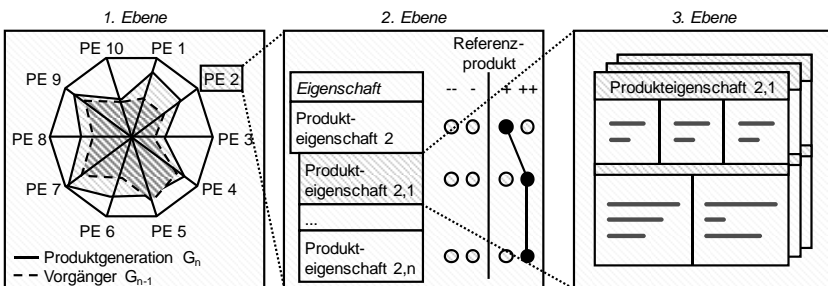


Abbildung 2.18: Visualisierung der unterschiedlichen Ebenen des Eigenschaftsprofils nach Heitger (2019, S. 126)

Albers, Heitger et al. (2018) beschreiben anhand eines mehrstufigen Referenzprozesses ein geeignetes Vorgehen zur Erstellung von Produktprofilen. Den Ausgangspunkt bildet dabei die Analyse und Bewertung der Entwicklungssituation sowie eine Umfeldanalyse und -prognose mit Mitteln der strategischen Produktplanung. Die daran anschließende Entwicklung des Eigenschaftsprofils erfolgt unter Einbeziehung verschiedener Unternehmensfunktionen wie Entwicklung, Design, Marketing, Produktion und Produktplanung. In der daran anschließenden initialen Bewertung des Produktprofils werden die lösungsoffenen kundenerlebbaren Eigenschaften mit lösungsspezifischen Elementen verknüpft. Zur strukturierten Beschreibung der Beziehung zwischen lösungsoffenen und lösungsspezifischen Elementen im Kontext der Produktprofilbildung führen Albers, Heitger et al. (2018) das sogenannte Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation ein. (Albers, Heitger et al., 2018; Heitger, 2019)

2.1.3.2 Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation

Das Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation nach Albers, Heitger et al. (2018) dient der Unterstützung bei der iterativen Konkretisierung eines Produkts ausgehend von einer vorwiegend lösungsoffenen Produktbeschreibung im Produktprofil bis hin zu einer vollständig lösungsspezifischen Produktdefinition. Die unterschiedlichen Konkretisierungsgrade der Produktbeschreibung sind im Produktmodell durch drei Ebenen repräsentiert. Die Produktbeschreibung anhand kunden-erlebbarer Produkteigenschaften auf der obersten Ebene weist dabei den höchsten Abstraktionsgrad auf. Die Modellebene erlaubt damit die lösungsoffene Beschreibung des angestrebten Nutzens eines Produkts aus Kunden- und Anwendersicht. Die technische Realisierung des Kunden- und Anwendernutzens erfolgt letztendlich auf der Ebene einzelner technischer Teilsysteme. Sie bilden im Produktmodell die unterste Ebene mit dem höchsten Konkretisierungsgrad. Zwischen der Ebene der Produkteigenschaften und der Ebene technischer Teilsysteme liegt die Modellebene der Produktfunktionen. Geforderte Ausprägungen von Produkteigenschaften (sogenannte Eigenschaftsziele) lassen sich mithilfe von Produktfunktionen konkretisieren. Umgekehrt lassen sich die Auswirkungen einer technischen Lösung für ein spezifisches Teilsystem auf eine Produkteigenschaft anhand einer Produktfunktion abstrahieren. Produktfunktionen kommt damit eine moderierende Rolle zwischen den Teilsystemen und den Produkteigenschaften zu. Abbildung 2.19 zeigt eine schematische Darstellung des Produktmodells zur Strukturierung der Produktspezifikation und verdeutlicht dies anhand eines Beispiels aus der Fahrwerksentwicklung. (Albers, Heitger et al., 2018; Heitger, 2019; Hirschter, Albers et al., 2018)

Die durchgängige Verknüpfung zwischen Produkteigenschaften, Produktfunktionen und technischen Teilsystemen im Produktmodell erlaubt es, „die technische Umset-

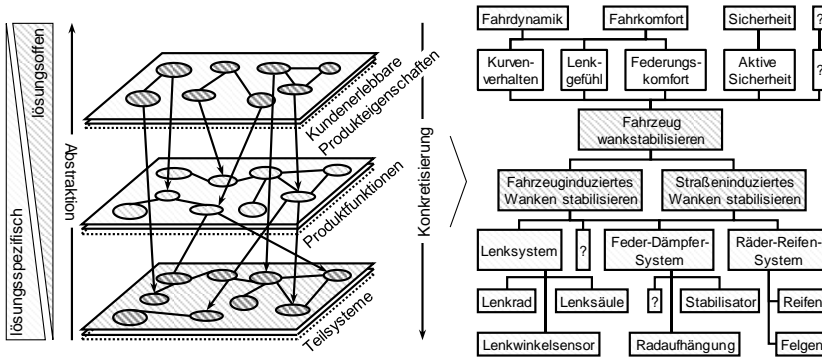


Abbildung 2.19: Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation mit beispielhafter Anwendung nach Albers, Heitger et al. (2018, S. 10)

zung abstrakter Kundenanforderungen [...] systematisch vorherzusehen“ (Hirschter, Albers et al., 2018, S. 313) und so die „technische Lösungsfindung an den kundenorientierten Anforderungen auszurichten“ (Heitger, 2019, S. 107). Weiterhin schafft sie die Voraussetzungen für die frühzeitige Beurteilung der technischen Machbarkeit sowie der Kosten- und Zeitimplikationen von definierten Eigenschaftszielen. Die durchgängige Modellierung ermöglicht gleichzeitig durch Abstraktion den Einfluss vorhandener technischer Lösungen auf Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen zu bewerten. Auch die Identifikation von Zielkonflikten zwischen den unterschiedlichen Anforderungen auf Eigenschafts-, Funktions- und Teilsystemebene wird durch die Verknüpfung der drei Ebenen im Produktmodell erleichtert. (Albers, Heitger et al., 2018; Heitger, 2019; Hirschter, Albers et al., 2018)

2.1.4 Prozessmodelle

Für ein Verständnis sowie eine zielgerichtete Steuerung der Produktentwicklung ist es nicht ausreichend die entstehenden Produkte isoliert zu betrachten. Stattdessen müssen dafür zudem die handelnden menschlichen Akteure in die Betrachtung einbezogen werden. Diesem Verständnis folgend beschreibt Ropohl (2009) die Produktentstehung als ein sogenanntes sozio-technisches System, in dem technische Systeme stets in Wechselwirkung mit sozialen Systemen aus den Bereichen Natur, Mensch und Gesellschaft stehen. Abbildung 2.20 zeigt die Zusammenhänge zwischen den (sozio-)technischen Systemen im Kontext der Produktentstehung.

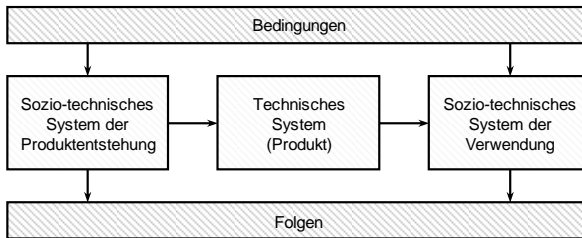


Abbildung 2.20: Produktentstehung und -verwendung als sozio-technisches System nach Ropohl (2009, S. 44)

Zur näheren systemtheoretischen Beschreibung des sozio-technischen Systems der Produktentstehung führt Ropohl (1975) die Begriffe des *Zielsystems*, *Handlungssystem*s und *Sachsystems (Objektsystems)* ein. Albers (2010) greift dieses Verständnis auf und beschreibt im sogenannten ZHO-Modell die „Produktentstehung als die Transformation eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem“ (Albers & Braun, 2011b, S. 16). Dabei ist impliziert, dass auch das Zielsystem während des Produktentstehungsprozesses sukzessive und parallel zur Konkretisierung des Objektsystems weiter konkretisiert wird.

Unter dem Handlungssystem wird dabei ein sozio-technisches System verstanden, welches alle Aktivitäten, Methoden und Prozesse sowie die erforderlichen Ressourcen umfasst, die notwendig sind, um Ziel- und Objektsystem zu erstellen. Das Zielsystem „umfasst alle relevanten Ziele, deren Wechselwirkungen und Randbedingungen, die für die Entwicklung des richtigen Produkts erforderlich sind“ (Ebel, 2015, S. 18). Während die Zielsystemelemente zu Beginn eines Produktentwicklungsprojekts oft noch lösungsoffen formuliert sind, werden sie im Laufe des Entwicklungsprozesses immer weiter konkretisiert (Meboldt, 2008). Konkretisierte Entwicklungsziele in Form einer geforderten Eigenschafts- oder Merkmalsausprägung werden als Anforderungen bezeichnet (Ponn & Lindemann, 2011). Auch sie sind Teil des Zielsystems. Das Objektsystem enthält wiederum „alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen“ (Albers & Braun, 2011b, S. 16). Dazu zählen etwa Zeichnungen, virtuelle Modelle oder Prototypen. (Albers & Braun, 2011a, 2011b)

Albers, Lohmeyer & Ebel (2011) ergänzen im erweiterten ZHO-Modell die Basisaktivitäten der Analyse und Synthese, um so den iterativen Charakter der Produktent-

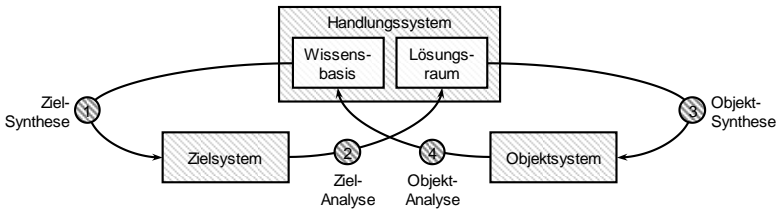


Abbildung 2.21: Erweitertes ZHO-Modell nach Albers et al. (2011, S. 257)

wicklung abzubilden (vgl. Abbildung 2.21). Die Produktentwicklung lässt sich anhand des so gewonnenen Modells „als kontinuierlichen Wechsel von Kreation und Validierung“ (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016, S. 544) beschreiben. Ein Kreationsschritt umfasst dabei die Basisaktivitäten der Ziel-Analyse (2) und Objekt-Synthese (3), während ein Validierungsschritt aus der Objekt-Analyse (4) und anschließender Ziel-Synthese (1) besteht. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Im erweiterten ZHO-Modell konkretisieren Albers et al. (2011) zudem das Handlungssystem durch die Einführung der Wissensbasis und des Lösungsraums. Dabei steht die Wissensbasis für die Gesamtheit des domänen- und fallspezifischen Wissens, das dem Handlungssystem im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung steht. Der Lösungsraum beschreibt wiederum die Menge aller zulässigen Lösungen, die durch Ziele, Anforderungen und Randbedingungen aus dem Zielsystem eingegrenzt wird. (Albers et al., 2011; Lohmeyer, 2013)

Die systemtheoretische Modellierung der Produktentstehung als sozio-technisches System nach Ropohl und im erweiterten ZHO-Modell nach Albers et al. betont den zentralen Einfluss des Menschen. Diese besondere Rolle sehen auch Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019). Sie sehen den Menschen „im Zentrum der Produktentstehung“ (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019, S. 8) und folgern daraus, dass „Prozesse und Methoden an seine Kreativität, Kompetenzen, Bedarfe und kognitiven Fähigkeiten angepasst werden [müssen]“ (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019, S. 8). (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019; Albers, Heimicke, Spadinger, Degner & Dühr, 2019)

Der Einfluss des Menschen auf die Produktentstehung führt dazu, dass jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell ausgeprägt ist. Albers (2010) formuliert diese Tatsache als seine erste Hypothese der Produktentstehung. Die individuellen Charakteristika realer Produktentstehungsprozesse stellen eine besondere Herausforderung für ihre Modellierung in Form von Prozessmodellen

dar. Prozessmodelle müssen zum einen reale Prozesse so stark verkürzen, dass sich deren individuelle Unterschiede im Modell abbilden lassen. Um jedoch Produktentwickler bei der Beschreibung, Prognose und Steuerung realer Entwicklungsprojekte sinnvoll zu unterstützen darf ein gewisser Abstraktionsgrad nicht überschritten werden.

In der Literatur wird eine große Zahl verschiedener Modelle des Produktentstehungsprozesses beschrieben, die sowohl in der Wissenschaft als auch in der industriellen Praxis der Produktentwicklung Verwendung finden. Die unterschiedlichen Prozessmodelle lassen sich dabei nach verschiedenen Kriterien unterscheiden. Wynn & Clarkson (2018) sowie Ponn & Lindemann (2011) nehmen eine Klassifizierung nach dem Auflösungsgrad vor. Wynn & Clarkson (2018) unterscheiden dabei zwischen Modellen der Mikroebene, die auf einzelne Prozessschritte und deren unmittelbaren Kontext fokussieren, Modellen der Mesoebene, die durchgängige Aufgabenabläufe beschreiben und Modellen der Makroebene, die gesamte Projektstrukturen in den Fokus nehmen. Prozessmodelle lassen sich darüber hinaus nach den adressierten Stakeholdern in managementorientierte und operativ orientierte Modelle unterscheiden. Heitger (2019) unterscheidet weiter zwischen reinen Vorgehens- und Phasenmodellen, die den Entwicklungsprozess nach zeitlichen und inhaltlichen Kriterien in einzelne Arbeitsschritte unterteilen und ganzheitlichen Modellen der Produktentstehung, die darauf abzielen mehrere Auflösungsgrade sowie verschiedene Stakeholder zu adressieren.

Abbildung 2.22 zeigt eine Auswahl verschiedener Prozessmodelle, die nach ihrer Zuordnung zu den Vorgehens- und Phasenmodellen oder den ganzheitlichen Modellen sowie nach ihrem Auflösungsgrad klassifiziert sind. Im Folgenden sollen ausgewählte Modelle der Produktentstehung näher vorgestellt werden. Dazu wird zunächst auf die Problemlösungsmethode *SPALTEN* als ein Beispiel für ein

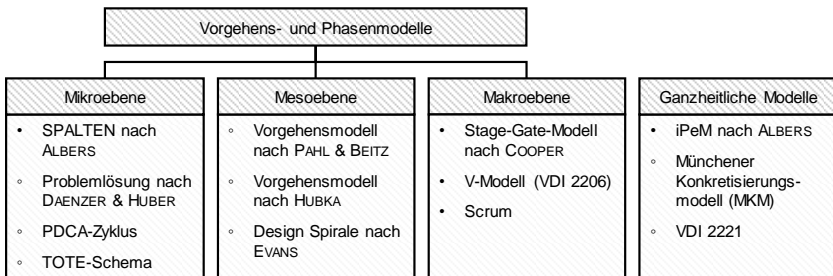


Abbildung 2.22: Klassifizierung ausgewählter Prozessmodelle der Produktentstehung

Vorgehensmodell der Mikroebene eingegangen. Anschließend wird mit dem *Stage-Gate-Modell* und dem *V-Modell* ein managementorientiertes und ein entwicklerorientiertes Prozessmodell der Makroebene vorgestellt. Weiterhin wird mit *Scrum* ein Beispiel für einen agilen Entwicklungsansatz vorgestellt. Mit dem *integrierten Produktentstehungsmodell iPeM* wird abschließend ein ganzheitliches Modell der Produktentstehung beschrieben, das einige der Sichtweisen der oben genannten Ansätze zusammenführt.

2.1.4.1 Problemlösungsmethode SPALTEN

Die Entwicklung und Konstruktion von Produkten kann nach Albers, Burkardt, Meboldt & Saak (2005) als eine Folge beliebig vieler Problemsituationen verstanden werden. Ein Problem ist dabei durch eine zu überwindende Barriere zwischen einem unerwünschten Ausgangszustand (Ist-Zustand) und einem gewünschten Endzustand (Soll-Zustand) gekennzeichnet (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Häufig sind dabei zunächst weder Ausgangs- und Endzustand noch die zur Verfügung stehenden Ressourcen zur Problemlösung genau bekannt.

Zur Unterstützung der Problemlösung schlagen Albers et al. (2005) die Problemlösungsmethode SPALTEN vor. SPALTEN ist ein Akronym und steht für die im Zuge der Problemlösung von den Problemlösungsteams (PLT) durchlaufenen Aktivitäten: Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungen, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden und Umsetzen, Nachbereiten und Lernen (vgl. Abbildung 2.23).

Je nach Erfordernis kann sich die Zusammensetzung des PLT während des Durchlaufens der verschiedenen Problemlösungsaktivitäten ändern. Die Abfolge der Aktivitäten hat dabei nicht zwingend streng sequenziell zu erfolgen. Vielmehr kann es

S	Situationsanalyse
P	Problemeingrenzung
A	Alternative Lösungssuche
L	Lösungsauswahl
T	Tragweitenanalyse
E	Einführen und Umsetzen
N	Nachbereiten und Lernen

Abbildung 2.23: Aktivitäten der Problemlösung in der Problemlösungsmethode SPALTEN nach Albers et al. (2005)

zu Iterationsschleifen kommen. Auch kann eine einzelne Problemlösungsaktivität wiederum das Durchlaufen eines vollständigen, untergeordneten Problemlösungsprozesses nach SPALTEN erfordern. Albers, Braun & Muschik (2010) sprechen in diesem Zusammenhang vom fraktalen Charakter von SPALTEN. (Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016)

2.1.4.2 Stage-Gate-Modell

Der sogenannte Stage-Gate-Ansatz geht ursprünglich auf Cooper (1994) zurück. Dabei handelt es sich um ein managementorientiertes Prozessmodell, das in der industriellen Praxis der Produktentwicklung weite Verbreitung findet. Cooper spricht von 70 % aller Unternehmen, deren Entwicklungsprozesse nach dem Stage-Gate-Modell strukturiert sind (Steinhauser & Zehle, 2010). Das Stage-Gate-Modell unterteilt Entwicklungsvorhaben in mehrere unterschiedliche Phasen (eng. stages), welche durch Meilensteine (eng. gates) voneinander getrennt sind. Zu jedem Meilenstein wird der Projektfortschritt mit zuvor definierten Kriterien verglichen. (Cooper, 1994)

Cooper unterscheidet zwischen drei Generationen von Stage-Gate-Prozessen (vgl. Abbildung 2.24). Die erste Generation (Supplier to Costumer) sieht vor, dass ein Übergang in die nächste Phase nur bei Erfüllung aller definierten technischen Krite-

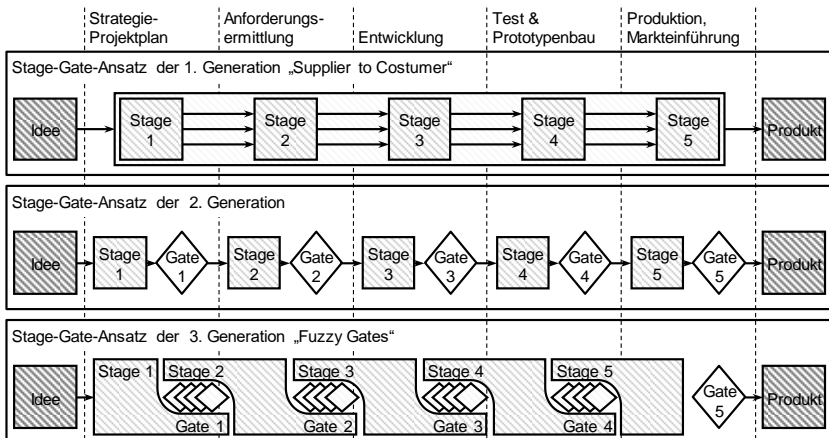


Abbildung 2.24: Verschiedene Generationen des Stage-Gate-Ansatzes nach Cooper (1994) zit. nach Meboldt (2008, S. 34)

rien erfolgen kann. Cooper kritisiert, dass dies im Projekt zu erheblichen Zeitverzögerungen führen kann und durch die Fokussierung auf technische Aspekte ggf. relevante Erfolgsfaktoren außer Acht gelassen werden. Er ergänzt daher diesen Ansatz um die stärkere Berücksichtigung von nicht-technischen, marktorientierten Erfolgsfaktoren an jedem Meilenstein. Die dritte Generation (Fuzzy Gates) sieht zusätzlich die Möglichkeit zur Überlappung der einzelnen Phasen vor, um so potenziell eine Zeitersparnis gegenüber einem streng sequenziellen Ablauf zu erreichen. (Cooper, 1994)

2.1.4.3 V-Modell (VDI 2206)

Die Richtlinie VDI 2206 (2004) beschreibt mit dem sogenannten V-Modell ein praxisnahes Vorgehensmodell speziell für die Entwicklung mechatronischer Systeme (vgl. Abbildung 2.25). Die Richtlinie hat folglich den Anspruch auf Anwendbarkeit für domänenübergreifende Entwicklungsprojekte an der Schnittstelle von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik. Das aus der Informationstechnik adaptierte V-Modell bildet den sogenannten Makrozyklus des Vorgehensmodells. Die VDI 2206 (2004) umfasst darüber hinaus einen allgemeinen Problemlösungszyklus in Anlehnung an Daenzer & Huber (1994) als Mikrozyklus sowie eine Reihe von Prozessbausteinen zur Unterstützung wiederkehrender Arbeitsschritte. (VDI 2206, 2004)

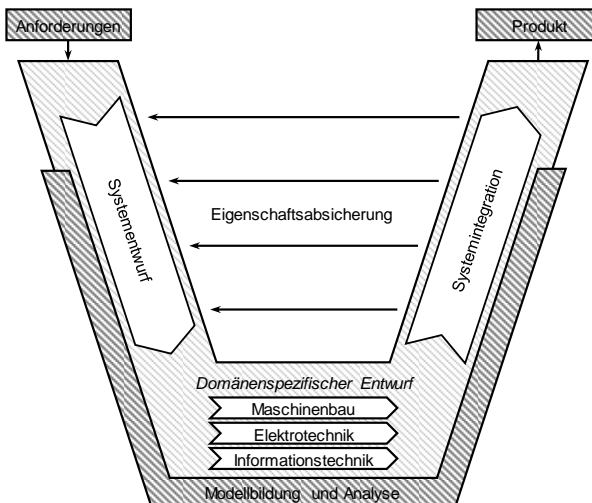


Abbildung 2.25: V-Modell als Makrozyklus für die Entwicklung mechatronischer Systeme nach VDI 2206 (2004, S. 29)

Nach dem V-Modell werden zu Beginn des Makrozyklus zunächst die Anforderungen an das Produkt festgelegt sowie Testfälle für die spätere Absicherung der angestrebten Eigenschaftsausprägungen definiert. Anschließend wird im Systementwurf die Gesamtfunktion des Produkts in Teilfunktionen untergliedert. Für die Teilfunktionen werden in der nachfolgenden Phase des Makrozyklus separate domänenspezifische Lösungskonzepte aus den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik entwickelt und im Zuge der Systemintegration anschließend zu einem Gesamtprodukt integriert. (VDI 2206, 2004)

In der Literatur wird die Vorgehensweise nach dem in der VDI 2206 (2004) vorgesehenen Makrozyklus an verschiedenen Stellen kritisiert. Die Kritik bezieht sich dabei insbesondere auf die vorgesehene Festlegung der Anforderungen an ein Produkt bereits zum Projektbeginn. Albers (2010) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass zu Beginn eines Entwicklungsprojekts zunächst nur ein vages Zielsystem mit zum Teil lösungsoffenen Zielsystemelementen existiert. Erst mithilfe des im Zuge einer kontinuierlichen Validierung gewonnenen Wissens kann dieses Zielsystem im Projektverlauf konkretisiert werden. Die Validierung sollte dieser Logik folgend also nicht auf eine einzelne, abschließende Projektphase beschränkt bleiben. Vielmehr sollten sich Kurations- und Validierungsschritte entsprechend der Logik des erweiterten ZHO-Modells iterativ während des gesamten Entwicklungsprozesses abwechseln. (Albers et al., 2005; Albers, 2010)

2.1.4.4 Scrum

Der Scrum-Ansatz ist ein agiles Vorgehensmodell, dessen Ursprung in der Softwareentwicklung liegt. Das Entwicklungsteam sowie kontinuierliche Iterationen nehmen im Entwicklungsvorgehen nach Scrum einen wichtigen Stellenwert ein. Der Scrum-Ansatz umfasst ein Regelwerk für die Zusammenarbeit des Entwicklungsteams, das unter anderem Vorgaben für die Dauer, die Häufigkeit und den Inhalt von Meetings enthält. Ein zentrales Element von Scrum und auch anderen agilen Entwicklungsansätzen ist die Aufteilung umfassender Entwicklungsaufgaben in kleinere Arbeitspakete, sogenannte Sprints, die nacheinander abzuarbeiten sind. Der grundsätzliche Ablauf eines Sprints ist im Scrum-Framework dargestellt (vgl. Abbildung 2.26). (Albers, Behrendt, Klingler, Reiß & Bursac, 2017; Schwaber & Beedle, 2001; Schwaber, 2004)

Zu Beginn jedes Sprints werden aus dem Zielsystem (Product Backlog) bestimmte Elemente ausgewählt. Jeder Sprint hat zum Ziel ein funktionierendes Produktinkrement basierend auf den ausgewählten Zielsystemelementen hervorzubringen. Dazu werden im Laufe eines Sprints eine Reihe von Aktivitäten durchlaufen, die zuvor im Sprint Backlog detailliert und festgehalten werden. Während ein Sprint in der Regel nicht länger als einen Monat dauern soll, ist die vorgesehene Dauer für eine Aktivität

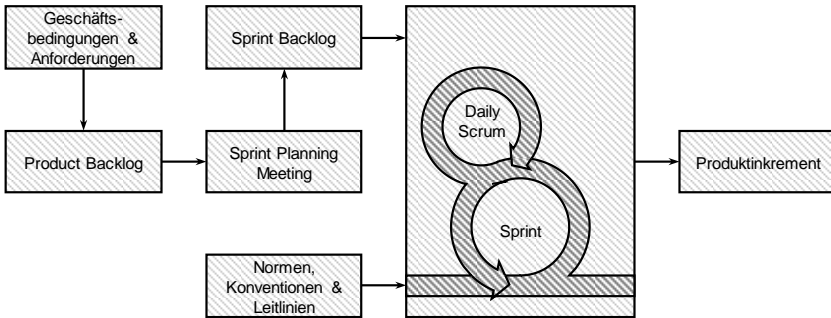


Abbildung 2.26: Scrum-Framework nach Schwaber & Beedle (2001, S. 8)

auf einen Tag begrenzt. Zu Beginn jedes Tages werden die anstehenden Aktivitäten in einer 15-minütigen Besprechung, dem sogenannten Daily Scrum abgestimmt. Nach Abschluss des Sprints wird das entwickelte Produktinkrement den relevanten Stakeholdern in einem Sprint Review Meeting vorgestellt und von ihnen bewertet. Anschließend wird mit der Auswahl der Zielsystemelemente für den folgenden Sprint fortgefahren. (Bursac, 2016; Schwaber, 2004)

Nachdem das agile Entwicklungsvorgehen nach Scrum zunächst nur in der Softwareentwicklung Verbreitung fand, finden sich in der industriellen Praxis der Produktentwicklung mittlerweile viele Bestrebungen das Vorgehen auch auf mechanische oder mechatronische Domänen zu übertragen. Dabei stellen sich jedoch verschiedene Herausforderungen. So betonen Bursac (2016) und Braun (2014) etwa die Schwierigkeit der Wahl „der richtigen Größe der Entwicklungsinkremente und [der] Bewertungsmechanismen der Ergebnisse“ (Braun, 2014, S. 60) in der Hardwareentwicklung im Vergleich zur Softwareentwicklung.

2.1.4.5 Integriertes Produktentstehungsmodell iPeM

Das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM nach Albers ist ein ganzheitliches Modell der Produktentstehung (Albers & Braun, 2011a). Es adressiert verschiedene Auflösungsgrade des Produktentstehungsprozesses von der Mikro- bis zur Makroebene und bietet zudem sowohl eine managementorientierte wie auch eine operative Sicht auf die Produktentstehung. Zudem löst das iPeM das häufig in der Literatur beschriebene „Spannungsfeld zwischen starr vorgegebenen sequenziellen Entwicklungsschritten und eher offen definierten Vorgehensweisen“ (Klingler, 2016, S. 7). So lassen sich die in realen Produktentstehungsprozessen weit verbreiteten

Iterationen ebenso im Modell abbilden wie sequenziell verlaufende Entwicklungsphasen (Klingler, 2016). Die Grundlage für das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM bildet die im erweiterten ZHO-Modell formulierte Auffassung von der Produktentstehung als der Transformation eines Zielsystems in ein Objektsystem durch ein Handlungssystem (vgl. Kapitel 2.1.4). Abbildung 2.27 zeigt den schematischen Aufbau des Produktentstehungsmodells entlang dieser drei Systeme.

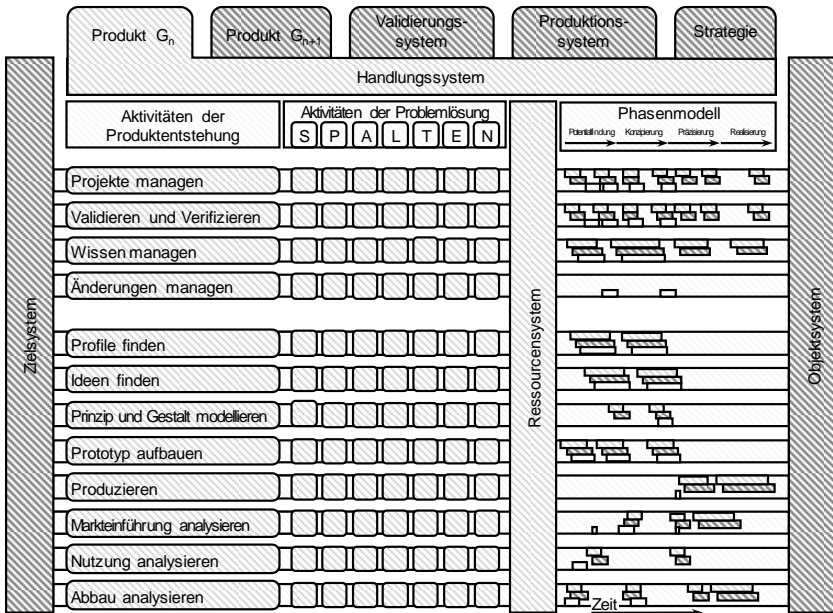


Abbildung 2.27: Integriertes Produktentstehungsmodell iPeM nach Albers, Braun & Mutschik (2010) zit. nach Albers, Reiß, Bursac & Richter (2016, S. 104)

Das Handlungssystem ist im iPeM in einen statischen und einen dynamischen Teil untergliedert. Den statischen Teil bildet dabei das Ressourcensystem sowie die sogenannte Aktivitätenmatrix, die durch die Aktivitäten der Produktentstehung (Makroaktivitäten) und die Aktivitäten der Problemlösung nach der Problemlösungsmethode SPALTEN (Mikroaktivitäten) aufgespannt wird. Die Aktivitäten der Produktentstehung stellen unterschiedliche Handlungsfelder der Produktentstehung aus Sicht des Produktentwicklers dar. Im Gegensatz zu klassischen sequenziellen

Vorgehensmodellen ist ihre zeitliche Reihenfolge im iPeM nicht vorgegeben. Sie werden in die zwei Gruppen der Basis-Aktivitäten und der Kern-Aktivitäten eingeteilt. Die Basis-Aktivitäten umfassen die Aktivitäten Projekte managen, Validieren und Verifizieren, Wissen managen und Änderungen managen. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sie unterstützend zu den Kern-Aktivitäten durchgeführt werden und dabei nicht allein existieren können. Die Kern-Aktivitäten umfassen wiederum die Aktivitäten Profile finden, Ideen finden, Prinzip und Gestalt modellieren, Prototyp aufbauen, Produzieren, Markteinführung analysieren, Nutzung analysieren und Abbau analysieren. Im Gegensatz zu den Kern-Aktivitäten dienen sie unmittelbar dazu den Produktreifegrad zu erhöhen. (Albers & Braun, 2011a; Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016; Reiß, 2018)

Der dynamische Teil des Handlungssystems umfasst das Phasenmodell, in dem die Abfolge der Aktivitäten auf einem Zeitstrahl abgebildet werden kann. Das Phasenmodell ermöglicht es damit den zeitlichen Ablauf eines Entwicklungsprozesses zu planen und zu dokumentieren. Bei den im Phasenmodell abgebildeten Projektverläufen wird zwischen dem Referenz-, dem SOLL- und dem IST-Prozess unterschieden (Wilmsen, Dühr, Heimicke & Albers, 2019). Dabei bezeichnet der Referenzprozess und das zugehörige Referenzprozessmodell eine auf Basis von Erfahrungswerten erstellte Vorlage des Projektverlaufs. Das Modell des SOLL-Prozesses beschreibt den für ein konkretes Entwicklungsprojekt definierten Soll-Verlauf. Dieser wird in der Regel aus dem Referenzprozessmodell abgeleitet. Das Modell des IST-Prozesses bildet wiederum den tatsächlichen Projektverlauf ab. Der Abgleich von SOLL-Prozess- und IST-Prozessmodell ermöglicht im Projektverlauf eine kontinuierliche Kontrolle des Projektfortschritts. (Albers & Braun, 2011a; Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016; Meboldt, 2008; Reiß, 2018; Wilmsen et al., 2019)

Mit der Entwicklung eines Produkts geht in der Regel auch die Entwicklung eines dazugehörigen Validierungs- und Produktionssystems sowie einer Produktstrategie einher. Außerdem befinden sich häufig mehrere Generationen eines Produkts (G_n , G_{n+1} , ...) gleichzeitig in der Entwicklung. Unterschiedliche Produktgenerationen sowie Validierungs- und Produktionssysteme und die Produktstrategie verfügen jeweils über eigene Entwicklungsprozesse, die jedoch starke Wechselwirkungen zueinander aufweisen. Diesen Umstand berücksichtigt das iPeM durch die Einführung separater Ebenen, sogenannter Layer, die durch Reiter am oberen Rand des Modells gekennzeichnet sind. Jede Ebene repräsentiert einen eigenen Entwicklungsprozess, in dem Basis- und Kern-Aktivitäten durchgeführt werden. Die unterschiedlichen Ebenen verfügen über ein gemeinsames Ziel- und Ressourcensystem, jedoch über getrennte Objektsysteme. (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016)

2.1.5 Zwischenfazit

Komplexität ist ein immanentes Merkmal realer mechatronischer Produkte und ihrer Entwicklungsprozesse. Der kognitive Zugang durch den Produktentwickler erfordert daher ein systemisches Produkt- und Prozessverständnis sowie den Einsatz formalisierter Modelle. Technische Produkte lassen sich anhand ihrer Eigenschaften und Merkmale sowie deren Ausprägungen beschreiben und bewerten. Produktmodelle verkürzen die Vielzahl realer Produkteigenschaften und sind ein wichtiges Werkzeug in der Produktentwicklung. Prozessmodelle ergänzen die Betrachtung um den Menschen als handelndem Akteur in der Produktentwicklung. Dem Verständnis des erweiterten ZHO-Modells folgend, steht der Mensch als Teil des Handlungssystems im Zentrum der Produktentwicklung. Er überführt in einem iterativen Vorgehen ein initial vages Zielsystem in ein konkretes Objektsystem. Ziel- und Objektsystem werden dabei im Laufe des Produktentwicklungsprozesses kontinuierlich weiterentwickelt.

2.2 Frühe Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens ist insbesondere von dessen Fähigkeit abhängig Innovationen hervorzubringen (Steiner, 2007). Dies gilt umso mehr angesichts eines steigenden Wettbewerbsdrucks sowie tendenziell kürzer werdender Produktlebenszyklen in vielen Branchen (Schuh & Bender, 2012). Unternehmen wie auch die Wissenschaft beschäftigen sich daher intensiv mit dem Innovationsbegriff, der im folgenden Kapitel 2.2.1 eingeführt wird.

Der Fokus der wissenschaftlichen Diskussion liegt dabei häufig auf *Innovationen* in Form von vollständigen Produktneuentwicklungen, die jedoch in der industriellen Praxis der Produktentwicklung nur selten zu finden sind. Vielmehr werden reale Produkte über mehrere Produktgenerationen hinweg weiterentwickelt, um so den sich ändernden Anforderungen und Randbedingungen angepasst zu werden (Albers, 1991; Eckert, Alink & Albers, 2010). Ein Beschreibungsmodell der Produktentwicklung, das dieser Beobachtung Rechnung trägt, ist das *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach Albers, das in Kapitel 2.2.2 vorgestellt wird.

Während Innovationsaktivitäten Unternehmen die Chance auf wirtschaftlichen Erfolg bieten, bergen sie oft gleichzeitig erhebliche Risiken, zumal sie in der Regel mit signifikanten Investitionen einhergehen und der erhoffte Markterfolg einer Produktentwicklung in der Praxis nicht selten ausbleibt. Verschiedene Studien sprechen je

nach Branche, Erhebungsmethode und zugrundeliegendem Begriffsverständnis von einem Anteil von 20 % bis 98 % der Produktentwicklungsprojekte, die nicht zum erhofften Erfolg führen (Helm, 2001; Steiner, 2007; Verworn & Herstatt, 2007). Nach Steiner (2007, S. 1) könnten erfolglose Entwicklungsprojekte vermieden werden, „wenn mehr Wert auf die frühen Phasen der Produktentwicklung gelegt werden würde“. Unter Verweis auf ihre Hebelwirkung auf nachgelagerte Prozesse und den geringeren Aufwand zur Korrektur von Konzeptfehlern betonen auch viele weitere Autoren die besondere Bedeutung früher Entwicklungsphasen (Albers, Behrendt et al., 2016; Cooper & Kleinschmidt, 1993; Gruner & Homburg, 1999; Helm, 2001; Porter, 2004). Die besonderen Charakteristika der *Frühen Phase* werden in Kapitel 2.2.3 im Kontext des Modells der PGE diskutiert. Der besondere Fokus auf die Frühe Phase ist ein Merkmal agiler Entwicklungsansätze (Link, 2014). In Kapitel 2.2.4 wird mit dem *Agile-Systems-Design-Ansatz* ein agiler Ansatz in der Produktgenerationsentwicklung vorgestellt.

2.2.1 Innovationsbegriff

Der Innovationsbegriff in seiner heutigen Prägung geht maßgeblich auf Schumpeter (1939) zurück. Ihm zufolge ist unter einer Innovation eine Invention zu verstehen, die sich erfolgreich am Markt etabliert hat. Die sprichwörtliche „innovative Idee“ ist demnach nicht ausreichend für eine Innovation im Sinne Schumpeters. Vielmehr muss eine Idee erst erfolgreich umgesetzt werden, bevor sie zur Innovation wird (Disselkamp, 2012). Aus der Definition Schumpeters folgt unmittelbar die zentrale Bedeutung von Innovationen für einen nachhaltigen Unternehmenserfolg (Albers, Bursac & Rapp, 2017; Johnes & Snelson, 1988; Souder & Chakrabarti, 1980). Dies zeigt sich etwa an der Korrelation zwischen der Rentabilität eines Unternehmens und der Häufigkeit mit der es Innovationen hervorbringt (Disselkamp, 2012).

Aufbauend auf der Definition von Schumpeter formulieren Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018) ein Innovationsverständnis, das neben der Invention und der Marktdiffusion zudem noch die initiale Identifizierung einer Bedürfnissituation in Form eines weitgehend lösungsoffenen Produktprofils (vgl. Kapitel 2.1.3.1) zur Voraussetzung für den Markterfolg und damit den Innovationscharakter einer Invention erhebt (vgl. Abbildung 2.28). Produkte können demnach nur erfolgreich sein, wenn sie einen Nutzen für eine Kunden- und Anwendergruppe stiften und damit deren Anforderungen und Bedürfnisse erfüllen oder sogar übertreffen (Albers, Heimicke, Hirschter et al., 2018). Auch andere Autoren weisen auf die Bedeutung einer „Wertspezifikation aus Kundensicht“ (Bartholdt, 2018, S. 16) für den Markterfolg eines Produkts hin (Disselkamp, 2012; Ponn & Lindemann, 2011; Verworn & Herstatt, 2007). Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) betonen dabei, dass die Verwendung

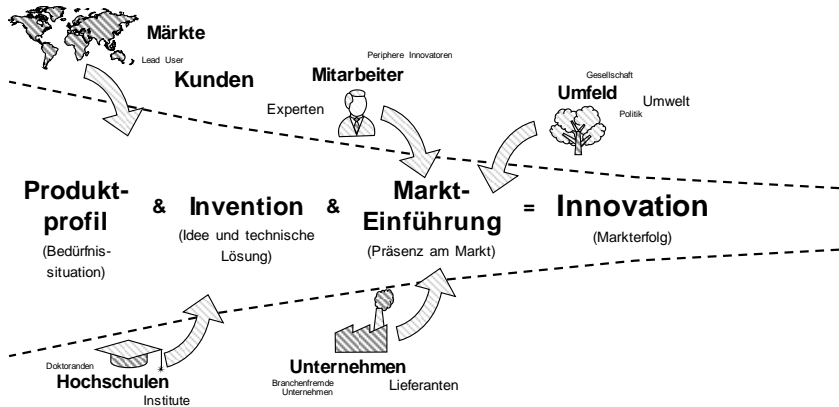


Abbildung 2.28: Innovationsverständnis nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018, S. 2)

validierter Produktprofile als Ausgangspunkt des Innovationsprozesses die Wahrscheinlichkeit für einen Markterfolg erhöht, sie diesen jedoch nicht garantieren kann.

Für Ponn & Lindemann (2011) stehen Kunden und Anwender ebenfalls im Zentrum der Anforderungserhebung zu Beginn eines Produktentwicklungsprojekts. Sie verweisen indes außerdem auf eine Reihe weiterer relevanter Quellen für Anforderungen an ein Produkt, deren Berücksichtigung sie einen Einfluss auf den Markterfolg zuschreiben (vgl. Abbildung 2.29). Die Erhebung von Anforderungen von Kunden und Anwendern oder aus anderen unternehmensinternen und -externen Quellen ist dabei in der Praxis oft mit Herausforderungen verbunden. Ein Grund dafür ist, dass vielen Kunden und Anwendern die eigenen Anforderungen an ein Produkt oft gar nicht bewusst sind. Verworn & Herstatt (2007, S. 46) verweisen etwa darauf, dass sich Kunden häufig „derart an die Nutzung der aktuellen Produkte gewöhnt [haben], dass ihnen Verwendungsprobleme nicht mehr auffallen“. Oft können sie sich erst zu ihren unbewussten Bedürfnissen äußern, wenn sie mit einer alternativen Lösung konfrontiert werden. Diese fungiert dann als Kristallisationspunkt für sogenannte implizite oder latente Kundenwünsche (Ponn & Lindemann, 2011; Stolper, 2007; Verworn & Herstatt, 2007). Eine weitere Schwierigkeit bei der Erhebung von Anforderungen besteht darin, dass diese je nach Kundengruppe und Markt sehr unterschiedlich sein können und sich zudem mit der Zeit ändern (Matros, 2016; Ponn & Lindemann, 2011). Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen



Abbildung 2.29: Quellen für Anforderungen an ein Produkt nach Ponn & Lindemann (2011, S. 42)

werden in der industriellen Praxis der Produktentwicklung zu Beginn eines Produktentwicklungsprojekts zumeist mehrere lösungsoffene Produktprofile entwickelt. Erst im weiteren Projektverlauf wird die Menge alternativer Produktprofile auf Basis von Validierungsergebnissen sukzessive reduziert und die ausgewählten Produktprofile im Zuge der technischen Lösungsfindung weiter konkretisiert (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018).

In Praxis und Wissenschaft werden verschiedene Arten von Innovationen unterschieden. Utterback & Abernathy (1975) differenzieren zwischen *Produktinnovationen* (product innovations) und *Prozessinnovationen* (process innovations). Nach der Herkunft der Idee für eine Innovation unterscheidet Disselkamp (2012) zwischen einem *Technology Push*, bei dem die Idee aus der Forschung und Entwicklung stammt, und einem *Market Pull*, bei dem die Initiative für die Innovation vom Markt ausgeht. Eine weitere verbreitete Form der Klassifizierung von Innovationen basiert auf dem Grad der Veränderung der technischen Lösung. Diesem Ansatz folgend unterscheiden etwa Henderson & Clark (1990) zwischen folgenden Innovationsarten:

- „*Inkrementelle Innovationen* entstehen durch geringfügige Änderungen an Komponenten und ihren Beziehungen. Durch den kleinen Änderungsumfang lassen sich inkrementelle Innovationen gut planen und steuern. Daher besteht häufig nur ein geringes technisches und ökonomisches Risiko. Gleichzeitig ist auch das wirtschaftliche Potenzial tendenziell kleiner.“ (zit. nach Bursac, 2016, S. 35)

- „*Architekturelle Innovationen* entstehen durch eine Neukonfiguration von bekannten und etablierten Funktionseinheiten. Sie bergen wirtschaftliche Potenziale bei moderaten technischen Risiken.“ (zit. nach Bursac, 2016, S. 36)
- „*Modulare Innovationen* entstehen durch den Austausch einzelner Subsysteme, wobei die grundsätzliche Systemstruktur erhalten bleibt. Ökonomisch bieten sie erhöhte Potenziale, sind jedoch auch mit erhöhten Risiken verbunden.“ (zit. nach Bursac, 2016, S. 36)
- „*Radikale Innovationen* entstehen durch die Entwicklung einer neuen Systemstruktur bei gleichzeitiger Neuentwicklung von Subsystemen. Da hierbei kaum Wissen von vorhandenen Produkten genutzt werden kann, ergibt sich ein unsicherheitsbehafteter und riskanter Entwicklungsprozess. Bei erfolgreicher Markteinführung kann eine Alleinstellung auf dem Markt erreicht werden, wodurch hohe ökonomische Potenziale erschlossen werden können.“ (zit. nach Bursac, 2016, S. 36)

Albers, Bursac & Wintergerst (2015) merken an, dass die von Henderson & Clark beschriebene Klassifizierung von Innovationen nur retrospektiv vorgenommen werden kann. Zudem kritisieren sie, dass die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Innovationen häufig auf den Begriff der radikalen Innovationen fokussiert, während diese in der Praxis der Produktentwicklung nur sehr selten zu finden sind. Vielmehr werden „Produkte erst nach diversen Variationen über mehrere Produktgenerationen hinweg wirtschaftlich und technisch dahingehend entwickelt [...], dass sie erfolgreich auf dem Markt etabliert werden können“ (Bursac, 2016, S. 36). Diese Beobachtung ist auch Grundlage des von Wesner (1977) entwickelten Modells des Produktlebenszyklus, in dem er die verschiedenen Generationen eines Produkts innerhalb von Branchen- und Technologiezyklen verortet (vgl. Abbildung 2.30).

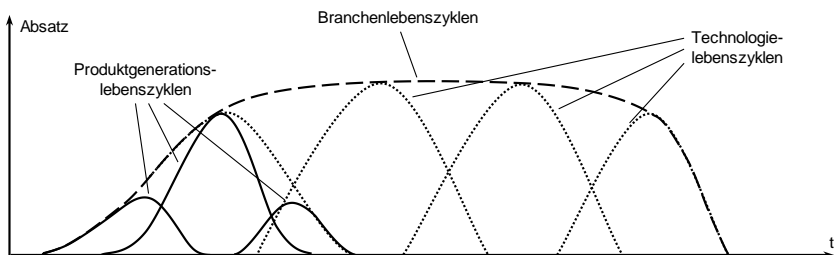


Abbildung 2.30: Modell des Produktlebenszyklus nach Wesner (1977) zit. nach Albers, Bursac & Wintergerst (2015, S. 3)

2.2.2 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Eng verbunden mit der Klassifizierung von Innovationen nach dem Grad der Veränderung der technischen Lösung ist die in der klassischen Konstruktionsmethodik verbreitete Unterscheidung zwischen den drei Konstruktionsarten der Neukonstruktion, der Anpassungskonstruktion und der Variantenkonstruktion (Pahl et al., 2007):

- Eine *Neukonstruktion* bezeichnet die Verwendung neuartiger technischer Lösungsprinzipien oder die erstmalige Kombination bekannter Lösungsprinzipien in einem neuen Kontext.
- Eine *Anpassungskonstruktion* beschreibt die Verwendung bekannter Lösungsprinzipien in einem neuen Kontext. Dabei wird die Gestalt des technischen Systems an die veränderten Randbedingungen angepasst.
- Eine *Variantenkonstruktion* liegt vor, wenn bekannte Lösungsprinzipien in ihrem originären Kontext eingesetzt werden und dabei lediglich einzelne Gestaltparameter des technischen Systems wie Größe oder Anordnung von Teilsystemen variiert werden.

In der Literatur wird häufig darauf verwiesen, dass reine Neukonstruktionen in der industriellen Praxis der Produktentwicklung sehr selten sind (Eckert et al., 2010). Stattdessen entstehen „die meisten Produkte [...] durch Modifikationen, wobei insbesondere bei komplexen Produkten zuverlässig funktionierende Komponenten und Teilsysteme soweit wie möglich übernommen werden, um den technischen Neuheitsgrad, potenzielle Risiken und erforderliche Investitionen z.B. in Produktionsmittel zu reduzieren“ (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Damit ergibt sich augenscheinlich ein Zielkonflikt zwischen der Verwendung bestehender technischer Lösungen aus Gründen der Risiko- und Investitionsreduktion auf der einen Seite und dem Streben nach möglichst weitreichenden Innovationen mit hohem Neuheitsgrad (Albers, Reiß, Bursac, Urbanec & Lüdcke, 2014). Albers, Bursac & Wintergerst (2015) führen mit dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung ein Beschreibungsmodell der Produktentwicklung ein, das diesen Zielkonflikt auflöst, indem der Neuheitsgrad von Produkten nicht länger auf der Gesamtproduktebene sondern differenziert nach Teilsystemen beschrieben wird. Albers, Bursac & Wintergerst (2015, S. 4) definierten die Produktgenerationsentwicklung dabei wie folgt:

„Als Produktgenerationsentwicklung wird die Entwicklung technischer Produkte verstanden, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation (ÜV) als auch durch eine Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. [...] Die Anteile technischer Neuentwicklungen einzelner Funktionseinheiten können sowohl durch die Aktivität Gestaltvariation (GV) als auch durch die [...] Aktivität Prinzipvariation (PV) [...] erfolgen. Neue Produktgenerationen basieren immer auf [Referenzsystemen].“

Das Modell der PGE fußt damit auf zwei grundlegenden Hypothesen. Die erste Hypothese besagt, dass die Entwicklung jeder neuen Produktgeneration auf Basis verschiedener Referenzen erfolgt, die zusammen das sogenannte Referenzsystem bilden. Nach der zweiten Hypothese ist jeder Produktentwicklungsprozess durch die systematische Kombination der drei Variationsarten Übernahmevariation (Übernahme einzelner Teilsysteme des Referenzsystems), Gestaltvariation (Anpassung der Gestalt der Teilsysteme) und Prinzipvariation (Anpassung des Wirkprinzips der Teilsysteme) gekennzeichnet. Albers, Bursac & Wintergerst (2015, S. 4–5) weisen dabei darauf hin, dass die Gestaltvariation die häufigste Aktivität der Produktentwicklung und entgegen verbreiteter Annahmen „ebenfalls ein hochgradig kreativer und komplexer Vorgang“ ist. Albers et al. (2020) übertragen das Verständnis der drei Variationsarten im Modell der PGE ferner von der physischen Produktstruktur eines technischen Systems auf dessen Funktions- und Eigenschaftsstruktur. Demnach lassen sich auch Variationen von Funktionen und lösungsoffenen Eigenschaften auf eine der drei Variationsarten zurückführen. Für diesen Fall schlagen sie anstelle des spezifischen Begriffs der Gestaltvariation die Verwendung des allgemeineren Begriffs der Ausprägungsvariation vor. (Albers, Rapp et al., 2019; Albers et al., 2020)

Als Elemente des Referenzsystems kommen nach Albers, Rapp et al. (2019) verschiedenste Artefakte infrage, die als Ausgangspunkt der Entwicklung einer neuen Produktgeneration dienen. Dazu zählen etwa Patente, gesetzliche Vorgaben, Produktprofile oder Technologien. Ein zentraler Bestandteil des Referenzsystems sind sogenannte Referenzprodukte. Darunter werden bestehende Produkte wie etwa Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte verstanden, „auf deren Basis neue Produktgenerationen entwickelt werden und deren Struktur in großen Teilen übernommen [oder als Basis für Variationen zugrunde gelegt] wird“ (Bursac, 2016, S. 38). Grundsätzlich lässt sich dabei zwischen internen und externen Referenzprodukten unterscheiden (Albers, Heitger et al., 2018). Während erstere aus demselben Unternehmen stammen, haben letztere ihren Ursprung außerhalb der Organisation.

Referenzprodukte können zum einen als Grundlage für die technische Lösungsfindung herangezogen werden, indem etwa Teile der Bau- oder Funktionsstruktur übernommen werden. Zum anderen können sie auch im Kontext der Zielsystembildung zum Einsatz kommen, wenn Ziele und Anforderungen einer Produktgeneration relativ zum Referenzprodukt formuliert werden. Dies ist etwa häufig im Zusammenhang mit der angestrebten Differenzierung von Wettbewerbsprodukten oder der Abgrenzung von Vorgängerprodukten der Fall. (Albers, Haug et al., 2016; Heitger, 2019)

Albers, Bursac & Rapp (2017) stellen fest, dass sich der dem Modell der PGE zugrundeliegende Beschreibungsansatz auch auf das iterative Vorgehen innerhalb des Entwicklungsprozesses einer einzelnen Produktgeneration übertragen lässt. Demnach lassen sich die verschiedenen Reifegradstufen, die im Zuge der Produktentwicklung erreicht werden, wiederum als eine Abfolge von Generationen beschreiben. Sie sprechen in diesem Zusammenhang von sogenannten Entwicklungsgenerationen einer Produktgeneration (vgl. Abbildung 2.31).

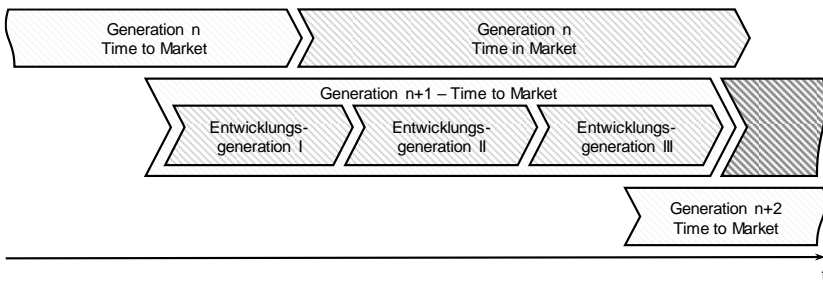


Abbildung 2.31: Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers, Bursac & Rapp (2017, S. 29)

Albers, Bursac & Wintergerst (2015) führen zudem eine einheitliche mathematische Nomenklatur zur Bezeichnung und Unterscheidung von Produktgenerationen ein. Diese lassen sich demnach bezeichnen als:

$$G_i, i \in \mathbb{N} \tag{2}$$

G_1 bezeichnet dabei die erste Produktgeneration ohne direkten Vorgänger. G_n steht im Modell der PGE für diejenige Produktgeneration, die sich aktuell in der Entwicklung befindet. Folglich bezeichnet G_{n-1} die aktuell im Markt befindliche Produktgeneration (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Weiterhin gilt:

$$G_n = \dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n \quad (3)$$

Demnach kann eine Produktgeneration G_n als Vereinigung der Menge $\dot{U}S_n$ der Teilsysteme, die durch Übernahmevariation entstanden sind, der Menge GS_n der Teilsysteme, die durch Gestaltvariation entstanden sind, sowie der Menge PS_n der Teilsysteme, die durch Prinzipvariation entstanden sind, verstanden werden. Die Anteile $\delta_{\dot{U}S_n}$, δ_{GS_n} und δ_{PS_n} der Teilsysteme am Gesamtsystem, die durch eine der drei Variationsarten entstanden sind, ergeben sich dementsprechend wie folgt:

$$\delta_{\dot{U}S_n} = \frac{|\dot{U}S_n|}{|G_n|} = \frac{|\dot{U}S_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad (4)$$

$$\delta_{GS_n} = \frac{|GS_n|}{|G_n|} = \frac{|GS_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad (5)$$

$$\delta_{PS_n} = \frac{|PS_n|}{|G_n|} = \frac{|PS_n|}{|\dot{U}S_n \cup GS_n \cup PS_n|} \quad (6)$$

Albers, Bursac & Rapp (2017) belegen anhand zahlreicher Beispiele die Relevanz des Modells der PGE als Beschreibungsmodell für die praktische Produktentwicklung. Exemplarisch führen sie dazu verschiedene Reihen realer Produktgenerationen an (ICE-Züge der Deutschen Bahn, PKW der Marken BMW und Mercedes, Druckmaschinen des Herstellers Heidelberger Druckmaschinen). Zudem zeigen sie in einer detaillierten Fallstudie die aufeinanderfolgenden Produktgenerationen des Zweimassenschwungrads der Schaeffler-Gruppe auf (vgl. Abbildung 2.32).

Das empirisch und wissenschaftlich fundierte Modell der PGE eignet sich als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Methoden und Verfahren, die auf den Gedanken der Produktgenerationsentwicklung aufbauen und der Unterstützung der Produktentwicklung und insbesondere der Abschätzung und Steuerung des Entwicklungsrisikos sowie des Innovationspotenzials dienen. Dies gilt insbesondere auch für Methoden zur Unterstützung der Produktvalidierung. So lassen sich etwa ähnliche Referenzprodukte zur Validierung bestimmter Eigenschaften neuer Produktgenerationen heranziehen, um fehlenden Prototypen in frühen Entwicklungsphasen abzuhelpfen. Ein entsprechender Ansatz auf Basis des Modells der PGE wird von Klingler (2016) beschrieben. (Albers, Behrendt et al., 2016; Klingler, 2016)

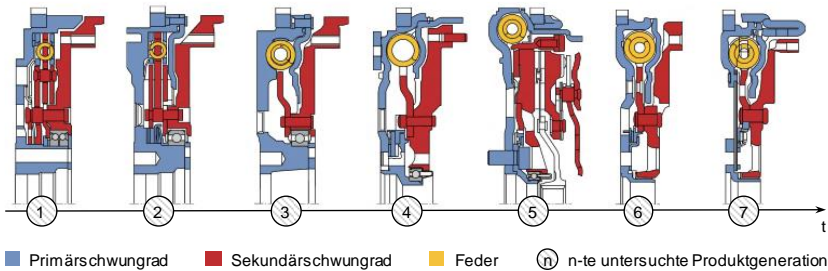


Abbildung 2.32: Produktgenerationen am Beispiel des Zweimassenschwungrads nach Albers, Bursac & Rapp (2017, S. 22)

2.2.3 Frühe Phase der Produktentwicklung

Der sogenannten Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses wird in der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit der Produktentwicklung eine besondere Rolle zugesprochen. Viele Autoren betonen dabei die entscheidende Bedeutung der in dieser Phase getroffenen Entscheidungen für den späteren Markterfolg eines Produkts (Cooper & Kleinschmidt, 1993). Als Ursache dafür wird die starke Hebelwirkung der Frühen Phase auf die nachgelagerten Prozesse angeführt (Verwon & Herstatt, 2007). Sie ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass in dieser Phase die initialen Ziele eines Produktentwicklungsprojekts und damit auch die Ausrichtung der Entwicklungsaktivitäten festgelegt werden (Heitger, 2019). Albers, Rapp, Birk & Bursac (2017, S. 1) sprechen den Entscheidungen in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses daher einen „weitreichenden Einfluss auf die nachgelagerten Prozess- und zukünftigen Produkteigenschaften wie beispielsweise Entwicklungszeit, Kosten und Qualität“ zu.

Grabowski & Geiger (1997) weisen darauf hin, dass der Möglichkeit der Einflussnahme auf Produkt- und Prozesseigenschaften in der Frühen Phase jedoch in der Regel die fehlende Möglichkeit zur Beurteilung der Auswirkungen der getroffenen Entscheidungen gegenübersteht. In späteren Entwicklungsphasen kehrt sich dieses Verhältnis um, sodass dann zwar Auswirkungen beurteilt werden können, jedoch deutlich weniger Einflussmöglichkeiten bestehen. Grabowski & Geiger sprechen in diesem Zusammenhang vom Paradox der Produktentwicklung. Ehrlenspiel & Meer-kamm (2013) illustrieren dieses Paradox anhand der Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und -beurteilung (vgl. Abbildung 2.33). (Grabowski & Geiger, 1997)

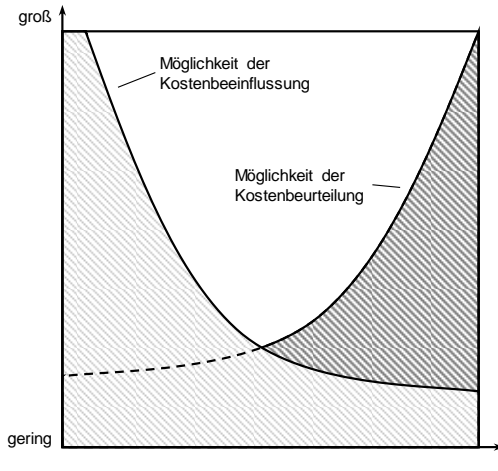


Abbildung 2.33: Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und -beurteilung im Produktentwicklungsprozess nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2013, S. 668)

Neben den weitreichenden Auswirkungen auf Prozess- und Produkteigenschaften lassen sich die Besonderheiten der Frühen Phase anhand weiterer Charakteristika beschreiben. Dazu zählt unter anderem die geringe Strukturierung und Formalisierung sowie das hohe Maß an Unsicherheit (vgl. Kapitel 2.3.1), das mitunter dazu führt, dass falsche Prämissen angenommen werden (Muschik, 2011; Verworn & Herstatt, 2007; Weck, Eckert & Clarkson, 2007). Auch das geringe Maß an Aufmerksamkeit und Einflussnahme durch das Top-Management werden als kennzeichnend für diese Phase des Produktentwicklungsprozesses genannt (Wheelwright & Clark, 1995). Verworn & Herstatt (2007) fassen diese und weitere Charakteristika der Frühen Phase basierend auf einer Literaturrecherche zusammen (vgl. Tabelle 2.9).

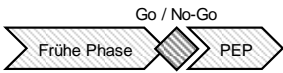
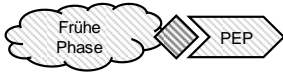
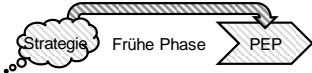
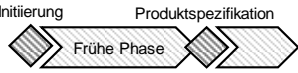
Tabelle 2.9: Charakteristika der Frühen Phase von Produktentwicklungsprozessen nach Verworn & Herstatt (2007, S. 13)

<i>Charakteristika der Frühen Phase</i>	<i>Ausprägung</i>
Auswirkungen auf den weiteren Prozess und das Ergebnis	Hoch
Strukturierung und Formalisierung	Gering
Unsicherheit	Hoch

<i>Charakteristika der Frühen Phase</i>	<i>Ausprägung</i>
Top-Management-Unterstützung	Gering
Kommunikation	Informell
Schnittstellen zwischen Aufgaben- und Funktionsbereichen	Unklar
Art des Wissens in Informationsprozessen	Implizit
Dokumentationsgrad	Gering
Ressourceneinsatz und -verfügbarkeit	Gering

Über die Charakterisierung anhand inhaltlicher Kriterien hinaus, grenzen verschiedene Autoren die Frühe Phase nach ihrer zeitlichen Stellung im Produktentwicklungsprozess ab. Bursac (2016) gibt einen Überblick über entsprechende Definitionen der Frühen Phase (vgl. Tabelle 2.10). Die Abgrenzung der Frühen Phase erfolgt in diesen Definitionen vielfach anhand der finalen Entscheidung über die Durchführung eines Entwicklungsprojekts, die am Ende der Frühen Phase getroffen wird, und den damit verbundenen Übergang in einen formalen und strukturierten Produktentwicklungsprozess. Demnach sind die wesentlichen Aktivitäten der Frühen Phase die Generierung von Ideen sowie deren Bewertung. Das Bewertungsergebnis dient dabei als Grundlage für die anschließende Entscheidung über die Projektdurchführung. (Bursac, 2016; Cooper & Kleinschmidt, 1993; Khurana & Rosenthal, 1998; Verwon & Herstatt, 2007)

Tabelle 2.10: Ansätze zur zeitlichen Abgrenzung der Frühen Phase nach Bursac (2016, S. 44)

<i>Autor</i>	<i>Spezifikum</i>	<i>Visualisierung</i>
Khurana & Rosenthal (1998)	Finanzierung und Start der Produktentwicklung auf Basis einer „Go / No-Go“ Entscheidung	
Koen et al. (2001)	Alle Aktivitäten vor dem Beginn des formalen und strukturierten Produktentwicklungsprozesses	
Jetter (2005)	Brücke zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung	
Muschik (2011)	Zeitraum von der Initiierung eines Projektes bis zur Formulierung einer ersten Produktspezifikation	

Die in der Literatur angeführten Definitionen ermöglichen oft keine eindeutige zeitliche Abgrenzung der Frühen Phase, zumal die Kriterien für die zum Ende der Phase vorgenommene Bewertung unspezifisch bleiben. Anhand des Modells der PGE lassen sich die Bewertungskriterien und damit auch die zeitliche Abgrenzung der Frühen Phase konkretisieren. Albers, Rapp et al. (2017, S. 4) definieren dazu die Frühe Phase im Modell der PGE¹ wie folgt:

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

Albers, Rapp et al. (2017) weisen zudem darauf hin, dass sich für die Bewertung der Produktspezifikation am Ende der Frühen Phase die Potenziale der Produktgenerationsentwicklung nutzen lassen, indem die Bewertung an einem Referenzprodukt oder einem Prototypen mit hohem Übernahmevariationsanteil vorgenommen wird. Außerdem diskutieren sie den Begriff der Frühen Phase im Zusammenhang mit Vorentwicklungs- oder Forschungsprojekten, die in der industriellen Praxis der Produktentwicklung häufig der Entwicklung einer neuen Produktgeneration vorausgehen, um etwa eine projektübergreifend relevante Technologie zu entwickeln (Heismann & Maul, 2012). Vorentwicklungsprojekte können dabei als eigene Entwicklungsprojekte verstanden werden, die ebenfalls eine Frühe Phase durchlaufen. Das führt dazu, „dass es im Rahmen des Vorentwicklungsprojekts einzelne Phasen gibt [...], die nicht als Frühe Phase bezeichnet werden, [da sie nicht deren Spezifika erfüllen,] obwohl sie zeitlich gesehen früher als die Frühe Phase der neuen Produktgeneration liegen“ (Bursac, 2016, S. 46). Die Verortung der Frühen Phase im Modell

¹ Im Folgenden wird im Sinne einer besseren Lesbarkeit die Bezeichnung *Frühe Phase* als Synonym für den konkreten Begriff der *Frühen Phase im Modell der PGE* verwendet.

der PGE im Zusammenhang mit Vorentwicklungsprojekten ist in Abbildung 2.34 schematisch dargestellt.

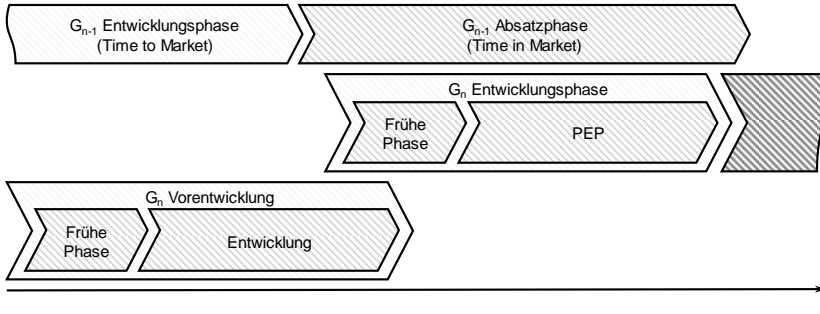


Abbildung 2.34: Schematische Darstellung der Frühen Phase im Modell der PGE im Zusammenhang mit Vorentwicklungsprojekten nach Bursac (2016, S. 46), zit. nach Heitger (2019, S. 49)

2.2.4 Agile Ansätze in der Produktgenerationsentwicklung

Mit dem Scrum-Ansatz wurde in Kapitel 2.1.4.4 ein Vorgehensmodell vorgestellt, das die grundlegenden Charakteristika der agilen Produktentwicklung operationalisiert. Zu diesen Charakteristika zählt insbesondere ein schnelles, iteratives Vorgehen, das darauf abzielt, durch die kontinuierliche Entwicklung und Validierung von Produktinkrementen die Kunden- und Anwenderanforderungen an ein Produkt schrittweise zu ermitteln und so sukzessive die Unsicherheit im Entwicklungsprozess zu reduzieren. Die damit einhergehende konsequente Ausrichtung der Produktentwicklung an den Bedürfnissen von Kunden und Anwendern sowie die Fokussierung auf die Interaktion im Team anstatt auf standardisierte Prozessabläufe stellen weitere kennzeichnende Merkmale einer agilen Produktentwicklung dar. (Batra, Xia, VanderMeer & Dutta, 2010; Highsmith, 2010; Moe, Dingsøyr & Dybå, 2010; Reiß, 2018; Soundararajan & Arthur, 2011)

Ein agiles Entwicklungsvorgehen eignet sich damit insbesondere für Entwicklungssituationen, die durch ein hohes Maß an Unsicherheit infolge unbekannter Kunden- und Anwenderanforderungen gekennzeichnet sind. Auch komplexe Entwicklungssituationen mit einer Vielzahl dynamischer Abhängigkeiten, die sich nur schwer mit-

hilfe formalisierter, sequenzieller Prozessabläufe erfassen lassen, bieten besonderes Potenzial für agile Ansätze. Derartig ausgeprägte Entwicklungssituationen sind kennzeichnend für die Frühe Phase von Entwicklungsprozessen (vgl. Kapitel 2.2.3), weswegen der Einsatz agiler Methoden insbesondere in deren Kontext empfohlen wird. (Bender, 2004; Reiß, 2018)

Die Entwicklung mechatronischer Produkte gilt nicht zuletzt aufgrund der hohen Interdisziplinarität der Entwicklungsteams als hochgradig komplex (Ehrlenspiel & Meerckamm, 2013; Haberfellner et al., 2012). Gerade die Frühe Phase des Entwicklungsprozesses ist auch hier oft durch eine hohe Unsicherheit gekennzeichnet (Albers, Muschik & Ebel, 2010). Als Ansatz zum Umgang mit Komplexität und Unsicherheit finden agile Ansätze, die in ihrer Mehrzahl ursprünglich aus der Softwareentwicklung stammen, daher inzwischen auch in der Mechatroniksystementwicklung Anwendung (Kim, 2013; Reiß, 2018). Reiß (2018) nennt unter Verweis auf verschiedene weitere Autoren jedoch eine Reihe von Randbedingungen, die insbesondere in der Entwicklung mechatronischer Systeme häufig auftreten und den Einsatz agiler Ansätze dort erschweren können:

- Die Entwicklung mechatronischer Systeme findet häufig in räumlich verteilten Teams statt, die sich in diesem Fall nicht täglich abstimmen können. Dies gilt insbesondere, wenn diese Teams in verschiedenen Zeitzonen arbeiten. (Ovesen & Dowlen, 2012)
- Experten für bestimmte Entwicklungsdisziplinen sind häufig nicht exklusiv einem Projekt zugeordnet und stehen dem Projektteam daher nur eingeschränkt zur Verfügung. (Schröder & Schrofner, 2015)
- Der direkte Kontakt zu Kunden und Anwendern ist etwa aus Gründen der Geheimhaltung oft nicht gegeben oder nicht möglich. Dies erschwert die Validierung der Produktinkremente. Die Unsicherheit bezüglich der Kunden- und Anwenderanforderungen bleibt bestehen. (Ovesen & Dowlen, 2012; Schmidt & Paetzold, 2017)
- Die Akzeptanz agiler Ansätze innerhalb der Organisation und im Management ist insbesondere bei Unternehmen der Mechatroniksystementwicklung mit einer langen Historie im Einsatz klassischer Vorgehensmodelle oft nicht gegeben. Es wird unterschätzt, dass es zur nachhaltigen Einführung agiler Methoden eines weitreichenden Kulturwandels und nicht allein geänderter Prozessabläufe bedarf. (Ovesen & Dowlen, 2012; Schein, 2010)
- Dem Entwicklungsteam wird in agilen Entwicklungsansätzen in der Regel die freie Auswahl unterstützender Methoden erlaubt. Dies steht im Widerspruch zu in der Mechatroniksystementwicklung verbreiteten Qualitätsstandards und Normen, die oft den Einsatz bestimmter Methoden vorschreiben. (Albers, Behrendt et al., 2017; Gregory, Barroca, Taylor, Salah & Sharp, 2015)

- Bedingt durch das geringe Maß an Formalisierung kommt es in agilen Entwicklungsprozessen häufig zu unvorhersehbaren Situationen. Voraussetzung, um unter dem gegebenen Zeitdruck innerhalb eines Iterationszyklus eine situationsadäquate Lösung zu finden, ist die leichte Zugänglichkeit von unterstützenden Methoden für das Projektteam. Die hohe Anzahl und Varianz von Entwicklungsmethoden in der Mechatroniksystementwicklung erschwert oft einen solchen Zugang. (Heimicke et al., 2018; Highsmith, 2010; Reiß, Albers & Bursac, 2017)
- Die Validierung eines Produktinkrements zum Ende eines jeden Iterationszyklus erfordert in der Mechatroniksystementwicklung häufig den Einsatz physischer Prototypen, deren Aufbau mit einem signifikanten zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden ist und unter den in der Regel gegebenen Ressourcenbeschränkungen nur bedingt abzubilden ist. Darüber hinaus lassen sich einzelne Aspekte eines Produkts wie einzelne Funktionen oder Eigenschaften, deren Entwicklung im Rahmen eines agilen Iterationszyklus im Fokus steht, oft nicht isoliert und losgelöst vom Gesamtsystem validieren, wie es mitunter in der Softwareentwicklung mit einzelnen Softwarebestandteilen möglich ist. (Gloger, 2016; Schmidt & Paetzold, 2016)
- Die Entwicklung mechatronischer Systeme geht stets einher mit der Entwicklung eines dazugehörigen Produktions- und Validierungssystems. Aufgrund vielfältiger Abhängigkeiten müssen die Entwicklungsprozesse zwingend im Zusammenhang betrachtet werden. Bestehende agile Ansätze leisten in der Regel nicht die dafür notwendige ganzheitliche Betrachtung. (Albers, Behrendt et al., 2017; Conforto, Salum, Amaral, da Silva & Almeida, 2014)
- Mechatronische Produkte werden entsprechend des Modells der PGE auf Basis von Referenzsystemen entwickelt (vgl. Kapitel 2.2.2). Vielen agilen Ansätzen liegt jedoch vielmehr die implizite Annahme zugrunde, Produkte würden „auf einem weißen Blatt Papier entwickelt“ (Reiß, 2018, S. 42). Bestehende agile Ansätze nutzen demnach nicht die Potenziale einer bewussten Produktgenerationsentwicklung etwa zur Risikosteuerung oder in der Validierung. (Albers, Rapp et al., 2017; Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019)

Auch Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019) betonen die mitunter existierenden Schwierigkeiten bei der Anwendung bestehender agilen Ansätze in der Entwicklung mechatronischer Systeme. Sie führen darüber hinaus aus, dass komplexe und unsicherheitsbehaftete Entwicklungssituationen in der Mechatroniksystementwicklung zwar häufig auftreten, jedoch auch wenig komplexe Entwicklungssituationen existieren, die sich entlang bewährter sequenzieller Vorgehensmodelle mit einem höheren Strukturierungs- und Formalisierungsgrad besser lösen lassen. Ausgehend von dieser Beobachtung entwickeln sie mit dem sogenannten ASD – Agile Systems Design Ansatz, einen agilen Entwicklungsansatz, der den „Bedarfen

der Mechatroniksystementwicklung gerecht werden“ (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019, S. 7) soll und explizit auf dem im Modell der PGE formulierten Verständnis der Produktentwicklung aufbaut. (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019)

Kern des Ansatzes ist ein Modell zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der Bestimmung eines situations- und bedarfsgerechten Maßes an Flexibilität und der davon abgeleiteten Auswahl geeigneter Entwicklungspraktiken wie etwa Methoden und Prozessen (vgl. Abbildung 2.35). Das Modell unterscheidet dabei zwischen vier verschiedenen Prozessebenen von der Mikro- bis zur Makroebene. Auf allen Ebenen besteht die Auswahl zwischen sequenziellen und iterativen Entwicklungspraktiken. Als Entscheidungskriterium wird dabei die sogenannte Planungsstabilität herangezogen. Die Planungsstabilität einer Entwicklungssituation geht auf den von Breitschuh et al. (2018) eingeführten Begriff der Entropie eines sozio-technischen Systems zurück und ist ein Maß für dessen Komplexität sowie die vorherrschende Unsicherheit. Als solches ist sie maßgeblich abgänglich vom Neuentwicklungsanteil des entwickelten Produkts. (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019)

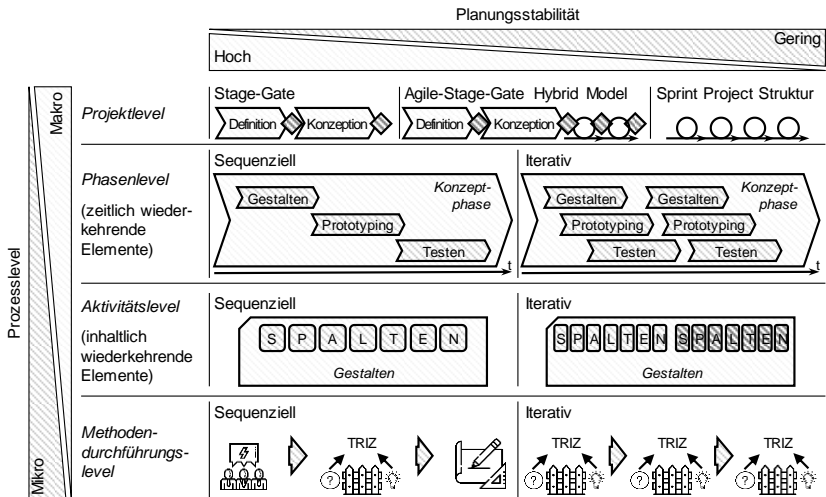


Abbildung 2.35: Modell zur Bestimmung eines situations- und bedarfsgerechten Maßes an Flexibilität im ASD-Ansatz nach Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019, S. 10)

Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019) formulieren für den ASD-Ansatz zudem neun Grundprinzipien, die zum einen als Zielsystem für die zur Auswahl gestellten und zum Teil noch zu entwickelnden Entwicklungspraktiken als auch als konkrete Orientierungshilfe für den Produktentwickler zur Ausrichtung seiner Handlungen im Entwicklungsprozess dienen. Tabelle 2.11 gibt einen Überblick über die Grundprinzipien des ASD – Agile Systems Design.

Tabelle 2.11: Grundprinzipien des Agile Systems Design nach Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al. (2019, S. 8–10)

<i>Grundprinzip</i>	<i>Beschreibung</i>
(1) Der Mensch steht im Zentrum der Produktentstehung	„Durch sein kreatives Schaffen ist der Entwickler für die Entwicklung erfolgreicher Produkte verantwortlich. Für eine bestmögliche Unterstützung des Entwicklers [...] müssen Prozesse und Methoden an seine Kreativität, Kompetenzen, Bedarfe und kognitiven Fähigkeiten angepasst werden.“
(2) Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell	„In der Praxis existieren keine zwei exakt gleichen Produktentwicklungsprojekte, da jedes Projekt innerhalb eines projektcharakteristischen Kontexts durchgeführt wird. [...] Prozesse und Methoden [müssen] an die jeweilige Situation angepasst werden.“
(3) Agile, situations- und bedarfsgerechte Kombination strukturierender und flexibler Elemente	„Durch ein situations- und bedarfsgerechtes Kombinieren strukturierender und flexibler Prozesselemente kann es Entwicklerteams gelingen, reaktionsfähig gegenüber Änderungen zu sein und zugleich fokussiert auf definierte Entwicklungsziele hin zu arbeiten.“
(4) Jedes Prozesselement lässt sich im ZHO-Modell verorten und jede Aktivität basiert auf den Grundoperatoren Analyse und Synthese	„Das klare Bewusstsein über eine treffliche Zuordnung verschiedener Elemente zum Systemtripel unterstützt Entwicklerteams beispielsweise bei der Identifikation des aktuell benötigten Wissens oder dem zielgerichteten Aufbau von Prototypen zu einem bestimmten Projektzeitpunkt.“
(5) Alle Aktivitäten der Produktentwicklung sind als Problemlösungsprozess zu verstehen	„Jede Aktivität der Produktentstehung [lässt sich als] Überführung des IST- in den SOLL-Zustand [verstehen]. Hierdurch wird es möglich, unterschiedlichen Kombinationen aus Produktentstehungs- und Problemlösungsaktivitäten geeignete Entwicklungsmethoden zuzuordnen.“

<i>Grundprinzip</i>	<i>Beschreibung</i>
(6) Jedes Produkt wird auf Basis von Referenzen entwickelt	„Der Neuentwicklungsanteil neuer Produktgenerationen muss zu Beginn eines Entwicklungsprojektes je nach avisierten Produktstrategie festgelegt werden, wobei die Nutzung der richtigen Referenzsystemelemente entscheidenden Einfluss auf Wettbewerbsvorteile hat.“
(7) Produktprofile, Invention und Markteinführung bilden die notwendigen Bestandteile des Innovationsprozesses	„Die Grundlage für die Entwicklung eines erfolgreichen Produkts ist die Identifikation der richtigen Bedarfssituation am zukünftigen Markt [im Produktprofil].“
(8) Frühe und kontinuierliche Validierung dient dem kontinuierlichen Abgleich zwischen Problem und dessen Lösung	„Die Validierung [ist] als fortlaufende Aktivität während der Produktentwicklung zu verstehen. [...] Es ist notwendig, bereits früh im Prozess generierte Objekte hinsichtlich der Erfüllung des Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens zu validieren.“
(9) Für eine situations- und bedarfsgerechte Unterstützung in jedem Entwicklungsvorhaben müssen Denkweisen, Methoden und Prozesse skalierbar sein	„Entwicklungsprozesse [müssen] hinsichtlich des jeweils vorliegenden Entwicklungskontexts und des angestrebten Entwicklungsziels skaliert werden, um Entwicklern in den verschiedenen Entwicklungssituationen ein situationsadäquates Agieren zu ermöglichen.“

2.2.5 Zwischenfazit

Der Erfolg eines Unternehmens ist maßgeblich von dessen Innovationsfähigkeit geprägt. Voraussetzung für das Innovationspotenzial eines Produkts ist die Identifikation der Bedürfnissituation aus Kunden-, Anwender- und Anbietersicht mithilfe des Produktprofils. Obwohl die wissenschaftliche Auseinandersetzung häufig auf sogenannte radikale Innovationen und die eng damit verbundenen Neukonstruktionen fokussiert, sind diese in der Praxis kaum anzutreffen. Vielmehr lässt sich beobachten, dass Produkte über mehrere Generationen hinweg zu am Markt etablierten Innovationen entwickelt werden. Albers liefert mit dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung ein empirisch und wissenschaftlich fundiertes Beschreibungsmodell des Produktentstehungsprozesses, das diesen Beobachtungen Rechnung trägt. Das Modell der PGE dient als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Steuerung des Entwicklungsrisikos sowie zur Unterstützung eines zielgerichteten Einsatzes von Referenzprodukten, etwa in der Produktvalidierung.

Mithilfe des Modells der PGE lässt sich außerdem das Verständnis der Frühen Phase von Produktentwicklungsprozessen konkretisieren, der aufgrund ihrer Bedeutung für den späteren Markterfolg eines Produkts eine besondere Rolle zugesprochen wird. Frühe Entwicklungsphasen sind gleichzeitig mit besonderen Herausforderungen verbunden. Sie zeichnen sich etwa durch ein hohes Maß an Unsicherheit infolge unbekannter Kunden- und Anwenderanforderungen und durch komplexe Entwicklungssituationen mit einer Vielzahl dynamischer Abhängigkeiten aus. Unsicherheit und Komplexität wird in der industriellen Praxis der Produktentwicklung vermehrt durch den Einsatz iterativer, agiler Entwicklungsansätze begegnet. Während diese Ansätze ihren Ursprung meist in der Softwareentwicklung haben, werden sie mittlerweile auch in der Entwicklung mechatronischer Systeme angewandt. Bei der Übertragung bestehender agiler Methoden auf die Mechatroniksystementwicklung kommt es in der Praxis jedoch zu Schwierigkeiten. Albers stellt daher mit dem ASD – Agile Systems Design Ansatz einen agilen Entwicklungsansatz vor, der den Bedarfen der Mechatroniksystementwicklung durch die Bestimmung eines situations- und bedarfsgerechten Maßes an Flexibilität gerecht wird.

2.3 Produktvalidierung

Anhand des erweiterten ZHO-Modells lässt sich die Produktentwicklung als wiederkehrende Abfolge von beliebig vielen Kurations- und Validierungsschritten beschreiben (vgl. Kapitel 2.1.4). Mit jedem Validierungsschritt findet dabei ein „Abgleich zwischen den Zielen und Zwecken des Produktes sowie dem jeweils erreichten Entwicklungsstand“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 541) statt, bevor auf Grundlage der Validierungsergebnisse ein neuer Kurationsschritt initiiert wird. Validierungsaktivitäten kommt so eine zentrale Rolle bei der Steuerung des gesamten Produktentstehungsprozesses zu (Albers, 2010). Sie tragen zudem maßgeblich zum Wissensgewinn und damit zur Reduktion von Unsicherheit in der Produktentwicklung bei. Der Wissens- und Unsicherheitsbegriff ist grundlegend für das Verständnis der Produktvalidierung. Beide werden in Kapitel 2.3.1 eingeführt. Eng mit der Produktvalidierung verbunden ist zudem der Begriff der Produktqualität, der in Kapitel 2.3.2 diskutiert wird. In Kapitel 2.3.3 werden die Aktivitäten im Zusammenhang mit der Produktvalidierung näher erläutert und in dem Zuge zudem eine Abgrenzung von der Verifikation vorgenommen. Kapitel 2.3.4 thematisiert die besondere Bedeutung früher und kontinuierlicher Validierungsaktivitäten für den Markterfolg eines Produktes.

Die Produktvalidierung unterliegt wie alle Aktivitäten der Produktentwicklung in der Regel Zeit- und Kostenrestriktionen, die ein effektives und zugleich effizientes Vor-

gehen erforderlich machen (Albers, Behrendt et al., 2016). Dazu existieren zur Unterstützung des Produktentwicklers verschiedene formalisierte Methoden und Modelle, denen zumeist ein systemtheoretisches Verständnis zugrunde liegt. Mit dem *IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz* wird in Kapitel 2.3.5 ein Ansatz zur durchgängigen methodischen Unterstützung und Beschreibung von Validierungsaktivitäten vorgestellt.

2.3.1 Wissen und Unsicherheit in der Produktentwicklung

North (2011, S. 37) definiert Wissen in Anlehnung an Probst & Deussen (1997) als „die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Personen zur Lösung von Problemen einsetzen“. Als subjektives Konstrukt ist Wissen dabei stets an einen Wissensträger gebunden und von dessen Interpretation auf Basis seiner kognitiven Fähigkeiten und seines Vorwissens abhängig (Albers & Braun, 2011b; Meboldt, 2008). Im Kontext der Produktentwicklung kommt der Ansammlung, Verbreitung und Anwendung von Wissen eine entscheidende Bedeutung zu. Nach Albers & Braun (2011b) haben sie wesentlichen Einfluss auf den Unternehmenserfolg.

Wissen wird im Produktentwicklungsprozess im Handlungssystem generiert. Dabei lässt sich grundsätzlich zwischen explizitem und implizitem Wissen unterscheiden. Während explizites Wissen in Form von kodifizierten Artefakten wie Dokumenten und Modellen vorkommt, die sich austauschen und weitergeben lassen, wird implizites Wissen unbewusst als Erfahrungswissen aufgebaut. Implizites Wissen lässt sich nicht weitergeben ohne es zuvor in explizites Wissen umzuwandeln. Mit entsprechenden Initiativen im Rahmen des sogenannten Wissensmanagements betreiben Unternehmen daher vielfach den Versuch der Explizierung des innerhalb der Organisation vorhandenen impliziten Wissens. (Albers & Braun, 2011b; Seiffert & Rainer, 2008)

Die Differenz zwischen dem benötigten und vorhandenen Wissen zur Lösung eines Problems wird als *Unsicherheit* bezeichnet (Galbraith, 1973). Ein mitunter hoher Grad an Unsicherheit ist ein kennzeichnendes Merkmal komplexer Produktentstehungsprozesse im Allgemeinen und deren Früher Phase im Besonderen (Albers, Rapp et al., 2017; Bursac, 2016; Ebel, 2015; Scherer, 2016; Verworn & Herstatt, 2007). Er hat zur Folge, dass weder das Produkt noch der Produktentwicklungsprozess vollständig prospektiv plan- und vorhersehbar sind. Zudem muss insbesondere in frühen Entwicklungsphasen mangels objektiver Informationen auf subjektive Bewertungen und Annahmen zurückgegriffen werden, die sich im weiteren Prozessverlauf als falsch erweisen können (Jeschke, Jakobs & Dröge, 2013). So kommt es während der Produktentwicklung mitunter zu häufigen Änderungen (Ebel, 2015).

Die prozessimmanente Unsicherheit in der Produktentwicklung lässt sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren (vgl. Tabelle 2.12). Nach Earl, Johnson & Eckert (2005) kann sich die Unsicherheit entweder auf die Produktbeschreibung (*uncertainties in the description*) oder die vorhandenen Daten (*uncertainties in the data*) beziehen. Die Autoren unterscheiden zudem zwischen bekannten Unsicherheiten (*known uncertainties*), die sich vorhersehen und auflösen lassen und unbekanntes Unsicherheiten (*unknown uncertainties*), bei denen dies nicht unmittelbar möglich ist. McManus & Hastings (2005) unterscheiden ferner zwischen Unsicherheiten, die aus einer Wissenslücke (*lack of knowledge*) oder einer Definitionslücke (*lack of definition*) entstehen. Albers et al. (2011) schließen hieraus auf ein Unsicherheitsdilemma, zumal das Schließen von Definitionslücken einerseits spezifisches Wissen erfordert und andererseits Definitionen nötig sind, um Wissen zielgerichtet zu generieren.

Tabelle 2.12: Ansätze zur Klassifizierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung

<i>Autor</i>	<i>Arten von Unsicherheit</i>
Earl et al. (2005)	<ul style="list-style-type: none">• Unsicherheit in der Produktbeschreibung, Unsicherheit in den vorhandenen Daten• Bekannte Unsicherheit, unbekanntes Unsicherheit
McManus & Hastings (2005)	<ul style="list-style-type: none">• Unsicherheit aus einer Wissenslücke, Unsicherheit aus einer Definitionslücke
Reichwald, Meyer, Engelmann & Walcher (2007)	<ul style="list-style-type: none">• Technologische Unsicherheit, marktliche Unsicherheit

In der Innovationstheorie werden Unsicherheiten nach ihrer Herkunft unterschieden. Reichwald et al. (2007) grenzen diesem Ansatz folgend *technologische Unsicherheiten* von *marktlichen Unsicherheiten* ab. Technologische Unsicherheiten bezeichnen dabei fehlendes Wissen in Bezug auf die technische Lösung und deren fertigungstechnische Umsetzbarkeit. Marktliche Unsicherheiten resultieren wiederum aus fehlendem Wissen in Bezug auf die Größe und Beschaffenheit des Zielmarktes sowie insbesondere die Bedürfnisse und Anforderungen der Kunden und Anwender des zu entwickelnden Produkts. (Freudenmann, 2014)

Im Umgang mit Unsicherheit lassen sich nach Neufville et al. (2004) grundsätzlich zwischen den zwei Strategien einer Verringerung der Unsicherheit und eines Schutzes des Systems unterscheiden. Während letztere Strategie darauf abzielt die Auswirkungen von Unsicherheit auf ein System zu reduzieren, hat die Verringerung von Unsicherheit zum Ziel problemrelevantes Wissen zu generieren, um so vorhandene

Wissenslücken zu schließen (Ebel, 2015). Verwon & Herstatt (2007) betonen die Bedeutung einer frühen Reduktion von Unsicherheit im Produktentwicklungsprozess für den Erfolg eines Entwicklungsprojekts. Albers (2010) sieht dabei eine kontinuierliche Validierung entlang des gesamten Entwicklungsprozesses als zentrale Aktivität für das Schließen von Wissenslücken und die Reduktion von marktlicher und technologischer Unsicherheit (vgl. Kapitel 2.3.4).

Die kontinuierliche Reduktion von Unsicherheit in der Produktentwicklung wird nach Lindemann & Lorenz (2008) von flexiblen Entwicklungsprozessen unterstützt, die Iterationen zulassen. Diese Auffassung entspricht dem Verständnis des erweiterten ZHO-Modells nach Albers (vgl. Kapitel 2.1.4). Demnach wird im Zuge der Produktentwicklung die Unsicherheit durch iterative Validierungsaktivitäten kontinuierlich reduziert und dabei sowohl das Zielsystem wie auch das Objektsystem erweitert und konkretisiert (Albers, Reiß et al., 2014; Albers, Revfi & Spadinger, 2018).

2.3.2 Produktqualität

Die Produktqualität macht als Bewertungskriterium die Entwicklungsergebnisse einer Beurteilung durch verschiedene Akteure im Entwicklungsprozess zugänglich und ist dadurch eng mit der Produktvalidierung verbunden (Freudenmann, 2014). In der Literatur existiert kein einheitliches Verständnis des Qualitätsbegriffs. Vielmehr finden sich eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen, was den vielschichtigen Betrachtungsschwerpunkten verschiedener Wissenschaftsdisziplinen geschuldet ist (Verma, 2012). Garvin nimmt eine Klassifizierung verschiedener Qualitätsansätze anhand von fünf Kategorien vor (vgl. Abbildung 2.36).

Der *transzendente Qualitätsansatz* (transcendent approach) entstammt den Geisteswissenschaften. Ihm liegt die Auffassung zugrunde, wonach Qualität als solche

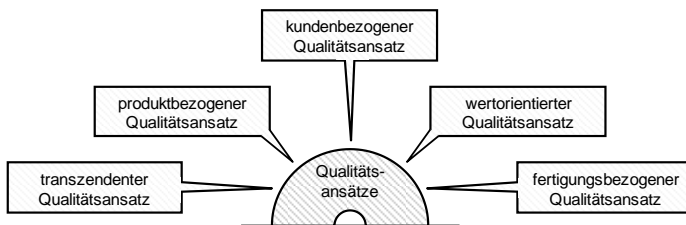


Abbildung 2.36: Unterschiedliche Qualitätsansätze nach Garvin (1984)

nicht objektiv zu erfassen und zu messen ist. Vielmehr ist sie Ausdruck des subjektiven Qualitätsempfindens des Betrachters. Die fehlende Messbarkeit der transzendenten Qualität begründet die eingeschränkte Eignung dieses Ansatzes zum Einsatz in der industriellen Praxis (Bergbauer & Grunwald, 1999). (Garvin, 1984)

Nach dem *produktbezogenen Ansatz* (product-based approach) lässt sich die Qualität eines Produkts auf die Präsenz einzelner Produkteigenschaften zurückführen, die konkret identifiziert und auf einer numerischen Skala in ihrer Ausprägung erfasst werden können. Demgemäß lässt sich die Qualität unterschiedlicher Produkte anhand des Umfangs messen, in dem sie die gewünschten Eigenschaften aufweisen. Dem produktbezogenen Qualitätsansatz liegt demnach ein objektives Qualitätsverständnis zugrunde, das sich nicht auf die subjektiven Präferenzen der Betrachter stützt. (Garvin, 1984)

Der *kundenbezogene Qualitätsansatz* (user-based approach) stellt die subjektiven Präferenzen der Betrachter in den Vordergrund der Qualitätsdefinition. Die Produktqualität drückt sich demnach durch den Grad der Erfüllung der Anforderungen von Kunden und Anwendern aus (Bauer, 2000). Diesem Verständnis folgend beschreiben Bauer, Hammerschmidt & Stokburger (2006) die Produktqualität als direkte Voraussetzung für die Kundenzufriedenheit. Anders als es bei der transzendenten Qualitätsdefinition der Fall ist, erheben kundenbezogene Ansätze Anspruch auf die Messbarkeit der Qualität. In der Praxis werden dazu verschiedene Ansätze der *Präferenzmessung* herangezogen (vgl. Kapitel 2.3.3.2). Katičić (2012) unterscheidet zwischen einer kognitiven und einer emotionalen Komponente der kundenbezogenen Produktqualität. Die kognitive Komponente ist „das Ergebnis eines kognitiven Vergleichs [...] der wahrgenommenen Ist- und der erwarteten Soll-Leistung“ (Katičić, 2012, S. 63) eines Produkts. Die emotionale Komponente ergibt sich hingegen aus dem mitunter unbewussten, affektiven Zustand bei der Exploration eines Produkts (Katičić, 2012). Die kognitive Qualitätskomponente wird in der Literatur auch als *pragmatische Qualität* bezeichnet, während für die emotionale Komponente der Begriff der *hedonischen Qualität* gebräuchlich ist (Hassenzahl, Burmester & Koller, 2003). (Garvin, 1984)

In der Qualitätsdefinition nach dem *wertorientierten Ansatz* (value-based approach) finden im Gegensatz zu den bisher diskutierten Ansätzen auch monetäre Werte Ausdruck (Fäth, 1998). Diesem Ansatz folgend ist die Qualität eines Produkts abhängig von der Relation der objektiven Eigenschaften und der subjektiven Wahrnehmung eines Produkts sowohl zu seinem Preis als auch zu den Kosten seiner Herstellung (Broh, 1982). Dementsprechend korrespondiert ein hohes Qualitätsniveau nach dem produkt- und kundenbezogenen Ansatz nicht automatisch auch mit

einer hohen wertorientierten Qualität. Vielmehr setzt letztere zudem einen als angemessen empfundenen Preis voraus, der wiederum der individuellen Einschätzung des Kunden unterliegt. (Garvin, 1984)

Der *fertigungsbezogene Qualitätsansatz* (manufacturing-based approach) folgt Qualitätsdefinitionen, wie sie verstärkt im produktionstechnischen Kontext Anwendung finden. Fertigungsbezogene Qualität ist hiernach gegeben, sobald ein hoher Grad an Übereinstimmung bestimmter Qualitätsmerkmale mit zuvor definierten Anforderungen erreicht ist (Garvin, 1984). Diese Auffassung von Qualität entspricht der Definition nach DIN EN ISO 9000 (2015). Der Norm zufolge versteht sich ein Qualitätsmerkmal als eine inhärente kennzeichnende Eigenschaft „eines Produkts, Prozesses oder Systems, das sich auf eine Anforderung bezieht“ (DIN EN ISO 9000, 2015, S. 26). Der Qualitätsbegriff bleibt demnach ausdrücklich nicht nur auf die Produktqualität beschränkt. Die Forderung nach Inhärenz der Merkmale, die zur Bewertung der Qualität herangezogen werden, impliziert, dass es sich um ständige „einer Einheit innewohnende“ (DIN EN ISO 9000, 2015, S. 18) Merkmale handelt. Qualitätsmerkmale können „*qualitativer* oder *quantitativer* Natur sein“ (DIN EN ISO 9000, 2015, S. 25) und daher beispielsweise sowohl physikalisch-geometrische oder auch ergonomische Aspekte beschreiben (DIN EN ISO 9000, 2015). Quantitative Merkmale lassen sich in ihrer Ausprägung auf einer numerischen Skala abbilden, während dies bei qualitativen Merkmalen nicht der Fall ist (Weckenmann & Werner, 2007). Nach DIN EN ISO 9000 werden sechs generische Klassen von Qualitätsmerkmalen unterschieden (vgl. Abbildung 2.37).

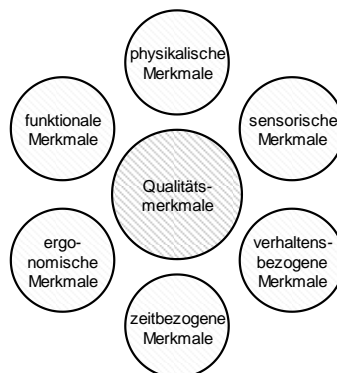


Abbildung 2.37: Klassen von Qualitätsmerkmalen nach DIN EN ISO 9000 (2015)

Das Verständnis von Produktqualität als Konformität der Spezifikationen nach dem fertigungsbezogenen Ansatz deckt sich nicht zwangsläufig mit dem Qualitätsurteil der Kunden und Anwender eines Produkts. Masing (2007) unterscheidet daher zwischen der Qualität im Innen- und Außenverhältnis. Im Außenverhältnis ist das Qualitätsverständnis geprägt durch die subjektiven Präferenzen der Kunden und Anwender. Diese Sichtweise kommt verstärkt im kundenbezogenen und im wertorientierten Qualitätsansatz zum Tragen. Dagegen wird Qualität im Innenverhältnis als eine objektive, produktinhärente Eigenschaft aufgefasst, was dem Verständnis des produkt- und fertigungsbezogenen Qualitätsansatzes entspricht. (Masing, 2007)

2.3.3 Validierung und Verifikation

Albers (2010) bezeichnet die Validierung als zentrale wissensgenerierende Aktivität im Produktentstehungsprozess. Er erläutert diese grundlegende Hypothese seiner Forschung anhand der Abgrenzung der beiden Aktivitäten Validierung und Verifikation. Während beiden Begriffen im allgemeinen Sprachgebrauch häufig ein ähnliches Verständnis zugrunde liegt, weisen Albers, Behrendt et al. (2016) auf deren unterschiedliche Bedeutung im Kontext der Produktentwicklung hin. Unter der Verifikation wird demnach in Anlehnung an VDI 2206 (2004) die Überprüfung verstanden, ob die Realisierung eines technischen Systems mit der zugrundeliegenden Spezifikation übereinstimmt. Übertragen auf das Verständnis des ZHO-Modells entspricht dies dem „Vergleich von Elementen des Objektsystems mit Elementen des Zielsystems [...], mit dem Ziel, deren Konformität zu beurteilen“ (Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger, 2015, S. 77). Im Zuge der Verifikation wird hingegen nicht überprüft, ob das technische System einen Nutzen für Kunden, Anwender oder Anbieter erfüllt und ob das definierte Zielsystem in seiner Ausprägung damit für diese Anspruchsgruppen überhaupt relevant ist. (Albers & Düser, 2011; Albers, Behrendt et al., 2016)

Die Validierung geht in diesem Punkt über die Verifikation hinaus. Sie prüft zudem den Nutzen einer Produkteigenschaft für die relevanten Anspruchsgruppen und damit die Gültigkeit des Zielsystems vor dem Hintergrund der Anforderungen von Kunden, Anwendern oder Anbietern. Nach der VDI 2206 (2004, S. 39) bezeichnet Validierung bezogen auf technische Systeme daher die „Prüfung [...], ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt“. Die Validierung beantwortet damit die Frage, ob das richtige Produkt entwickelt wird, während die Verifikation lediglich die Antwort auf die Frage liefert, ob ein korrektes Produkt entwickelt wird (VDI 2206, 2004). Daraus folgt, dass der formale Abgleich der technischen Lösung mit der Spezifikation für eine Aussage über die Validität eines

Produkts nicht ausreichend ist. Vielmehr muss das Produkt in seinem jeweils erreichten Entwicklungsstand „mit seinem künftigen Einsatz in Zusammenhang gesetzt werden“ (Klingler, 2016, S. 18). Dabei kommt der Berücksichtigung der Stakeholder eines Produkts eine große Bedeutung zu. Albers, Matros et al. (2015, S. 76) definieren die Stakeholder als diejenigen, die ein „berechtigtes Interesse an den Prozessen oder den Ergebnissen der Produktentwicklung [haben] und [...] ggf. über deren Erfolg oder Misserfolg [entscheiden]“. Neben dem Handlungssystem selbst zählen dazu insbesondere die Kunden und Anwender eines Produkts. (Albers & Düser, 2011; Albers, Behrendt et al., 2016)

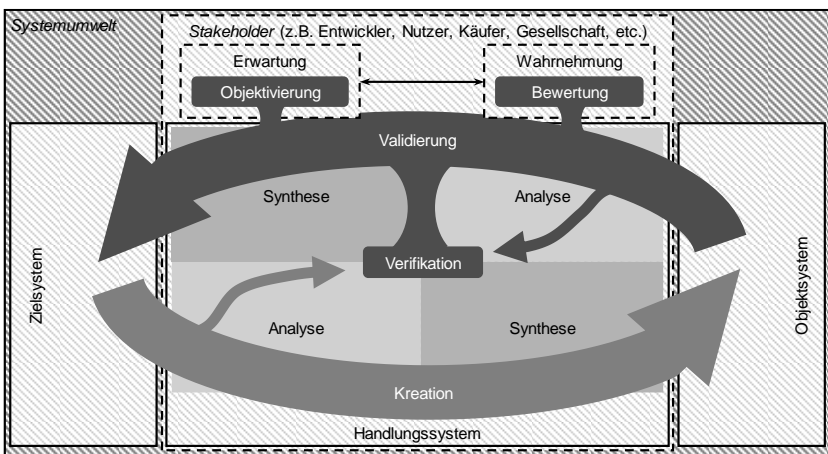


Abbildung 2.38: Validierung im System der Produktentstehung nach Albers, Behrendt et al. (2016, S. 545)

Um den Zusammenhang zwischen den Aktivitäten der Validierung und Verifikation, den Stakeholdern und weiteren handelnden Akteuren und Aktivitäten in der Produktentwicklung zu konkretisieren, ordnen Albers, Behrendt et al. (2016) diese in das iPeM und das erweiterte ZHO-Modell angelehnte System der Produktentstehung ein (vgl. Abbildung 2.38). Die Verifikation wird dabei als Teil der Validierung verstanden, die darüber hinaus noch die zwei Aktivitäten der Bewertung und der Objektivierung umfasst. Die Bewertung steht dabei für die „Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht [...] und erfolgt überwiegend subjektiv auf Basis persönlicher Empfindungen“ (Albers, Matros et al., 2015, S. 77).

Hassenzahl (2006) zufolge geht der Bewertung eines (interaktiven) Produkts durch einen Anwender das Wahrnehmen und Erleben des Produkts voraus. Er weist darauf hin, dass Menschen ein Produkt dabei zunächst als ein abstraktes Ganzes wahrnehmen und nicht als die differenzierte Summe einzelner Produktmerkmale. Weiter führt Hassenzahl aus, dass das Wahrnehmen eines Produkts etwa durch die unterbewusste Verknüpfung mit positiven oder negativen Assoziationen schon einen bewertenden Charakter hat. Die Bewertung des Produkts im direkten zeitlichen Zusammenhang mit der Wahrnehmung erfolgt jedoch implizit, während die Bewertung des Produkts im engeren Sinne stets zu einem expliziten Urteil führt. Das Erleben eines Produkts stellt das Wahrnehmen schließlich in einen situativen Kontext, der wie die Wahrnehmung selbst entscheidenden Einfluss auf die Bewertung hat. Produkte werden demnach nicht losgelöst von ihrer Systemumwelt bewertet. Ein Produkterlebnis ist vielmehr stark abhängig von den umgebenden Systemen und deren Merkmalsausprägungen, den psychologischen Zuständen des Anwenders oder weiteren anwesenden Personen, die in ihrer Kombination mit dem wahrgenommenen Produkt eine bestimmte (emotionale) Reaktion des Anwenders hervorrufen. (Hassenzahl, 2006)

Im Rahmen der Objektivierung als dritter Teilaktivität der Validierung werden die Validierungsergebnisse „in Form von neuen oder modifizierten Entwicklungszielen in das Zielsystem des Produktentwicklungsprozesses zurückgeführt“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 559). Dazu wird „einerseits überprüft, inwieweit Elemente des Zielsystems die Erwartungen der Stakeholder objektiv wiedergeben, andererseits werden Potenziale zur Erhöhung der Objektivität des Zielsystems identifiziert“ (Albers, Matros et al., 2015, S. 77).

Durch Bewertung und Objektivierung erfolgt damit ein Abgleich der Zielsystemelemente und der Entwicklungsstände mit den Erwartungen und Bedürfnissen der Stakeholder. Erst dadurch wird sichergestellt, „dass die technische Umsetzbarkeit gegeben ist und das spätere Produkt am Markt erfolgreich sein kann“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 545). Der Abgleich ist oft nur dann effektiv möglich, wenn die relevanten Stakeholder direkt in den Validierungsprozess eingebunden werden. Insbesondere bei der Validierung interaktiver Produkte kommt dabei der Einbindung von Kunden und Anwendern eine entscheidende Bedeutung zu. In der Literatur ist in diesem Zusammenhang der Begriff der Kundenintegration etabliert. Auf eine Differenzierung zwischen Kunden und Anwendern wird dabei häufig verzichtet, obwohl die Person des Kunden und damit auch der Kundennutzen eines Produkts nur in bestimmten Fällen mit der des Anwenders und dem entsprechenden Anwendernutzen übereinstimmt. Gleichwohl ist der Begriff der Anwenderintegration in der Literatur wenig etabliert. (Albers & Düser, 2011; Albers et al., 2014, 27.-28. Mai; Albers, Behrendt et al., 2016)

Die Bedeutung der Kundenintegration für aussagekräftige Validierungsergebnisse und damit für den Erfolg eines Entwicklungsprojekts wird in der Literatur von vielen Autoren hervorgehoben (Cooper, 1994; Gängl-Ehrenwerth, Faullant & Schwarz, 2013; Ponn & Lindemann, 2011). Insbesondere in der Frühen Phase bieten Ansätze zur Kundenintegration in die Produktvalidierung ein effektives Mittel zur Reduktion des initial oft hohen Grades marktlicher Unsicherheit (Gaubinger, Werani & Rabl, 2009). Kunden und Anwender lassen sich dabei sowohl direkt als auch indirekt einbeziehen (Heiss, 2009). Die direkte Einbindung in Validierungsaktivitäten erfolgt etwa im Rahmen von Konzept- oder Prototypentests mit repräsentativ ausgewählten Testkunden. Diese Form der direkten Kundenintegration in Validierungsaktivitäten wird auch als Kundentest bezeichnet (Rode, 2013). Für die indirekte Einbindung werden verschiedene Arten von Kundenersatzmodellen herangezogen, in denen Wissen über relevante Kundengruppen etwa aus Marktanalysen, Kundenbeobachtungen oder Kundenbefragungen zusammengefasst wird. Ansätze zur indirekten Kundenintegration minimieren das Risiko einer Kompromittierung proprietären Wissens, das mit dem direkten Zugang von Kunden zu laufenden Entwicklungsprojekten verbunden ist (Gängl-Ehrenwerth et al., 2013). Sie erlauben jedoch in der Regel keinen Zugang zu impliziten Kundenwünschen, zumal Kundenersatzmodelle auf der Grundlage bereits artikulierter Anforderungen und Bedürfnisse entstehen. Die direkte Konfrontation von realen Kunden und Anwendern mit Produktmodellen im Rahmen der Validierung kann hingegen als Kristallisationspunkt für implizite Kundenwünsche fungieren und die Probanden dazu befähigen implizites Wissen über ihre Bedürfnissituation zu explizieren. Dieses Phänomen ist insbesondere im Zusammenhang mit der Identifizierung von Begeisterungsmerkmalen (vgl. Kano-Modell in Kapitel 2.1.2.2) relevant. (Gängl-Ehrenwerth et al., 2013; Gaubinger et al., 2009; Heiss, 2009)

Aufgrund von Zeit- und Kostenrestriktionen, denen Produktentwicklungsprojekte in der industriellen Praxis in der Regel unterliegen, können Validierungsaktivitäten nicht mit beliebigem Aufwand betrieben werden und in beliebigem Umfang stattfinden (Albers, Behrendt et al., 2016). Im Sinne eines effizienten Vorgehens muss stattdessen abgewogen werden, welche Aspekte eines Entwicklungsstandes zu einem gegebenen Zeitpunkt bevorzugt validiert werden sollen. Für die Auswahl zu validierender Funktionen und Teilsysteme eines Produkts schlagen Albers, Klingler & Wagner (2014) eine Kritikalitätsbewertung anhand der drei Kriterien Bekanntheit des Anwendungsszenarios, Bekanntheit der Technologie und Auswirkung des Funktionsversagens vor (vgl. Abbildung 2.39).

Mit der Auswahl der zu validierenden Produkteigenschaften, Funktionen oder Teilsysteme erfolgt implizit die Festlegung des Validierungsziels, d.h. des spezifischen

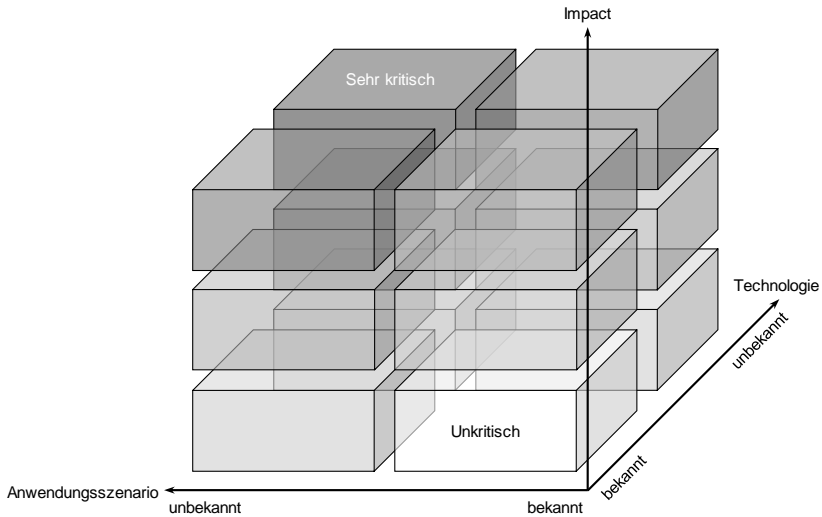


Abbildung 2.39: Kritikalitätsbewertung von Funktionen und Teilsystemen nach Albers, Klingler & Wagner (2014, S. 85)

Zwecks der Validierungsaktivität (Klingler, 2016). Die Durchführung der Validierungsaktivität zu einem Validierungsziel geschieht im Rahmen eines Tests. Ein Test „liefert Erkenntnisse über das [zu untersuchende] System, insbesondere ob das System zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt“ (Ebel, 2015, S. 136). Er umfasst dabei stets „einen Testfall, eine Testumgebung und eine Testinterpretation“ (Ebel, 2015, S. 136). Unter einem Testfall wird dabei „ein repräsentatives Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 554) verstanden. In der Regel gelingt es nicht die Gesamtheit aller späteren Anwendungen eines Produkts in einem Testfall abzudecken. In Abhängigkeit des Validierungsziels wird daher eine Auswahl relevanter, repräsentativer Anwendungen getroffen und in einem Testfall zusammengefasst. Testfälle verkürzen daher die gesamte Bandbreite der Produktanwendungen. (Albers, Behrendt et al., 2016; Ebel, 2015)

Zur Bezeichnung einer Testumgebung, die der Durchführung einer Validierungsaktivität dient, wird von Albers, Behrendt et al. (2016, S. 547) auch der spezifischere Begriff der Validierungsumgebung gebraucht. Sie definieren diese als „konkrete Ausprägung des Handlungssystems zur Validierung in Bezug auf Methoden und das

Ressourcensystem für eine oder mehrere Kombinationen aus einem Produkt, einem Punkt im Produktlebenszyklus und einem Validierungsziel“. Jede Validierungsumgebung ist wiederum Teil des Validierungssystems, welches die Gesamtheit aller entwickelten Systeme, Methoden und Prozesse zur Validierung eines Produkts umfasst (Albers, Mandel et al., 2018). Eine Validierungsumgebung stellt nach diesem Verständnis eine Auswahl der Elemente des Validierungssystems dar, die für die Erreichung eines bestimmten Validierungsziels benötigt werden. Validierungsumgebungen verfügen wiederum über mindestens eine sogenannte Validierungskonfiguration. Albers, Mandel et al. (2018) verstehen darunter eine spezifische Kombination von Methoden, Testfällen, Ressourcen und Parametrisierungen, die von einer Validierungsumgebung abgeleitet werden. (Albers, Mandel et al., 2018)

Die Testinterpretation ist der dritte immanente Bestandteil eines Tests. Nach Ebel (2015, S. 136) „überführt [sie] das in einem durchgeführten Testfall erfasste Systemverhalten in eine oder mehrere zugrundeliegende Systemeigenschaften und liefert Erkenntnisse über das System und den Test, insbesondere ob zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt werden“.

Da vollständige, ausgereifte Produkte während weiter Teile des Produktentwicklungsprozesses nicht zur Verfügung stehen, kommen im Rahmen der Validierung verkürzte Produktmodelle zum Einsatz (Albers & Düser, 2011). Eine zentrale Herausforderung von Validierungsaktivitäten besteht in der Überführung der für die Erfüllung eines Validierungsziels relevanten Produkteigenschaften in entsprechende Produktmodelle, sogenannte Prototypen (Stier, 2014). Mit dem Aufbau von Prototypen ist in der industriellen Praxis der Produktentwicklung oft ein signifikanter Aufwand verbunden. Gleichzeitig haben sie eine zentrale Bedeutung für die Wissensgenerierung im Rahmen von Validierungsaktivitäten. Die Rolle von Prototypen im Produktentwicklungsprozess wird im folgenden Kapitel 2.3.3.1 weiter diskutiert.

Ein häufig im Zuge der Produktvalidierung verfolgtes Validierungsziel liegt in der Ermittlung des Einflusses bestimmter Produkteigenschaften und deren Ausprägungen auf den Grad der Bedürfnisbefriedigung von Kunden und Anwendern und damit letztendlich auf deren zukünftige Kaufentscheidung. Tests, die für ein solches Validierungsziel durchgeführt werden, werden auch als Präferenzmessung bezeichnet (Steiner, 2007). Die Grundlagen der Präferenzmessung werden in Kapitel 2.3.3.2 diskutiert.

2.3.3.1 Prototypen in der Produktvalidierung

In Abhängigkeit des Validierungsziels müssen für die Durchführung von Tests im Rahmen von Validierungsaktivitäten geeignete Produktmodelle gewählt oder mitun-

ter auch speziell dafür entwickelt werden (Albers, Behrendt et al., 2016). Die verkürzten physischen oder virtuellen Produktmodelle, die bei der Validierung zum Einsatz kommen, werden als Prototypen bezeichnet. In der Literatur existiert zum Begriff des Prototyps kein einheitliches Verständnis. Manche Definitionen beschränken den Begriff lediglich auf physische Produktmodelle oder solche mit einem hohen Detaillierungsgrad, die in späteren Phasen des Produktentwicklungsprozesses vorliegen (Gebhardt, 2003). Eine weiter gefasste Definition liefern Kohler, Hochreuter, Diefenbach, Lenz & Hassenzahl (2013, S. 78), die einen Prototyp als ein physisches oder virtuelles Artefakt definieren, „das innerhalb eines [...] Entwicklungsprozesses erzeugt wird und eine Annäherung an das Endprodukt darstellt“. In ähnlicher Weise definiert die DIN EN ISO 9241-210 (2011, S. 6) einen Prototyp als die „Darstellung eines Teils oder eines gesamten interaktiven Systems, die, ggf. mit Einschränkungen, zur Analyse, Gestaltung und Bewertung verwendet werden kann“. Albers, Matros et al. (2014) zeigen am Beispiel eines Erlebnis-Prototyps für die Darstellung und Bewertung von Hybridantrieben, dass ein Prototyp in Form eines physischen, virtuellen oder gemischt physisch-virtuellen Produktmodells vorliegen kann.

Prototypen besitzen Modellcharakter und weisen damit nach Stachowiak (1973) ein Abbildungsmerkmal, ein Verkürzungsmerkmal sowie ein pragmatisches Merkmal auf (vgl. Kapitel 2.1.1.1). Prototypen stellen folglich ein vereinfachtes Abbild eines mitunter komplexen realen Produkts dar. Sie sind zudem stets an einen für sie vorgesehenen Zweck gebunden. Dieser Zweck bestimmt die Art der vorgenommenen Verkürzung des Prototyps im Vergleich zum vollständigen Produkt. Die Verkürzung dient damit nicht allein der Ressourcenersparnis bei der Erstellung des Prototyps, sondern auch der gezielten Anpassung an seinen Einsatzzweck (Kohler et al., 2013). Schork & Kirchner (2018) weisen dabei auf den Konflikt zwischen einer zu starken Verkürzung und einer zu hohen Komplexität eines Prototyps hin.

Das Verkürzungsmerkmal eines Prototyps äußert sich neben der Auswahl der von ihm abzubilden Teilsysteme, Funktionen, Merkmale und Eigenschaften eines Produkts auch in der Festlegung der Wiedergabetreue (eng. fidelity) des Prototyps, die dessen Ähnlichkeit mit dem späteren Endprodukt bezeichnet (Klingler, 2016; Türk, Leutenecker & Meboldt, 2014). Nach ihrer Wiedergabetreue lässt sich grundsätzlich zwischen sogenannten High-Fidelity-Prototypen, die dem Endprodukt sehr nahekommen und Low-Fidelity-Prototypen unterscheiden, die stark vom Endprodukt abstrahieren (Lim, Pangam, Periyasami & Aneja, 2006). Türk et al. (2014) differenzieren nach der Wiedergabetreue und dem Integrationsgrad der Produktfunktionen zwischen vier Klassen von Prototypen (vgl. Abbildung 2.40).

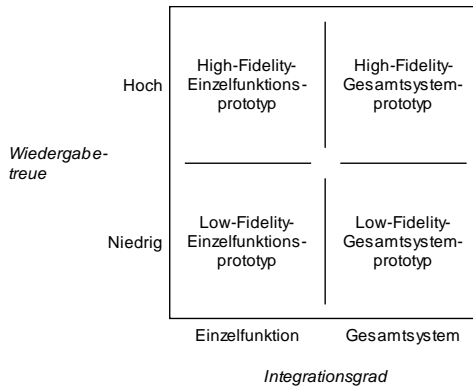


Abbildung 2.40: Klassifizierung von Prototypen nach Integrationsgrad und Wiedergabetreue nach Türk et al. (2014, S. 3)

McCurdy, Connors, Pyrzak, Kanefsky & Vera (2006) betonen, dass sich die Wiedergabetreue eines Prototyps nicht auf einen einzelnen Wert reduzieren lässt. Vielmehr kann ein Prototyp in einzelnen Aspekten eine höhere Wiedergabetreue aufweisen als in anderen Aspekten. McCurdy et al. (2006) sprechen in diesem Zusammenhang von der sogenannten Mixed Fidelity. Lim et al. (2006) entwickeln in Anlehnung an diese Erkenntnis eine Reihe von Dimensionen entlang derer sich die Wiedergabetreue eines Prototyps differenziert beschreiben lässt. Kohler et al. (2013) greifen diese Dimensionen für die Entwicklung des sogenannten Filter-Fidelity-Profiles auf. Das Filter-Fidelity-Profil ist eine grafische Darstellung der Wiedergabetreue eines Prototyps, die dafür differenziert entlang der verschiedenen Wiedergabedimensionen aufgetragen wird. Der Darstellung liegt eine Bewertung der Wiedergabetreue auf einer Skala von 1 bis 5 zugrunde. Ein Wert von 1 gibt an, dass ein Prototyp im Vergleich zum Endprodukt in der jeweiligen Dimension nicht ausgestaltet ist, während ein Wert von 5 für eine vollständige Ausgestaltung steht. Der Wert 0 zeigt an, dass eine bestimmte Wiedergabedimension in der Entwicklungssituation nicht relevant ist und daher keine Berücksichtigung findet. Abbildung 2.41 zeigt ein Filter-Fidelity-Profil für einen exemplarischen Prototypen. (Kohler et al., 2013; Reinemann, Fahl, Hirschter & Albers, 2019)

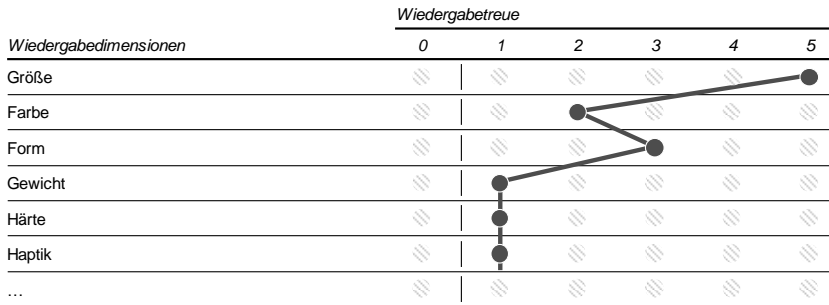


Abbildung 2.41: Filter-Fidelity-Profil eines exemplarischen Prototypen nach Kohler et al. (2013, S. 80)

Der Abgleich der Anforderungen an die Wiedergabetreue für ein spezifisches Validierungsziel mit den Filter-Fidelity-Profilen verfügbarer Prototypen dient dem Produktentwickler als Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Prototypen (Diefenbach, Chien, Lenz & Hassenzahl, 2013). Dabei ist zu beachten, dass diejenigen Wiedergabedimensionen, deren Exploration zur Erfüllung des Validierungsziels erforderlich sind, ausreichend ausgestaltet sind. Kohler et al. (2013) weisen zudem darauf hin, dass die übrigen Wiedergabedimensionen, die nicht im Betrachtungsfokus des jeweiligen Tests liegen, bewusst reduziert ausgestaltet sein sollten, um zu erreichen, dass am Test beteiligte Stakeholder ihre Aufmerksamkeit im Zuge der Bewertung auf die gewünschten Aspekte des Prototyps lenken und andere, noch nicht ausgestaltete Aspekte wiederum explizit nicht zur Urteilsbildung heranziehen.

Neben ihrer Wiedergabetreue und dem Integrationsgrad lassen sich Prototypen nach verschiedenen weiteren Kriterien charakterisieren. Eine Übersicht über mögliche Kriterien findet sich etwa bei Jensen, Özkil & Mortensen (2016), Christie et al. (2012) oder Camburn et al. (2013). Sie schlagen unter anderem eine Unterscheidung von Prototypen nach ihrem Material oder den verwendeten Fertigungs- und Montagetechniken vor, welche entweder denen des späteren Produkts entsprechen oder von diesen abweichen können. Darüber hinaus unterscheiden sie Prototypen nach ihrer Interaktivität mit einem Anwender sowie zwischen physischen und virtuellen Prototypen. Prototypen lassen sich zudem nach ihrem Zweck im Produktentwicklungsprozess klassifizieren. Dieser besteht nicht allein in einem Einsatz im Rahmen von Validierungsaktivitäten. Neben einem solchen sogenannten konvergierenden Zweck mit dem Ziel der Evaluation und Selektion führen Jensen et al. (2016) einen divergierenden Zweck eines Prototypen an. Prototypen mit diesem Zweck dienen der Unterstützung des Produktentwicklers bei der Ideenbildung und

Synthese, indem sie etwa eine stimulierende Wirkung auf die Kreativität ausüben oder die Kommunikation zwischen den Entwicklern oder verschiedenen Unternehmensfunktionen erleichtern (Israel, Bähr & Exner, 2016; Jensen et al., 2016).

2.3.3.2 Präferenzmessung in der Produktvalidierung

Die Bewertung eines Produkts und dessen Eigenschaften im Rahmen von Validierungsaktivitäten wird maßgeblich durch die *Präferenzen* der beteiligten Stakeholder für bestimmte Eigenschaftsausprägungen bestimmt. Steiner (2007, S. 11) definiert den Begriff der Präferenz als die „subjektive Vorziehwürdigkeit einer Alternative gegenüber anderen Produktalternativen zu einem bestimmten Zeitpunkt“. Für Validierungsaktivitäten, deren Ziel in der Untersuchung der Präferenzen, meist von Kunden und Anwendern, für bestimmte Produkteigenschaften und deren Ausprägungen besteht, hat sich ausgehend von den Wirtschaftswissenschaften der Begriff der *Präferenzmessung* etabliert. Verfahren der Präferenzmessung erlauben die Ermittlung des Einflusses von Produkteigenschaften auf den Grad der Bedürfnisbefriedigung von Kunden und Anwendern und damit letztendlich auf deren zukünftige Kaufentscheidung sowie den potenziellen Markterfolg einer spezifischen Produktalternative. Sie stellen in der Produktentwicklung ein wichtiges Werkzeug dar, um die Unsicherheit bezüglich der Kunden- und Anwenderanforderungen frühzeitig zu reduzieren. (Steiner, 2007)

Die Definition des Präferenzbegriffs nach Steiner (2007) legt nahe, dass Präferenzen keineswegs statisch sind. Sie sind vielmehr zeitlichen Änderungen unterworfen und stets kontextabhängig. Insbesondere die Auswahl der einem Kunden oder Anwender präsentierten alternativen Eigenschaftsausprägungen beeinflusst die von ihnen geäußerten Präferenzen maßgeblich. Präferenzen unterscheiden sich zudem je nach betrachteter Zielgruppe. Somit sind die Ergebnisse der Präferenzmessung immer relativ und ausschließlich für den jeweils betrachteten Kontext und die adressierte Zielgruppe gültig. (Steiner, 2007)

Die Durchführung von Tests zur Präferenzmessung folgt in Anlehnung an Steiner (2007) und Backhaus, Erichson, Weiber & Plinke (2011) unabhängig von der konkreten Methode einem fünfstufigen Vorgehen (vgl. Abbildung 2.42). Am Anfang dieses Vorgehens steht die Auswahl relevanter Produkteigenschaften und alternativer Ausprägungen, deren Einfluss auf die Bedürfnisbefriedigung der Kunden und Anwender untersucht werden soll. Dem folgt im zweiten Schritt die Auswahl der zu verwendenden Methode zur Präferenzmessung. In den folgenden Schritten erfolgt die Bewertung der Eigenschaften und Eigenschaftsausprägungen durch die beteiligten Kunden und Anwender. Die Bewertungsergebnisse werden je nach verwendeter Methode anschließend in Nutzenwerte überführt und von der Ebene einzelner Individuen auf die Ebene relevanter Kunden- und Anwendergruppen aggregiert. Für

die Bewertung der Eigenschaften und Ausprägungen werden diese den Kunden und Anwendern in Form sogenannter Stimuli präsentiert. Dabei kann es sich sowohl um eine verbale oder bildliche Beschreibung der Eigenschaften und Ausprägungen als auch um eine Repräsentation in Form von virtuellen oder physischen Prototypen handeln. Die Verwendung verbaler sowie einfacher bildlicher Stimuli wie Skizzen ist dabei mit einem geringeren Aufwand verbunden als die Verwendung komplexerer Produktmodelle. Jedoch erreichen diese Stimuli ggf. nicht die Wiedergabetreue, die erforderlich wäre, um die beteiligten Kunden und Anwender in ausreichender Weise bei der Bewertung der Alternativen zu unterstützen. Dies gilt insbesondere dann, wenn Kunden und Anwender nicht mit den zu bewertenden Eigenschaften und Ausprägungen vertraut sind. Eine Präsentation der Eigenschaften durch abstrakte verbale Stimuli kann in diesen Fällen zu stark verzerrten und folglich wenig aussagekräftigen Bewertungsergebnissen führen. So führen etwa Albrecht (2000), Sattler (1991) und Schubert (1990) aus, dass realitätsnähere Stimuli die Güte der Bewertungsergebnisse verbessern, zumal sie eher einer realen Entscheidungssituation entsprechen. Die Wahl eines geeigneten Stimulus erfordert somit häufig eine Abwägung zwischen dem damit verbundenen Ressourceneinsatz und der erforderlichen Wiedergabetreue. (Steiner, 2007)

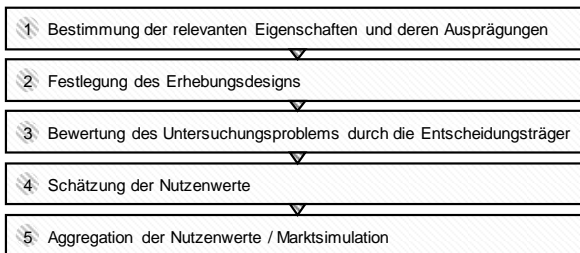


Abbildung 2.42: Vorgehen zur Durchführung von Tests zur Präferenzmessung nach Steiner (2007, S. 41)

Zur Unterstützung der Präferenzmessung existieren eine Reihe etablierter Methoden. Nach der zugrundeliegenden Entscheidungsfindungstheorie lassen sich dabei Methoden der kognitiven und der emotionalen Präferenzmessung unterscheiden (vgl. Abbildung 2.43). Methoden der kognitiven oder rationalen Präferenzmessung ermitteln Präferenzen in der Regel anhand der von Kunden und Anwendern getroffenen Entscheidungen in simulierten Auswahl-situationen zwischen alternativen

Produkten, Eigenschaften oder Eigenschaftsausprägungen. Die Erfassung der Präferenzen erfolgt dabei meist durch die bewusste Beantwortung von Fragen durch den Kunden oder Anwender. Die Fragen beziehen sich dabei ausschließlich auf die Bewertung der pragmatischen Produktqualität (vgl. Kapitel 2.3.2). Dem gegenüber stehen Methoden der emotionalen Präferenzmessung, die auf die Erfassung der emotionalen oder hedonischen Qualitätskomponente und ihrer Bewertung durch Kunden und Anwender abzielen. Da die Bewertung der emotionalen Qualität eines Produkts unbewusst erfolgt, erfolgt die Erfassung der emotionalen Präferenz meist nicht auf Grundlage bewusst getroffener Aussagen, sondern mithilfe biologischer Messverfahren, etwa der Messung der Herzfrequenz, oder durch die Beobachtung von Kunden und Anwendern während der Interaktion mit dem Produkt. (Katičić, 2012)

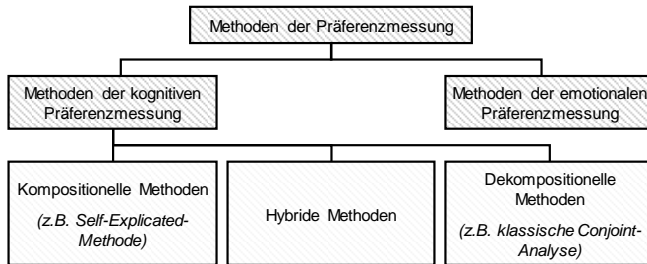


Abbildung 2.43: Klassifizierung von Methoden der Präferenzmessung

Aufgrund des tendenziell höheren Aufwands im Zuge der Erhebung von Daten zur emotionalen Präferenz und den Schwierigkeiten bei ihrer Operationalisierung finden in der industriellen Praxis Methoden der kognitiven Präferenzmessung eine weitere Verbreitung. Dabei lässt sich wiederum zwischen sogenannten kompositionellen und dekompositionellen Methoden unterscheiden. Darüber hinaus existieren hybride Methoden dieser beiden Varianten. Kompositionelle Methoden sind dadurch gekennzeichnet, dass die Kunden und Anwender direkt nach der Bewertung einzelner Eigenschaften und Eigenschaftsausprägungen befragt werden. Dabei erfolgt die Befragung in der Regel zweistufig, wobei die Kunden und Anwender zunächst ihre Präferenz für die alternativen Eigenschaftsausprägungen angeben und anschließend die Eigenschaften untereinander nach ihrer Relevanz bewerten. Aus der zweistufigen Bewertung jeder Eigenschaft und ihrer Ausprägungen ergeben sich durch Multiplikation anschließend die Teilnutzenwerte der Eigenschaftsausprägungen. Zu

den am weitesten verbreiteten kompositionellen Methoden zählen die verschiedenen Varianten der Self-Explicated-Methode. (Eckert & Schaaf, 2009; Steiner, 2007)

Dekompositionelle Methoden der Präferenzmessung sehen im Gegensatz zu kompositionellen Methoden keine Bewertung einzelner Eigenschaften und Ausprägungen, sondern vielmehr die Bewertung verschiedener Gesamtproduktalternativen vor, die sich jeweils in ihren Eigenschaftsausprägungen unterscheiden. Die am weitesten verbreitete dekompositionelle Methode ist die sogenannte Conjoint-Analyse, die auf die Arbeiten von Luce & Tukey (1964) zurückgeht und heute in einer Vielzahl verschiedener Varianten existiert. Im Zuge der Durchführung klassischer Varianten der Conjoint-Analyse bewerten Kunden oder Anwender meist eine Vielzahl unterschiedlicher Produktalternativen entweder simultan oder im Rahmen von paarweisen Vergleichen. Aus der Gesamtheit der Bewertungsergebnisse werden anschließend mittels regressiver Verfahren die Teilnutzenwerte der einzelnen Eigenschaftsausprägungen ermittelt. (Steiner, 2007)

Als Vorteil der Conjoint-Analyse und anderer dekompositioneller Methoden der Präferenzmessung wird in der Literatur ihre stärkere Ähnlichkeit zu realen Kaufsituationen angeführt, in denen die Bewertung von Produktalternativen ebenfalls auf der aggregierten Ebene von Gesamtprodukten erfolgt (Albrecht, 2000; Sattler & Hensel-Börner, 2007). Dekompositionelle Methoden sind so in der Lage Wechselwirkungen zwischen den Bewertungen verschiedener Eigenschaften und ihrer Ausprägungen zu berücksichtigen, die im Zuge realer Kaufentscheidungen auftreten (Steiner, 2007). Eckert & Schaaf (2009) weisen allerdings darauf hin, dass sich daraus ausweislich verschiedener empirischer Vergleichsstudien keine höhere Ergebnisgüte dekompositioneller Methoden gegenüber kompositionellen Methoden ergibt (vgl. auch Agarwal & Green, 1991; Green, Krieger & Agarwal, 1993; Netzer & Srinivasan, 2011). Angesichts des signifikant höheren kognitiven und zeitlichen Aufwands dekompositioneller Methoden für die beteiligten Probanden empfehlen Eckert & Schaaf (2009) daher insbesondere für komplexere Produkte mit einer hohen Zahl zu berücksichtigender Eigenschaften und Ausprägungen die Verwendung kompositioneller Methoden der Präferenzmessung. Steiner (2007) weist jedoch darauf hin, dass dekompositionelle Methoden in der Praxis im Vergleich zu den Varianten der Conjoint-Analyse verhältnismäßig selten eingesetzt werden.

2.3.4 Frühe und kontinuierliche Validierung

Ausschlaggebend für die effektive und effiziente Durchführung von Validierungsaktivitäten ist deren Verankerung im Produktentwicklungsprozess (Albers, Behrendt et al., 2016). Verschiedene disziplinspezifische und -übergreifende Prozessmodelle sehen die Validierung daher als einen integralen Teil des Entwicklungsprozesses

vor (vgl. Kapitel 2.1.4). Speziell ältere Modelle betrachten die Validierung dabei als eine eigenständige Phase zum Ende des Entwicklungsprozesses (Eigner, 2014). Mit dem zunehmenden Einfluss agiler Entwicklungsansätze wird jedoch immer häufiger die Forderung nach frühzeitigen, kontinuierlichen Validierungsaktivitäten gestellt (Albers, Behrendt et al., 2017; Schmidt, Chahin, Kößler & Paetzold, 2017). Der agile Scrum-Ansatz, der zunehmend auch über die Softwareentwicklung hinaus Anwendung findet, sieht etwa vor, dass jedes Mitglied des Entwicklungsteams die eigenen Entwicklungsergebnisse und die des Teams im sogenannten Sprint Review Meeting zum Ende eines jeden Sprints im Hinblick auf die Bedürfnisbefriedigung der relevanten Stakeholder überprüft (Gloger, 2016). Auch der in Kapitel 2.2.4 vorgestellte ASD-Ansatz fußt unter anderem auf dem Grundprinzip einer frühen und kontinuierlichen Validierung (Albers, Heimicke, Spadinger, Reiß et al., 2019).

Das besondere Potenzial einer frühzeitigen Validierung ergibt sich dabei zum einen aus ihrer Hebelwirkung auf nachgelagerte Prozesse. Jeder Fehler, der in der Frühen Phase eines Entwicklungsprojekts etwa aufgrund eines mangelnden Verständnisses der Kunden- und Anwenderanforderungen gemacht wird, zieht potenziell kostenintensive und zeitaufwändige Änderungen in späteren Entwicklungsphasen nach sich oder kann im schlimmsten Fall gar nicht mehr mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand korrigiert werden (Albers, 1994; Albers, Reinemann, Hirschter, Fahl & Heitger, 2019; Porter, 2004). Die Steigerung der Kosten von Änderungen im Verlauf eines Entwicklungsprojekts wird plakativ durch die ursprünglich von Clark & Fujimoto (1991) beschriebene *Zehnerregel (Rule of Ten)* verdeutlicht (vgl. Abbildung 2.44). Ausweislich dieser Regel erhöhen sich die Änderungskosten von einer Entwicklungsphase zur nächsten um den Faktor zehn. Gleichzeitig nimmt das Ausmaß der möglichen Einflussnahme im Laufe eines Entwicklungsprojektes ab (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013). Zur Reduktion der Änderungskosten schlagen viele Autoren daher eine sogenannte Fehler-Früherkennung mithilfe frühzeitiger Validierungsaktivitäten vor. Selbst bei gleichbleibender Anzahl identifizierter Fehler und daraus folgender Änderungen lässt sich durch die Verlagerung der Änderungen und entsprechender Entwicklungsentscheidungen und -tätigkeiten in die Frühe Phase demnach eine Kostenreduktion erreichen (Klingler, 2016). Dieses Prinzip wird in der Literatur auch unter der Bezeichnung Frontloading diskutiert (Matthiesen et al., 2017).

Neben dem Effekt auf die Änderungskosten stellen viele Autoren auch einen positiven Zusammenhang früher und kontinuierlicher Validierungsaktivitäten mit dem späteren Markterfolg eines Produktes her (Cooper & Kleinschmidt, 1993; Gruner & Homburg, 1999; Helm, 2001; Verworn & Herstatt, 2007). Je stärker die marktliche Unsicherheit im Zuge von Validierungsaktivitäten frühzeitig reduziert wird, desto ge-

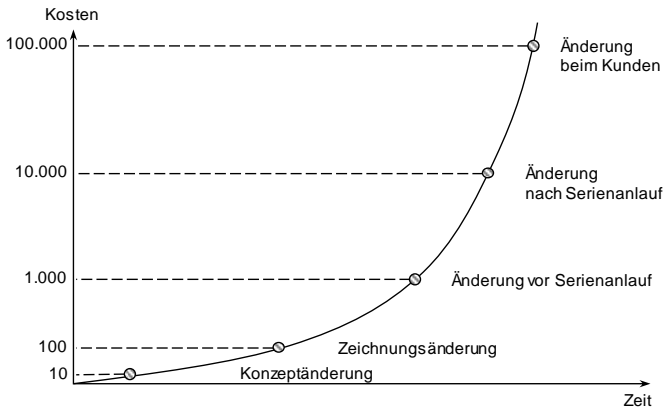


Abbildung 2.44: Rule of Ten nach Reinhart, Lindemann & Heinzl (1996) (zit. nach Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013, S. 143)

nauer spiegeln die initial definierten Anforderungen die realen Bedürfnisse von Kunden und Anwendern wieder. Eine kontinuierliche Validierung stellt zudem sicher, dass die Produkthanforderungen und Entwicklungsergebnisse im Projektverlauf ständig hinsichtlich der Erfüllung von Kunden- und Anwendernutzen hinterfragt werden (Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Behrendt et al., 2017).

Albers, Matros et al. (2015) verdeutlichen das besondere Potenzial früher und kontinuierlicher Validierung anhand der Unterscheidung des sogenannten Pull- und Push-Prinzips der Validierung. Das Push-Prinzip beschreibt dabei ein Vorgehen zur Validierung, das an klassische phasenorientierte Vorgehensmodelle angelehnt ist (Klingler, 2016). Danach findet die Validierung von Entwicklungsergebnissen stets nachgelagert statt. Validierungsaktivitäten werden demnach erst durch das Vorliegen konkreter Entwicklungsartefakte wie Prototypen ausgelöst. Die primären Entwicklungsaktivitäten, die im direkten Zusammenhang zum Produkt stehen, wie das Finden von Produktprofilen oder die Modellierung von Prinzip und Gestalt, werden dabei vollständig abgeschlossen, bevor die sekundären Aktivitäten zur Vorbereitung und Durchführung der Validierung, wie die Entwicklung der Validierungsumgebung, begonnen werden (vgl. Abbildung 2.45). (Albers, Matros et al., 2015; Albers, Behrendt et al., 2016; Matros, 2016)

Bei einem Vorgehen nach dem Pull-Prinzip wird die Validierung hingegen als zentrale, prozessbegleitende Aktivität verstanden, die weitere Entwicklungsaktivitäten,

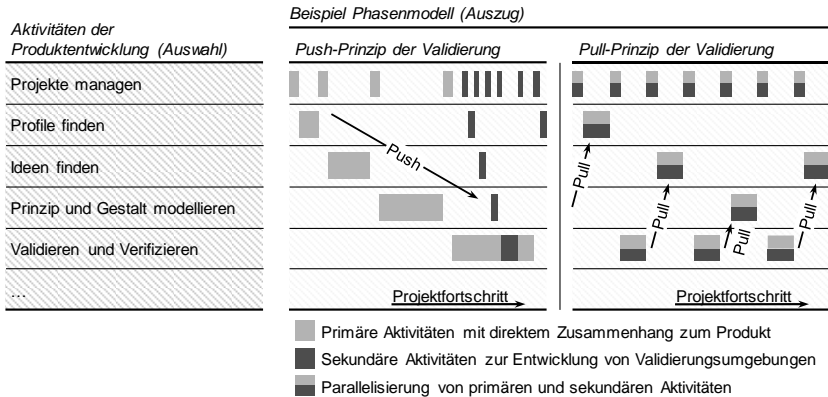


Abbildung 2.45: Push-Prinzip und Pull-Prinzip der Validierung nach Albers, Matros et al. (2015, S. 78)

wie etwa die Entwicklung von Prototypen und Simulationsmodellen, anstößt (Albers, Matros et al., 2015). Dazu wird der Bedarf an Validierungsaktivitäten von Beginn des Entwicklungsprojekts an proaktiv anhand bestehender technologischer und marktlicher Unsicherheiten identifiziert und daraufhin diejenigen Artefakte wie Produktprofile, Prototypen oder Simulationsmodelle entwickelt, die zur Erreichung des Validierungsziels und damit zur Generierung des für einen erfolgreichen Projektverlauf erforderlichen Wissens notwendig sind (Albers, Behrendt et al., 2016). Auf diese Weise reduziert sich die Anzahl an nicht-validen Entwicklungsergebnissen, die verworfen werden müssen, und der Validierungsaufwand bleibt beherrschbar (Matros, 2016). Das Pull-Prinzip trägt so zu einer Erhöhung der Effizienz von Validierungsaktivitäten bei. Weitere Effizienzvorteile einer kontinuierlichen, prozessbegleitenden Validierung nach dem Pull-Prinzip ergeben sich dadurch, dass sich die primären Aktivitäten der Produktentwicklung bei einem solchen Vorgehen größtenteils mit den sekundären Aktivitäten zur Entwicklung der Validierungsumgebung parallelisieren lassen (vgl. Abbildung 2.45). Gleichzeitig stellt das Pull-Prinzip durch die frühzeitige Definition der Validierungsbedarfe sicher, dass das im Zuge der Validierung gewonnene Wissen zu einem frühen Zeitpunkt in das Entwicklungsprojekt eingebracht werden kann, wodurch sich letztendlich die oben beschriebenen positiven Auswirkungen auf den Markterfolg des entwickelten Produkts ergeben. (Albers, Matros et al., 2015; Albers, Behrendt et al., 2016; Matros, 2016)

Gerade Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses sind dabei jedoch mit besonderen Schwierigkeiten für die Produktentwickler verbunden, die sich aus den charakteristischen Besonderheiten dieser Phase ergeben (vgl. Kapitel 2.2.3). So ist die Unsicherheit bezüglich der Anforderungen von Kunden und Anwendern in der Frühen Phase oft hoch, relevantes Wissen ist nur implizit vorhanden und wenig dokumentiert. Dies erschwert die Eingrenzung und Priorisierung von Validierungsaktivitäten in dieser Phase, zumal die Validierungsziele nur in abstrakter Form formuliert werden können (Klingler, 2016). Weiterhin liegt in der Frühen Phase naturgemäß noch kein vollständiges und ausgereiftes Produkt vor, weshalb auf modellbasierte Methoden und den Einsatz von Referenzprodukten zur Validierung zurückgegriffen werden muss, die ggf. nicht alle relevanten Eigenschaften und Merkmale des zu entwickelnden Produkts mit der nötigen Wiedergabetreue abbilden (Albers & Düser, 2011). Eine weitere in der industriellen Praxis relevante Einschränkung früher Validierungsaktivitäten ist die oft geringe Verfügbarkeit zeitlicher und finanzieller Ressourcen. Sie stehen oft der Herstellung wiedergabetreuer Prototypen oder der Durchführung zeitaufwändiger Tests unter Einbindung aller relevanten Stakeholder entgegen (Albers & Düser, 2011).

Um diesen Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten entgegenzutreten, kommen in der Praxis vermehrt Techniken der virtuellen Produktentwicklung wie virtuelle Simulationsmodelle oder Produktmodelle auf Basis der Virtual- oder Augmented-Reality-Technologie zum Einsatz (Albers & Düser, 2011; Rademacher, Krömker, Weber & Riedel, 2014; Seiffert & Rainer, 2008; Verworn & Herstatt, 2007; Wiedemann, 2013). Sie ermöglichen frühe Validierungsaktivitäten auch dann, wenn das zu untersuchende System „nicht real vorliegt oder nur unter hohem Kosten- und Zeitaufwand als Prototyp hergestellt werden kann“ (Albers & Düser, 2011, S. 136). Albers & Düser (2011) weisen dabei darauf hin, dass der Aufwand der Modellbildung mit zunehmender Produktkomplexität im Projektverlauf stark zunimmt, sodass der effiziente Einsatz simulativer Ansätze damit je nach Produkt mitunter auf frühe Entwicklungsphasen beschränkt bleibt. Auch Techniken des sogenannten Rapid Prototyping, etwa durch generative Fertigungsverfahren oder leistungsskalierte Prototypen, können helfen, den beschriebenen Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten zu begegnen (Matthiesen et al., 2017).

2.3.5 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Der Forderung nach Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses steht die Tatsache entgegen, dass zu diesem Zeitpunkt oft nur Teile des zu entwickelnden Produkts vorliegen, deren Reifegrade sich zudem stark

unterscheiden. Das Beispiel zeigt, dass nicht nur das Gesamtprodukt zum Gegenstand der Validierung wird, sondern auch Teilsysteme im Fokus von Validierungsaktivitäten stehen. Der Kunden- und Anwendernutzen wird jedoch stets durch das Gesamtprodukt und nicht durch seine Teilsysteme generiert. Für die Überprüfung der Bedarfserfüllung im Rahmen der Validierung muss daher zwingend das Verhalten des Gesamtsystems herangezogen werden. Dies gilt auch, wenn nur ausgewählte Teilsysteme getestet werden. Um dies zu erreichen, wird das Teilsystemverhalten mithilfe geeigneter Restsystemmodelle in das Gesamtsystemverhalten überführt. Die Interaktion des Gesamtsystems mit weiteren umgebenden Systemen sowie mit dem Kunden oder Anwender wird zudem über zusätzliche Umwelt- und Kundenmodelle abgebildet. Die Validierung erfolgt nach diesem Verständnis stets unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen des betrachteten Teilsystems mit allen relevanten umgebenden Systemen. (Albers, Behrendt et al., 2016; Klingler, 2016; Matros, 2016)

Mit dem *IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz* (*IPEK-XiL-Ansatz*) haben Albers et al. einen Ansatz zur durchgängigen methodischen Unterstützung und Beschreibung von Validierungsaktivitäten entwickelt, dem dieses Verständnis zugrunde liegt (vgl. Albers & Düser, 2008, 24. September, 2010; Albers, Behrendt et al., 2016; Düser, 2010). Der Ansatz hat einen historischen Bezug zur Fahrzeugentwicklung, lässt sich jedoch auf die Validierung beliebiger anderer technischer Produkte übertragen (Matthesen, Schäfer, Mangold & Durow, 2013). Der IPEK-XiL-Ansatz unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Sichtweisen auf das im Rahmen einer Validierungsaktivität zu untersuchende System X. Steht die Entwicklung des zu untersuchenden Teilsystems im Vordergrund, wird vom sogenannten System-in-Development (SiD) gesprochen. Bei dem SiD handelt es sich um dasjenige System, das sich in der Entwicklung befindet, bzw. welches vom Produktentwickler verantwortet wird. Die Erkenntnisse aus der Validierung fließen in diesem Fall in die Entwicklung des getesteten Teilsystems ein. Steht hingegen der Gewinn von Erkenntnissen über ein Teilsystem im Vordergrund, die an anderer Stelle im Entwicklungsprozess weiterverwendet werden, wird die Bezeichnung System-under-Investigation (Sul) für das Teilsystem gewählt. Bei dem Sul kann es sich dabei um ein Subsystem des SiD handeln oder aber auch um ein Teilsystem außerhalb des SiD, wie etwa das eines Referenzprodukts. Ebenso können Sul und SiD zusammenfallen. In diesem Fall wird wie auch im Folgenden in der Regel vorrangig die Bezeichnung SiD verwendet. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Sämtliche mit dem SiD interagierende Systeme werden als Connected Systems bezeichnet. Dabei handelt es sich in der Regel um das Restsystem, den Anwender sowie die Umwelt. Zur Umwelt zählen dabei diejenigen Teile der Umgebung eines

Systems, die einen Einfluss auf die Validierungsergebnisse haben können. Die Auswahl der relevanten zu berücksichtigenden Wechselwirkungen mit Connected Systems ist jeweils in Abhängigkeit des Validierungsziels und der davon abgeleiteten Testfälle zu treffen. Alle Systeme der Validierungsumgebung, das SiD sowie die verschiedenen Connected Systems, können physische, virtuelle oder gemischt physisch-virtuelle Ausprägungen annehmen. Das SiD kann zudem je nach Validierungsaufgabe auf einer beliebigen Systemebene, vom Gesamtsystem bis zum einzelnen Wirkflächenpaar, vorliegen. (Albers, Behrendt et al., 2016; Klingler, 2016; Matros, 2016)

Mit dem IPEK-XiL-Framework stellt der IPEK-XiL-Ansatz ein Beschreibungsmodell für Validierungsumgebungen bereit, das dem oben dargelegten Begriffs- und Systemverständnis der Validierung folgt. Das Modell beschreibt die Wechselwirkungen der verschiedenen Systemebenen des SiD mit den Modellen des Restsystems, der

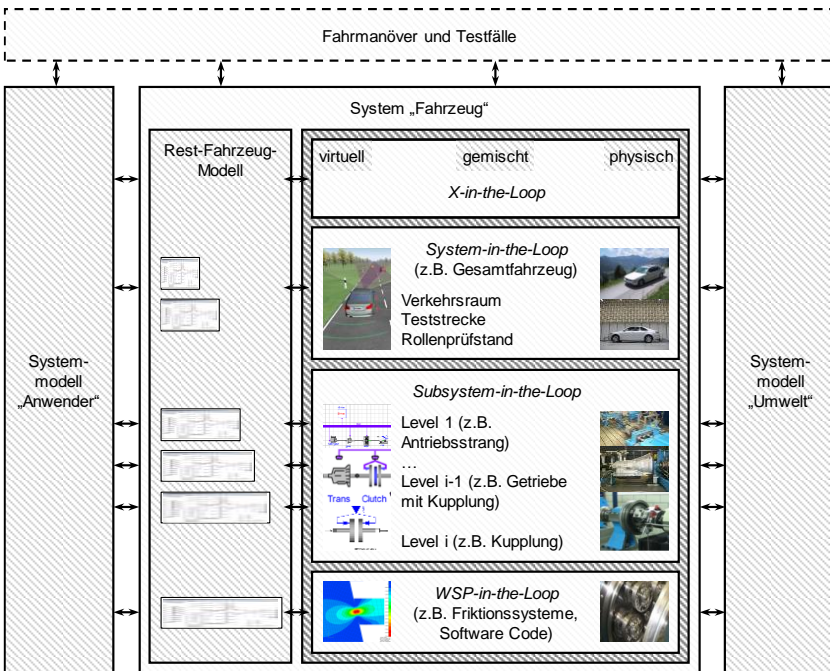


Abbildung 2.46: IPEK-XiL-Framework am Beispiel eines Fahrzeugs nach Albers, Behrendt et al. (2016, S. 560)

Umwelt und des Anwenders. Darüber hinaus gibt es die Abhängigkeit der Modelle vom Validierungsziel und den definierten Testfällen wieder. Das IPEK-XiL-Framework unterstützt Produktentwickler bei der Entwicklung und Dokumentation von Validierungsumgebungen (Matros, 2016). Abbildung 2.46 zeigt das IPEK-XiL-Framework am Beispiel eines Fahrzeugs. (Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Auch für die Konfiguration einer Validierungsumgebung stellt der IPEK-XiL-Ansatz mit dem Modell der IPEK-XiL-Architektur ein Beschreibungsmodell bereit (vgl. Abbildung 2.47). Das Modell gibt Aufschluss über die Teilsysteme einer Validierungsumgebung und ordnet diese jeweils entweder dem System-in-Development oder den Connected Systems zu. Zudem sind die Modelle der Teilsysteme nach ihrer Ausprägung in virtuelle und physische Modelle eingeteilt. Das Modell der IPEK-XiL-Architektur bildet zudem die funktionalen Beziehungen zwischen den Teilsystemmodellen ab. Zur Verknüpfung von Teilsystemmodellen, die aufgrund von Inkomp-

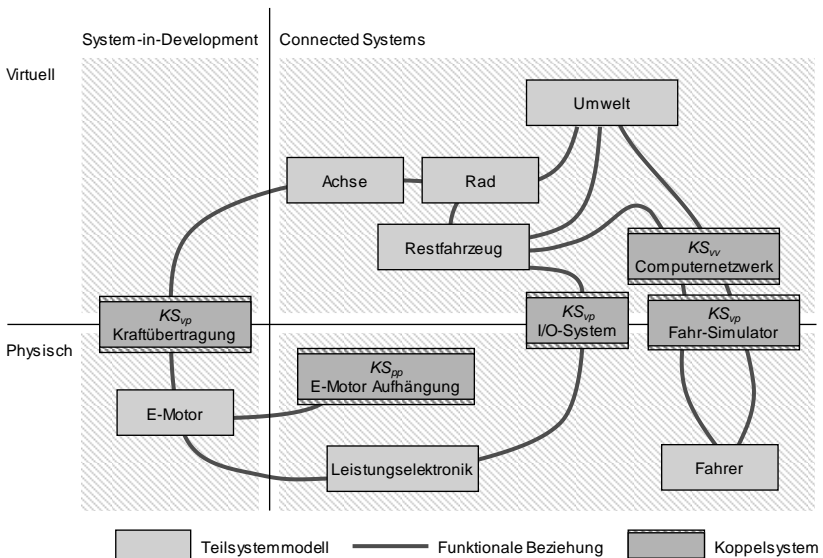


Abbildung 2.47: Modell der IPEK-XiL-Architektur am Beispiel der Validierungsumgebung für einen Fahrzeugantriebsstrang nach Albers, Mandel et al. (2018, S. 2803)

tibilität, etwa zwischen der physischen und virtuellen Domäne, keine direkte Verbindung eingehen können, werden sogenannte Koppelsysteme eingeführt. Sie erfüllen eine Koppelfunktion zwischen zwei Teilsystemmodellen, dürfen aber keinen Einfluss auf das relevante Systemverhalten haben. Nach der Ausprägung der von einem Koppelsystem verknüpften Modelle unterscheiden Albers, Pinner, Yan, Hettel & Behrendt (2016) physisch/physische, virtuell/virtuelle und virtuell/physische Koppelsysteme. (Albers, Pinner et al., 2016; Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Mandel et al., 2018; Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

2.3.6 Zwischenfazit

Die Ansammlung, Verbreitung und Anwendung von Wissen ist für den Unternehmenserfolg im Allgemeinen und den Erfolg der Produktentwicklung im Speziellen von besonderer Bedeutung. Insbesondere die Frühe Phase von Produktentwicklungsprozessen ist jedoch mitunter durch einen hohen Grad an Unsicherheit etwa hinsichtlich der Anforderungen relevanter Stakeholder gekennzeichnet. Der Produktvalidierung kommt als zentraler wissensgenerierender Aktivität in der Produktentwicklung eine zentrale Rolle bei der Reduktion von technologischer und marktlicher Unsicherheit zu. Die Validierung im Sinne des Pull-Prinzips trägt zudem maßgeblich zur Steuerung des gesamten Produktentstehungsprozesses bei, indem Validierungsaktivitäten wiederum andere Entwicklungsaktivitäten wie etwa die Entwicklung von Prototypen und Simulationsmodellen anstoßen. Mit dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz haben Albers et al. einen Ansatz zur durchgängigen methodischen Unterstützung von Validierungsaktivitäten entwickelt, der mit dem IPEK-XiL-Framework und dem Modell der IPEK-XiL-Architektur zudem Beschreibungsmodelle für Validierungsumgebungen und deren Konfigurationen bereitstellt.

Im Gegensatz zur reinen Verifikation wird im Zuge der Validierung überprüft, ob das Produkt den gewünschten Nutzen für Kunden, Anwender oder Anbieter erfüllt und ob das definierte Zielsystem in seiner Ausprägung damit für die Stakeholder überhaupt relevant ist. Der Berücksichtigung und mitunter direkten Einbindung der Stakeholder kommt damit bei der Validierung eine zentrale Bedeutung zu. Für die Ermittlung des Einflusses bestimmter Produkteigenschaften und deren Ausprägungen auf den Grad der Bedürfnisbefriedigung von Kunden und Anwendern im Rahmen von Validierungsaktivitäten existieren eine Reihe verschiedener Ansätze zur Präferenzmessung. Zu den verbreitetsten Ansätzen gehören dabei die Conjoint-Analyse sowie die Self-Explicated-Methode.

Während besonders ältere Prozessmodelle der Produktentwicklung die Validierung als eine eigenständige Phase zum Ende des Entwicklungsprozesses betrachten, wird mit dem zunehmenden Einfluss agiler Entwicklungsansätze immer häufiger die

Forderung nach frühen, kontinuierlichen Validierungsaktivitäten gestellt. Die besondere Bedeutung einer frühzeitigen Validierung ergibt sich aus ihrer Hebelwirkung auf nachgelagerte Prozesse und den geringeren Aufwand zur Fehlerkorrektur in frühen Entwicklungsphasen. Um den besonderen Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten zu begegnen, kommen in der Praxis vermehrt Techniken der virtuellen Produktentwicklung zum Einsatz. Dazu gehört insbesondere auch die Verwendung virtueller und teil-virtueller Produktmodelle auf Basis der Augmented-Reality-Technologie.

2.4 Augmented Reality

Die augmentierte Realität (engl. *Augmented Reality*) bezeichnet die computergestützte Erweiterung der vom Menschen wahrgenommenen Realität um virtuelle Inhalte (Broll, 2013). Die ersten Forschungsarbeiten zu AR gehen bereits auf die späten 1960er Jahre zurück (Tönnis, 2010). Dennoch findet die AR-Technologie erst in den letzten Jahren infolge der Verfügbarkeit verhältnismäßig günstiger, kompakter und gleichzeitig leistungsfähiger AR-Systeme eine stärkere Verbreitung in der Industrie und darüber hinaus. Zu ihren Einsatzbereichen gehören auch Anwendungen in der Produktentwicklung im Allgemeinen sowie der Produktvalidierung im Speziellen, die im Betrachtungsfokus dieser Arbeit stehen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Augmented-Reality-Technologie.

Kapitel 2.4.1 führt zunächst in die Grundlagen der AR-Technologie ein. In Kapitel 2.4.2 wird anschließend die Funktionsweise von AR-Systemen einschließlich der zugrundeliegenden Hard- und Software diskutiert. Die speziellen Eigenschaften von AR-Umgebungen werden in Kapitel 2.4.3 beschrieben. Kapitel 2.4.4 gibt abschließend einen Überblick über die Anwendung der AR-Technologie in der Produktentwicklung.

2.4.1 Grundlagen der Augmented-Reality-Technologie

Die Idee der Erweiterung der menschlichen Realitätswahrnehmung um computer-generierte virtuelle Inhalte wird zumeist mit Ivan Sutherland in Verbindung gebracht. Er entwickelte bereits in den späten 1960er Jahren einen speziellen Bildschirm, der in der Lage war dreidimensionale Liniengrafiken in Abhängigkeit seiner Perspektive in das Blickfeld des Anwenders zu projizieren (Tönnis, 2010). Der Begriff der Aug-

mented Reality wurde wiederum erst Jahrzehnte später durch den damaligen Mitarbeiter der Firma Boeing² Thomas Caudell eingeführt (Caudell & Mizell, 1992). Eine heute verbreitete Definition von AR geht auf Azuma (1997) zurück. Demnach ist AR „eine Kombination (Überlagerung) von Realität und Virtualität, die interaktiv ist, bei welcher die Darstellung in Echtzeit erfolgt und in der 3D-Objekte (geometrisch) registriert sind“ (Broll, 2013, S. 245). Azuma geht mit dieser Definition über andere Definitionen hinaus, die häufig die Interaktivität, die Echtzeitfähigkeit und die 3D-Registrierung, also die Verankerung der virtuellen 3D-Objekte im realen Raum, nicht zum Gegenstand haben (Broll, 2013). So definiert etwa Alt (2003, S. 3) Augmented Reality als „Ergänzung der visuellen Wahrnehmung des Menschen durch die situationsgerechte Anzeige von rechnergenerierten Informationen auf im Sichtfeld positionierten tragbaren Geräten“. Während sich die Definitionen von Azuma (1997) und Alt (2003) ausschließlich auf die Überlagerung der visuellen Wahrnehmung des Menschen durch virtuelle Inhalte beschränken, beziehen andere Autoren auch die Überlagerung beliebiger anderer Sinneswahrnehmungen in ihr Verständnis von Augmented Reality mit ein (Schilling, 2008; Tönnis, 2010). Dazu zählt insbesondere die Überlagerung akustischer, aber etwa auch die haptisch-taktiler, olfaktorischer und gustatorischer Informationen (Tönnis, 2010).



Abbildung 2.48: Überlagerung der realen Umgebung (links) durch virtuelle Objekte (rechts) zur Augmented Reality (Mitte), Bilder aufgenommen im IPEK XR-Lab³

Eine weitere oft zitierte Einordnung des Augmented-Reality-Begriffs findet sich bei Milgram & Kishino (1994). Sie beschreiben AR in Abgrenzung zu anderen Formen

² The Boeing Company

³ Die Bilder zeigen Modelle eines Elektromotors aus dem DEmiL-Projekt, das vom Elektrotechnischen Institut (ETI) und dem Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (Fraunhofer ICT) und dem Unternehmen Sumitomo Bakelite Co., Ltd. durchgeführt wurde.

der Realitätsdarstellung und -wahrnehmung entlang des von ihnen eingeführten *Virtuality Continuum* (vgl. Abbildung 2.49). Das Kontinuum umfasst den Bereich zwischen der realen Umwelt und der vollständig virtuellen Umwelt (*Virtual Reality*). Mischformen dieser beiden Extremausprägungen ordnen sie der sogenannten *Mixed Reality* zu, die eine gemischte Umwelt aus realen und virtuellen Elementen beschreibt. Nach dem relativen Anteil dieser Elemente lässt sich innerhalb der *Mixed Reality* wiederum zwischen der *Augmented Reality* (reale Umwelt mit virtuellen Elementen) und der *Augmented Virtuality* (virtuelle Umwelt mit realen Elementen) unterscheiden (Milgram & Kishino, 1994). Als Sammelbegriff für die verschiedenen Ausprägungen entlang des *Virtuality Continuum* ist zudem der Begriff der *Extended Reality* (XR) gebräuchlich (Sharma, Mehra, Kaulgud & Podder, 2019).

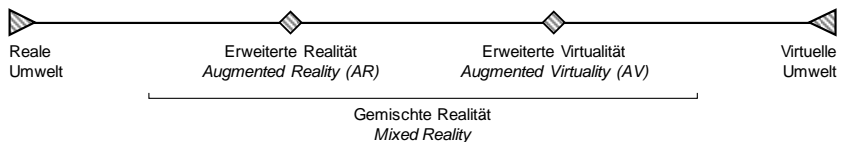


Abbildung 2.49: Virtuality Continuum nach Milgram & Kishino (1994)

Die häufig im Zusammenhang mit AR diskutierte *Virtual Reality* (VR) kann demnach als eine extreme Ausprägung der *Mixed Reality* begriffen werden, in der der Anteil realer Elemente einen Wert von Null annimmt (Milgram, Takemura, Utsumi & Kishino, 1994). Im Gegensatz zu VR sind „virtuelle Inhalte und reale Umgebung [in AR] nicht strikt voneinander getrennt, sondern können sich überlappen, überlagern und durchdringen“ (Dörner, Broll, Jung & Göbel, 2019, S. 24). AR erlaubt damit anders als VR die Interaktion des Anwenders sowohl mit virtuellen Objekten als auch mit Objekten der realen Umgebung sowie auch deren Interaktion untereinander (Dörner et al., 2019). Abbildung 2.50 verdeutlicht diesen Unterschied zwischen *Augmented Reality* und *Virtual Reality*.

Die Überlagerung eines bestimmten realen Raums durch definierte virtuelle Objekte mithilfe der *Augmented-Reality-Technologie* wird als *AR-Szene* oder auch *AR-Umgebung* bezeichnet (Jung & Vitzthum, 2019; Schuhmann, Klimant, Kollatsch & Wittstock, 2013). Jeder *AR-Umgebung* liegt als Datenstruktur ein sogenannter Szenengraph zugrunde. Szenengraphen sind azyklische Graphen, deren Knoten über gerichtete Kanten in einer hierarchischen Beziehung zueinander stehen. Bei den Blattknoten eines Szenengraphen handelt es sich etwa um geometrische 3D-Objekte, Audio- und Lichtquellen oder virtuelle Kameras. Mithilfe von Gruppenknoten

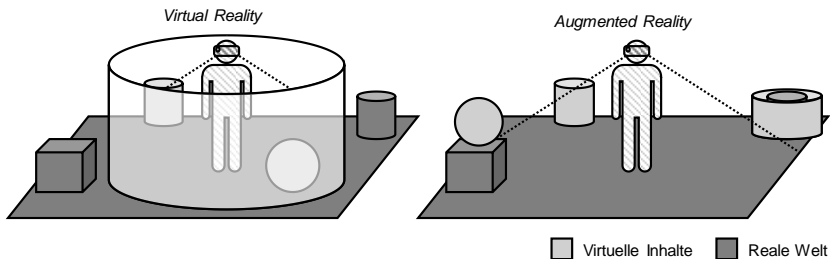


Abbildung 2.50: Augmented Reality im Vergleich zu Virtual Reality nach Dörner et al. (2019, S. 24)

können Teile der AR-Umgebung zusammengefasst und die untergeordneten Knoten gebündelt manipuliert werden. Um eine AR-Umgebung darstellen zu können, sind bestimmte technische Komponenten erforderlich. Sie bilden zusammen das AR-System (Dörner et al., 2019; Tönnis, 2010). Aufgrund ihrer Rolle als Schnittstelle zwischen der realen und der virtuellen Umwelt werden AR-Systeme mitunter auch als AR-Interfaces bezeichnet. (Jung & Vitzthum, 2019)

Trotz der vergleichsweise langen Historie von Forschungsarbeiten zum Thema Augmented Reality hat die stärkere Verbreitung der AR-Technik in industriellen und nicht-industriellen Anwendungen erst in den letzten Jahren eingesetzt. Maßgeblich getrieben ist diese Entwicklung von der Verfügbarkeit verhältnismäßig günstiger, kompakter und gleichzeitig leistungsfähiger AR-Systeme. Infolgedessen haben sich eine Vielzahl von Anwendungen etwa in den Bereichen Architektur und Stadtplanung, Militär, Lehre und Ausbildung, Training und Wartung, Medizin, Unterhaltung sowie Freizeit etabliert (Broll, 2013; Tönnis, 2010). Der globale Markt für AR-Anwendungen wird in einer Studie des Technologiekonzerns PTC für das Jahr 2018 mit 7 Milliarden Dollar angegeben (PTC Inc., 2017). Für das Jahr 2021 prognostiziert dieselbe Studie ein Wachstum auf eine Marktgröße von 63 Milliarden Dollar. Im Gartner *Hype Cycle for Emerging Technologies 2019* ist die Augmented-Reality-Technologie erstmalig nicht mehr aufgeführt (Gartner Inc., 2018, 2019). Sie wird damit als reif für den produktiven Einsatz eingestuft. Die VR-Technologie war bereits in der Ausgabe des *Hype Cycle* aus dem Jahr 2018 erstmalig nicht mehr als sogenannte *Emerging Technology* geführt worden und ist damit in ihrem Entwicklungszyklus weiter fortgeschritten als die AR-Technologie (Gartner Inc., 2017, 2018). Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer Studie des Marktforschungsunternehmens IDG aus dem Jahr 2019, die unter ca. 200 Unternehmen verschiedener Branchen aus

Deutschland, Österreich und der Schweiz durchgeführt wurde (IDG Research Services, 2019). In der Studie gaben ca. 73% der befragten Unternehmen an bereits VR oder AR zu verwenden oder einen Einsatz in den nächsten zwölf Monaten zu planen. Von diesen Unternehmen gaben ca. 80% an VR einzusetzen. Dagegen gaben ca. 46% an AR einzusetzen.

2.4.2 Funktionsweise von Augmented-Reality-Systemen

Dörner et al. (2019, S. 32) definieren ein Augmented-Reality-System als ein „Computersystem, das aus geeigneter Hardware und Software besteht, um die Wahrnehmung der realen Welt möglichst nahtlos und für den Nutzer möglichst ununterscheidbar um virtuelle Inhalte anzureichern“. AR-Systeme folgen dabei in der Regel einem ähnlichen prinzipiellen Aufbau. Dieser umfasst zum einen ein sogenanntes Tracking-System, welches kontinuierlich die Position sowie die Orientierung des Anwenders relativ zur realen Umgebung erfasst. Anhand dieser Informationen erstellt bzw. aktualisiert ein Szenengenerator in Echtzeit die AR-Szene. Er greift dafür auf Modelldaten und zusätzliche Informationen zur AR-Szene zu, die in einem Datenbanksystem gespeichert sind. Die AR-Szene wird schließlich mithilfe eines Anzeigesystems für den Anwender dargestellt. Dieser prinzipielle, vereinfachte Aufbau von AR-Systemen ist in Abbildung 2.51 dargestellt. (Alt, 2003; Azuma, 1997; Schilling, 2008)

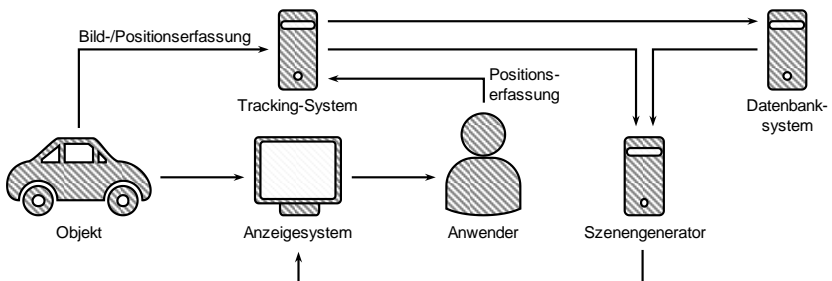


Abbildung 2.51: Aufbau von Augmented-Reality-Systemen nach Schilling (2008, S. 9)

Bei modernen AR-Systemen werden die einzelnen Subsysteme meist in einem Gerät zusammengefasst. Je nach Bauform des Geräts und nach technischer Ausgestaltung der einzelnen Subsysteme lassen sich verschiedene Arten von AR-Systemen unterscheiden. Peddie (2017) unterteilt AR-Systeme etwa in tragbare (eng.

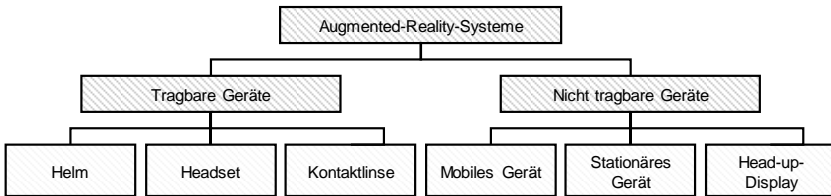


Abbildung 2.52: Klassifizierung von Augmented-Reality-Systemen nach Peddie (2017, S. 31)

wearable) und nicht tragbare (eng. non-wearable) Geräte. Zu den tragbaren Geräten zählt er Helme, Headsets und Kontaktlinsen, während die nicht tragbaren Geräte mobile Geräte wie Smartphones und Tablets, stationäre Geräte wie Fernseher, Projektoren und Computer und sogenannte Head-up-Displays umfassen (vgl. Abbildung 2.52). (Peddie, 2017)

Eine weitere verbreitete Art der Klassifizierung ist die Einteilung in sogenannte Video-See-Through-Systeme, Optical-See-Through-Systeme und projektionsbasierte Systeme. Die Überlagerung der realen Umgebung mit virtuellen Objekten geschieht bei projektionsbasierten AR-Systemen durch die Projektion der virtuellen Inhalte auf reale, physische Gegenstände. Der Erweiterung der Realitätswahrnehmung sind dabei insofern Grenzen gesetzt, als dadurch „keine neuen räumlichen Strukturen geschaffen“ (Broll, 2019, S. 322), sondern lediglich Oberflächeneigenschaften manipuliert oder zusätzliche Informationen auf der Oberfläche dargestellt werden können. (Broll, 2019)

Bei Video-See-Through-Systemen wird dagegen die reale Umgebung mit Hilfe einer Videokamera erfasst und anschließend das digitale Videobild mit den virtuellen Objekten überlagert. Die AR-Szene wird anschließend so auf einem Bildschirm dargestellt, dass Skalierung und Perspektive der virtuellen Inhalte mit denen der realen Umgebung übereinstimmen. Beispiele für Video-See-Through-Systeme sind moderne Smartphones und Tablets, die mit entsprechenden Hardwarekomponenten wie Sensoren und Kameras sowie mit der erforderlichen Software zur Darstellung von AR-Szenen ausgestattet sind. Android und iOS, die beiden gängigsten Betriebssysteme für mobile Geräte der Firmen Google bzw. Apple, stellen entsprechende Programmierschnittstellen zur Verfügung, die Entwicklern den Zugriff auf benötigte AR-spezifische Hard- und Softwarefunktionen der Geräte erleichtern. Seit Bereitstellung dieser Programmierschnittstellen zum Ende des Jahres 2017 ist die Ver-

füßbarkeit von AR-Anwendungen für Smartphones und Tablets signifikant gestiegen. Abbildung 2.53 (links) zeigt ein Beispiel für die Darstellung einer AR-Szene auf einem Tablet. (Broll, 2019; Broll, Weidner, Schwandt, Weber & Dörner, 2019)

Im Gegensatz zu Video-See-Through-Systemen wird die reale Umgebung bei Optical-See-Through-Systemen nicht über eine Videoaufnahme, sondern vielmehr direkt durch den Anwender wahrgenommen. Die Überlagerung der Umgebung durch virtuelle Inhalte geschieht in der Regel mithilfe eines semitransparenten Displays, das sich an einer festen Position im Blickfeld des Anwenders befindet. Um eine perspektivisch korrekte Darstellung der virtuellen Inhalte zu erzeugen, ist ein eigenes Display für jedes Auge oder ein stereoskopisches Display erforderlich. Beispiele für Optical-See-Through-Systeme sind sogenannte Head-Mounted-Displays (HMD), die auch als Daten- oder AR-Brillen bezeichnet werden. Zu den bekanntesten am Markt erhältlichen Modellen zählt die HoloLens™ des Herstellers Microsoft®. Abbildung 2.53 (rechts) zeigt ein Beispiel für die Darstellung einer AR-Szene mithilfe der Microsoft® HoloLens™. (Broll, 2019; Grimm, Broll, Herold, Reiners & Cruz-Neira, 2019)

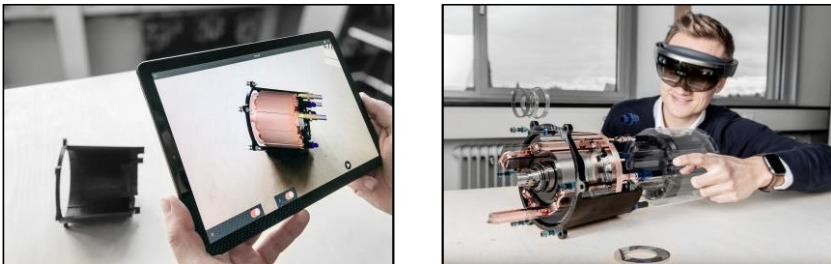


Abbildung 2.53: Virtuelle Überlagerung des Kamerabildes bei einem Video-See-Through-System am Beispiel eines Tablets (links) und virtuelle Überlagerung der realen Umgebung bei einem Optical-See-Through-System am Beispiel der Microsoft® HoloLens™ (rechts), Bilder aufgenommen im IPEK XR-Lab

Statt über ihre Systemstruktur lassen sich Augmented-Reality-Systeme auch anhand funktionaler Kriterien beschreiben. Broll (2019) unterscheidet dabei zwischen fünf verschiedenen Funktionen, die ein AR-System erfüllt. Hierzu gehören die Videoaufnahme, das Tracking, die Registrierung, die Darstellung und die Ausgabe. Im Zuge der Videoaufnahme wird zunächst ein kontinuierlicher Videostream der

Umgebung erzeugt. Dies ist nicht nur bei Video-See-Through-Systemen der Fall, sondern in der Regel ebenso bei Optical-See-Through-Systemen, zumal das Videosignal auch für diese Geräte eine für die Tracking-Funktion notwendige Eingangsgröße darstellt. Dabei muss das Farbspektrum des Videosignals nicht zwingend dem des menschlichen Auges entsprechen. So verfügt etwa die erste Generation der Microsoft® HoloLens™, u.a. zur Realisierung der Tracking-Funktion, über vier Graustufen-Kameras, eine Infrarot-Kamera und eine RGB-Farbkamera (Microsoft Corp., 2019). Das Tracking bezeichnet die Fähigkeit eines AR-Systems zur Schätzung der Position und Orientierung des Anwenders bzw. seines Blickpunktes relativ zur realen Umgebung. Um virtuelle Objekte hinsichtlich ihrer Perspektive und Skalierung korrekt darzustellen, sind AR-Systeme zwingend auf diese Information angewiesen. Neben GPS-basiertem Tracking für die reine Positionsbestimmung kommen für das Orientierungs-Tracking in mobilen und tragbaren AR-Systemen heutzutage sogenannte Visual-Inertial-Odometry-Verfahren zum Einsatz (Apple Inc., 2019; Google LLC, 2019). Dabei werden Merkmale mittels spezieller Algorithmen aus dem Kamerabild extrahiert und über aufeinanderfolgende Einzelbilder (eng. frames) hinweg verfolgt. Mithilfe einer sogenannten inertialen Messeinheit (eng. inertial measurement unit, IMU), welche die Lage- und Positionsänderungen der Kamera misst, lassen sich so auch die Distanzen zwischen den Merkmalspunkten untereinander und dem optischen Zentrum der Kamera ermitteln und damit letztendlich auf die relative Orientierung der Merkmale in der realen Umgebung schließen (Schöps, Engel & Cremers, 2014). (Broll, 2019)

Die referenzierenden Merkmale können entweder im Vorfeld bei der Erstellung der AR-Szene in Form sogenannter Targets oder Marker bereitgestellt oder auch erst zur Laufzeit der AR-Applikation mithilfe eines Algorithmus aus der Menge der vorhandenen Umgebungsmerkmale bestimmt werden. Ein Vorgehen nach letzterem Prinzip wird auch als markerloses Tracking mithilfe von sog. Spatial-Targets bezeichnet. Kommt hingegen ein Marker zum Einsatz, kann es sich dabei entweder um einen 2D-Marker in Form einer Abbildung, ein sog. Image-Target, oder um einen 3D-Marker in Form eines räumlichen Gegenstands, ein sog. Model-Target, handeln. Sie müssen sich in physischer Form als Teil der realen Umgebung wiederfinden. Liegen gleichzeitig virtuelle Modelle der Marker in einer Datenbank ab, kann der Tracking-Algorithmus durch einen entsprechenden Abgleich die Merkmale aus dem Kamerabild den vorliegenden Modellen zuordnen. (Broll, 2019; Schöps et al., 2014; Tönnis, 2010)

Auf Basis der Informationen über die relative Position und Orientierung des Anwenders erfolgt im Zuge der Registrierung das geometrisch korrekte Einpassen der virtuellen Objekte in die reale Umgebung. Bei schnellen Bewegungen von Anwender und Kamera durch den Raum ist die Qualität der Registrierung in besonderem Maße



Abbildung 2.54: Geometrische Registrierung eines virtuellen Modells auf Basis von markerbasiertem Tracking mit 2D-Marker (links), 3D-Marker (Mitte) und markerlosem Tracking (rechts), Bilder aufgenommen im IPEK XR-Lab

abhängig von der Wiederholrate und der Latenz des Tracking-Algorithmus. Abbildung 2.54 zeigt drei Beispiele für die korrekte geometrische Registrierung eines virtuellen Objekts im realen Raum auf Basis von verschiedenen Tracking-Verfahren. Neben der korrekten Positionierung und Orientierung virtueller Objekte im Raum ist ihre realitätsnahe Einpassung von weiteren Faktoren abhängig. Dazu zählt insbesondere die Anpassung der Beleuchtung des virtuellen Objekts an die realen Beleuchtungsverhältnisse. Analog zur geometrischen Registrierung wird dieser Vorgang als photometrische Registrierung bezeichnet. In vielen AR-Applikationen wird heute jedoch noch auf eine umfassende photometrische Registrierung verzichtet, zumal die Informationen zur Lage realer Lichtquellen und zu Oberflächennormalen realer Geometrien, die für eine korrekte Darstellung von Schattenwürfen und Glanzlichtern erforderlich wären, nicht vorliegen oder nur schwer zu ermitteln bzw. zu schätzen sind. Viele AR-Applikationen beschränken sich daher auf die Anpassung der Beleuchtung virtueller Objekte an den globalen Helligkeitswert einer realen Umgebung. (Broll, 2019)

Im Zuge der Darstellung werden die virtuellen Inhalte der AR-Szene nach erfolgter Registrierung unter Berücksichtigung aller erforderlichen geometrischen und photometrischen Transformationen aus der Perspektive des Anwenders gerendert. Abhängig von der Art des verwendeten AR-Systems werden anschließend entweder die virtuellen Objekte allein (Optical-See-Through-System, projektionsbasiertes System) oder aber der mit den virtuellen Objekten überlagerte, augmentierte Videostream ausgegeben (Video-See-Through-System). (Broll, 2019)

2.4.3 Eigenschaften von Augmented-Reality-Umgebungen

Neben technologischen Aspekten unterscheiden sich AR- und auch VR-Szenen von konventionellen, dynamischen Computergrafiken insbesondere in ihrer Wirkung auf

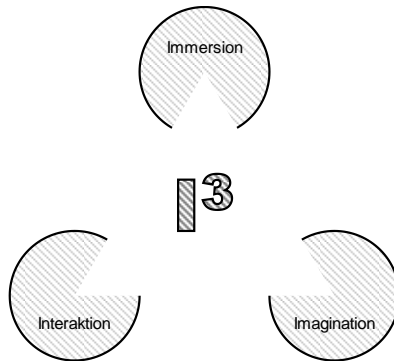


Abbildung 2.55: Das I³-Modell nach Burdea & Coiffet (2003)

den Anwender. Diese Wirkung lässt sich durch eine Reihe von Eigenschaften beschreiben, die virtuellen Szenen der Virtual und Augmented Reality zugesprochen werden. Burdea & Coiffet (2003) formulieren in ihrem sogenannten I³-Modell mit der Interaktion, der Immersion und der Imagination drei zentrale Eigenschaften von VR-Szenen, die sich ebenso auf AR-Szenen übertragen lassen (vgl. Abbildung 2.55).

Unter der Interaktion wird dabei die Möglichkeit zum „bidirektionalen Informationsaustausch zwischen dem Nutzer und der virtuellen Welt“ (Katičić, 2012, S. 11) verstanden. Eng damit verbunden ist die „Nichtlinearität der Ereignisse“ (Katičić, 2012, S. 11), welche VR- und AR-Szenen auszeichnet. Demnach hat der Anwender durch eigene Eingaben und Aktionen jederzeit die Möglichkeit in einem festgelegten Umfang Einfluss auf die virtuelle Szene zu nehmen. Je nach Aufbau der virtuellen Szene reicht dieser mögliche Umfang von einem reinen Wechsel der Perspektive durch die relative Bewegung des Anwenders innerhalb der Szene bis hin zur Manipulation virtueller Objekte und anderen komplexeren Interaktionshandlungen. Für die technische Umsetzung von Interaktionsmöglichkeiten stehen dem Entwickler je nach verwendetem AR-System verschiedene Eingabemodalitäten zur Verfügung. Dazu zählt etwa die Interaktion mithilfe von Gesten- und Spracherkennung sowie die Verwendung separater Eingabegeräte wie Computermäuse und Tastaturen oder sogenannter Datenhandschuhe. (Rademacher et al., 2014)

Die Immersion bezeichnet wiederum die Eigenschaft einer virtuellen Szene beim Anwender ein subjektives Gefühl der Präsenz zu erzeugen (Dörner et al., 2019; Rademacher et al., 2014). Der Begriff der Präsenz wird meist synonym zum Begriff der Imagination verwendet (Bamodu & Ye, 2013). Die Eigenschaften der Immersion und

Imagination sind folglich eng miteinander verwandt. Imagination oder Präsenz meint das Gefühl des Anwenders in der virtuellen Szene anwesend zu sein und sie damit letztlich als real zu interpretieren (Steuer, 1992). Das Präsenzepfinden eines Anwenders lässt sich über Fragebögen bestimmen oder aber durch die Auswertung physiologischer Daten wie etwa körperlicher Stressreaktionen auf eine in der virtuellen Szene simulierte Gefahrensituation (Dörner et al., 2019; Slater, Usoh & Steed, 1994). Über das Präsenzepfinden kann auf den Immersionsgrad der virtuellen Szene geschlossen werden. Während sich die Präsenz oder Imagination jedoch als rein subjektives Konstrukt begreifen lässt, wird die Eigenschaft der Immersion in der Literatur auf „objektive, quantifizierbare Stimuli [...] der menschlichen Wahrnehmung“ (Dörner et al., 2019, S. 56) zurückgeführt. Die Immersion beschreibt damit „alle [objektiven] Voraussetzungen, die die Präsenz des Nutzers in einer virtuellen Umgebung bedingen“ (Rademacher et al., 2014, S. 19) und kann damit im Gegensatz zum Präsenzepfinden direkt vom Entwickler einer AR-Szene beeinflusst werden.

Tatsächlich wird bei der Entwicklung von AR-Szenen häufig das Ziel verfolgt, einen möglichst hohen Immersionsgrad zu erreichen. Der Immersionsgrad einer virtuellen Szene korreliert dabei positiv mit der Anzahl der menschlichen Sinnessysteme, die über illusorische Stimuli angesprochen werden (Katičić, 2012). Studien zeigen gleichwohl, dass der Mensch bis zu einem gewissen Grad dazu in der Lage ist, fehlende Sinnesinformationen durch die vorhandenen Stimuli anderer Sinnessysteme zu kompensieren (Bordegoni, 2011). Je nach Definition werden unterschiedlich viele menschliche Sinnessysteme unterschieden (vgl. Tabelle 2.13). Gängige VR- und AR-Systeme beschränken sich in der Regel auf die Stimulation des visuellen, auditiven und haptischen Sinnessystems (Dörner & Steinicke, 2019). Während VR-Systeme für haptische Stimuli auf spezielle Ein- und Ausgabegeräte wie etwa sogenannte Force-Feedback-Handschuhe zurückgreifen müssen, ist dies bei AR-Systemen nicht erforderlich (Katičić, 2012). Durch die Einbeziehung der realen Umwelt sind reale haptische Stimuli zwangsläufig immanenter Teil von AR-Szenen, die daher in Bezug auf das haptische Sinnessystem potenziell höhere Immersionsgrade erreichen als VR-Szenen (Bordegoni, Cugini, Caruso & Polistina, 2009).

Auch die Einbeziehung von auditiven Stimuli kann den Immersionsgrad virtueller Szenen und damit das Präsenzepfinden signifikant erhöhen (Larsson, Vastfjall & Kleiner, 2002). Je nach Art des AR-Systems geschieht die Ausgabe auditiver Stimuli dabei entweder durch stationäre, in der realen Umwelt des Anwenders befindliche Lautsprecher oder, wie bei mobilen Geräten üblich, durch Kopfhörer oder mobile Lautsprecher, die direkt im Gerät verbaut sind. Ähnlich wie visuelle Informationen werden auch auditive Signale an einer definierten Position innerhalb der AR-Szene

verankert und müssen vor ihrer Ausgabe durch Transformation an die relative Position des Anwenders zur Schallquelle angepasst werden. Im einfachsten Fall wird dazu die relative Lautstärke der Audioausgabe für das linke und das rechte Ohr getrennt voneinander an die Position und Orientierung des Anwenders angepasst. Um einen realistischeren auditiven Stimulus zu erzeugen, kommen alternativ sogenannte binaurale Verfahren zur Transformation des Audiosignals zum Einsatz, mit denen versucht wird das räumliche Hörvermögen des Menschen nachzubilden. In diesem Zusammenhang wird auch von einem sogenannten binauralem oder spatial sound gesprochen. (Grimm et al., 2019; Gutiérrez Alonso, Vexo & Thalmann, 2008)

Tabelle 2.13: Übersicht über die gängigsten menschlichen Sinnessysteme nach Schermer & Drinkmann (2017, S. 52)

<i>Sinnessystem</i>	<i>Sinnesorgan</i>	<i>Empfindung</i>
Visuell	Auge	Form, Farbe, Bewegung, Raum
Auditiv	Innenohr	Ton, Geräusch
Haptisch / taktil	Haut	Druck, Schmerz, Wärme, Kälte, Berührung
Olfaktorisch	Nase	Geruch
Gustatorisch	Mundhöhle	Geschmack
Kinästhetisch	Innenohr	Gleichgewicht, Bewegung
Propriozeptiv	Muskeln, Sehnen, Gelenke	Lage des Körpers

Ein besonders großer Einfluss auf das menschliche Präsenzepfinden in virtuellen Szenen wird der visuellen Wahrnehmung zugesprochen. Dementsprechend liegt der Fokus der meisten gängigen AR-Systeme auf der Generierung visueller illusorischer Stimuli. Dabei ist vor allem die räumlich korrekte Darstellung der virtuellen Objekte innerhalb einer AR-Szene entscheidend für ihren Immersionsgrad. Sie ist das Ergebnis des kontinuierlichen Trackings von relativer Position und Orientierung des Anwenders und der geometrischen Registrierung der virtuellen Objekte auf Basis der Tracking-Informationen (vgl. Kapitel 2.4.2). Die räumlich korrekte Darstellung virtueller Objekte erfordert eine möglichst vollständige und widerspruchsfreie Berücksichtigung verschiedener Tiefenhinweise in der AR-Szene. Tiefenhinweise dienen dem menschlichen Gehirn als Anhaltspunkte für eine korrekte Raumwahrnehmung. Dabei wird unterschieden zwischen sogenannten binokularen Tiefenhinweisen, die nur mit zwei Augen wahrgenommen werden können, und monokularen Tiefenhinweisen, die auch beim Sehen mit nur einem Auge zur Verfügung

stehen. Die Darstellung binokularer Tiefenhinweise spielt dementsprechend nur bei AR-Systemen eine Rolle, die über separate Displays für jedes Auge oder ein stereoskopisches Display verfügen. Zu den binokularen Tiefenhinweisen zählt beispielsweise die Stärke der Konvergenz, also der gegensinnigen Bewegung beider Augen beim Fokussieren eines nahen Objekts, die dem visuellen System aufgrund der bekannten Anatomie der Augen Anhaltspunkte über die absolute Entfernung des Objekts bietet. Auch die Unterschiede zwischen den Bildern des linken und rechten Auges, die sogenannten Disparitäten, zählen zu den binokularen Tiefenhinweisen. (Dörner & Steinicke, 2019)

Eine Übersicht über die Vielzahl existierender monokularer Tiefenhinweise findet sich etwa bei Dörner & Steinicke (2019). Zu den für die Darstellung in AR-Szenen relevanten monokularen Tiefenhinweisen zählt neben der perspektivischen Verzerrung insbesondere die Verdeckung oder Okklusion von virtuellen Objekten, die sich vom Anwender aus gesehen hinter einem Objekt der realen Umgebung befinden. Verdeckt in einer AR-Szene ein scheinbar weiter entferntes virtuelles Objekt das scheinbar nähere reale Objekt, führt dies zu einer gestörten Raumwahrnehmung und in der Folge zu einem geringeren Präsenzepfinden des Anwenders in einer AR-Szene (vgl. Abbildung 2.56). Die korrekte Berücksichtigung von Okklusion in AR-Szenen erfordert vom AR-System die Kenntnis über die exakte Geometrie realer Objekte, um beim Rendern der virtuellen Inhalte verdeckte Stellen entsprechend aussparen zu können. Einige verfügbare AR-Systeme wie die Microsoft® HoloLens™ sind in der Lage mithilfe von Tiefensensoren zur Laufzeit der AR-Applikation eine dreidimensionale Karte der realen Umgebung zu erstellen, die zur Berechnung

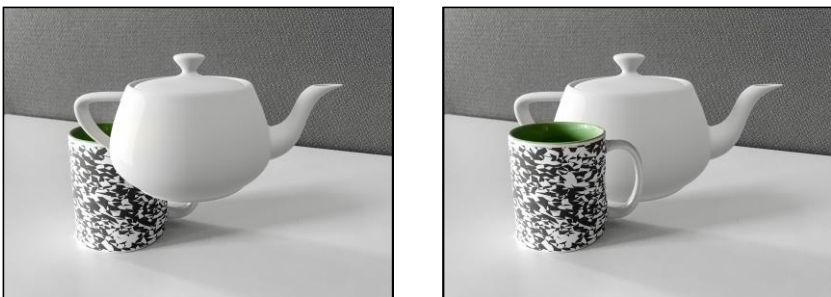


Abbildung 2.56: AR-Szene mit physischem Becher und virtuelle Kanne, gestörtes Präsenzepfinden durch widersprüchliche Tiefenhinweise (links) und widerspruchsfreie Tiefenhinweise durch korrekte Okklusion (rechts), Bilder aufgenommen im IPEK XR-Lab

der korrekten Verdeckung virtueller Objekte herangezogen wird. Im Falle der ersten Generation der HoloLens™ ist diese Karte jedoch verhältnismäßig grob und kann mehrere Zentimeter von der realen Geometrie abweichen. Die Okklusion durch filigrane reale Strukturen, die sich zudem in kurzer Distanz zum Anwender befinden, ist in der Realität daher oft fehlerhaft. Um dieses Problem zu lösen, kann bereits zum Zeitpunkt der Erstellung einer AR-Szene die Geometrie eines realen Objekts, deren relative Position zum virtuellen Objekt zudem bekannt sein muss, als sogenanntes Phantomobjekt berücksichtigt werden. Die Verdeckung eines virtuellen Objekts durch ein statisches und zudem bekanntes reales Objekt lässt sich nach diesem Verfahren mit heute verfügbaren AR-Systemen korrekt und präzise darstellen. Die präzise Verdeckung durch dynamische, deformierbare Objekte wie etwa eine menschliche Hand ist mit heute gängigen AR-Systemen dagegen nur eingeschränkt möglich. (Dörner & Steinicke, 2019)

Neben den Einschränkungen bei der korrekten Darstellung von Okklusion finden sich in der Literatur und der praktischen Anwendung weitere Beispiele für technische Limitationen derzeit verfügbarer AR-Systeme, die zu einem geringeren Immersionsgrad und damit einem gestörten Präsenzepfinden des Anwenders führen können. So identifizieren etwa Rademacher et al. (2014) zwölf Barrieren für den praktischen Einsatz von VR-Systemen, die sich teilweise auch auf AR-Systeme übertragen lassen. Zu diesen Barrieren zählt unter anderem die mangelnde optische Darstellungsqualität. Auch Broll (2019) weist darauf hin, dass aufgrund der Bau- und Funktionsweise von Head-Mounted-Displays mit semitransparenten Bildschirmen die realen und virtuellen Inhalte deutlich abgedunkelt wahrgenommen werden und die virtuellen Objekte zudem stets teiltransparent erscheinen. Eine weitere technische Beschränkung dieser Art von Geräten mit Auswirkungen auf das Präsenzepfinden ist zudem, dass das Sichtfeld, in dem die virtuellen Inhalte dargestellt werden können, oft signifikant kleiner ist als das gesamte menschliche Gesichtsfeld, das horizontal etwa 180° beträgt (Broll, 2019). Weiterhin wird von vielen Anwendern von Head-Mounted-Displays der physische Eindruck des Geräts selbst, der durch dessen Eigengewicht entsteht, gerade bei längerer Tragedauer als störend für das Präsenzepfinden genannt. Auch die sogenannte Cybersickness, ein Schwindel- oder Übelkeitsgefühl, das sich ebenfalls nach längerer Tragedauer einstellen kann, wird als störend für das Präsenzepfinden beschrieben (Dörner & Steinicke, 2019; Weech, Kenny & Barnett-Cowan, 2019). Dieses Phänomen wird jedoch vornehmlich im Zusammenhang mit der Verwendung von VR- und nicht von AR-Systemen beschrieben.

Viele der beschriebenen Limitationen werden bereits im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten adressiert und haben keinen permanenten

Charakter. Rademacher et al. (2014) deuten deshalb an, dass perspektivisch weniger die technischen Spezifikationen der VR- und AR-Systeme den Immersionsgrad virtueller Szenen beschränken, sondern vielmehr die Gestaltung der virtuellen Szene durch den Entwickler einer VR- oder AR-Applikation. Sie schlagen daher die Entwicklung unterstützender Vorgehensmodelle zur Gestaltung und Evaluation virtueller Szenen vor.

2.4.4 Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung

Mit der zunehmenden Bedeutung von Techniken der virtuellen Produktentwicklung finden auch Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung im Allgemeinen und der Produktvalidierung im Speziellen verstärkte Beachtung (IDG Research Services, 2019; PTC Inc., 2017). Dies gilt für die Wissenschaft wie auch für die Entwicklungspraxis, wenngleich ein umfassender produktiver Einsatz der AR-Technologie nach einer Studie des Marktforschungsinstituts IDG Research Services aus dem Jahr 2019 gerade in kleineren Unternehmen oft noch aussteht (IDG Research Services, 2019). Trotz des stark gestiegenen Anteils virtueller Prototypen und Simulationen in den vergangenen zwei Jahrzehnten werden sie physische Prototypen in der Entwicklung mechatronischer Produkte auf absehbare Zeit nicht vollständig ersetzen (Schilling, 2008). Albers & Düser (2011) führen dies unter anderem auf den hohen Modellierungsaufwand für die vollständige virtuelle Abbildung komplexer mechatronischer Produkte zurück, der den Einsatz virtueller Prototypen je nach Validierungsaufgabe mitunter in späteren Entwicklungsphasen unwirtschaftlich macht. Dies gilt auch angesichts der zunehmenden Verfügbarkeit kosteneffizienter Alternativen aus dem Bereich des Rapid Prototyping (Schilling, 2008). Schilling (2008) weist zudem darauf hin, dass die Verkürzung virtueller Produktmodelle sie für die Beurteilung bestimmter, meist physikalischer Produktmerkmale wie Schwingungen, elastischer Verformungen oder Montagetoleranzen nach heutigem Stand der Technik ungeeignet macht.

Dieser Einschätzung folgend, werden physische und virtuelle Prototypen in der Produktentwicklung je nach Produkt und Validierungsaufgabe weiterhin parallel existieren. Vor diesem Hintergrund besteht das besondere Potenzial für den Einsatz der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung in der bedarfsgerechten Kombination physischer und virtueller Prototypen (Bordegoni et al., 2009; Schilling, 2008). So lassen sich etwa mit Hilfe der Augmented-Reality-Technologie physische Prototypen oder Referenzprodukte gezielt um virtuelle Komponenten zu einem gemischt physisch-virtuellen Prototypen ergänzen oder aber bestehende physische

Komponenten eines Referenzprodukts durch virtuelle Komponenten ersetzen (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019; Reinemann, Albers et al., 2018; Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019).

Der Einsatz der AR-Technologie in der Produktentwicklung unterliegt dabei einer Reihe von Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 2.57). Schilling (2008) zählt dazu zum einen die Auswahl der Hardware in Form geeigneter AR-Systeme sowie der dazugehörigen Software. Ihr Anschaffungspreis sowie die laufenden Aufwände für Betrieb und Wartung beeinflussen die Wirtschaftlichkeit der AR-Anwendung. Gleichzeitig bestimmt die technische Funktion des AR-Systems maßgeblich seine Eignung für eine bestimmte Anwendung in der Produktentwicklung. Neben diesen Systemfaktoren sind eine Reihe von Umgebungsfaktoren zu berücksichtigen, die die Integration der AR-Anwendung in das betriebliche Umfeld betreffen. So ist der Einsatz der AR-Technologie stets an die konkrete Aufgabe in der Produktentwicklung anzupassen. Dazu gehört neben einem Einsatz im Rahmen von Aktivitäten der Produktvalidierung insbesondere auch der Einsatz zur Unterstützung von Kreativektivitäten in der Produktentwicklung, etwa sobald eine AR-Umgebung als Kreativumgebung bei der Objektsynthese Anwendung finden soll. Die Aufgabe, in deren Kontext die AR-Technologie eingesetzt werden soll, ist wiederum eng mit der Frage nach dem Anwender verbunden, der ebenfalls einen relevanten Einflussfaktor für den Einsatz der AR-Technologie in der Produktentwicklung darstellt. Während bei einem Einsatz im Rahmen der Kreation in der Regel der Produktentwickler selbst zum Anwender der AR-Technologie wird, schließt der Kreis der möglichen

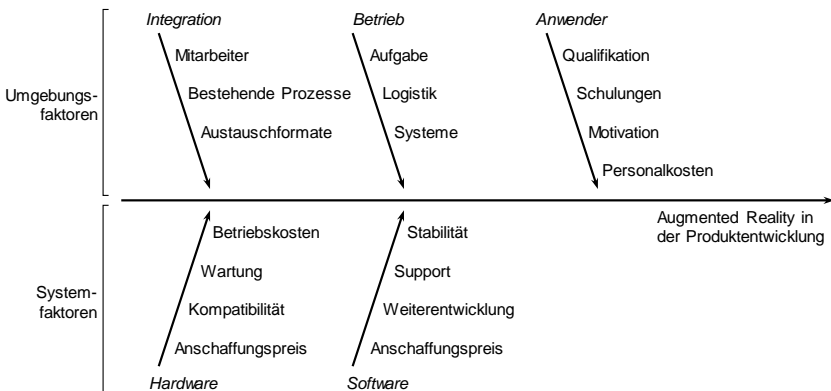


Abbildung 2.57: Einflussfaktoren auf den Einsatz von Augmented Reality in der Produktentwicklung nach Schilling (2008, S. 35)

Anwender bei einem Einsatz im Rahmen der Validierung auch externe Stakeholder wie Kunden und Anwender des Produkts mit ein. Je nach Anwenderkreis sind Aspekte wie die Qualifikation für den Umgang mit dem AR-System, der Schulungsbedarf, die Motivation und die Personalkosten unterschiedlich zu bewerten. (Schilling, 2008)

Darüber hinaus ist die Integration der AR-Anwendung in bestehende Prozesse, Systeme und Arbeitsabläufe betroffener Mitarbeiter in der Produktentwicklung zu berücksichtigen (Schilling, 2008). In der Praxis stellt dabei mitunter die Kompatibilität der Austauschformate der verwendeten CAD-, CAE- und PLM-Software eine relevante Hürde für die nahtlose Integration der AR-Technologie in etablierte Arbeitsabläufe in der Produktentwicklung dar. Geometrische Produktmodelle liegen in modernen Produktentwicklungsprozessen in der Regel in Form sogenannter parametrischer CAD-Modelle vor. Parametrische Modelle basieren auf der Beschreibung geometrischer Strukturen mithilfe mathematischer Funktionen und ermöglichen so eine sehr exakte geometrische Modellierung. Die Grafikpipeline, d.h. die Hard- und Softwaremodule, sogenannte *Shader*, die für das Rendern von Computergrafiken zum Einsatz kommen, sind jedoch auf die Verwendung von Polygonnetz-Modellen ausgelegt. Statt mithilfe mathematischer Funktionen, beschreiben Polygonnetz-Modelle Geometrien anhand einer Reihe von Eckpunkten, sogenannter Vertices, und deren verbindender Kanten, die zusammen planare, polygonale Flächen aufspannen. Abbildung 2.58 zeigt ein parametrisches und ein Polygonnetz-Modell mit dreieckigen Flächen desselben 3D-Objekts. (Wolter, Reuter & Peinecke, 2007)

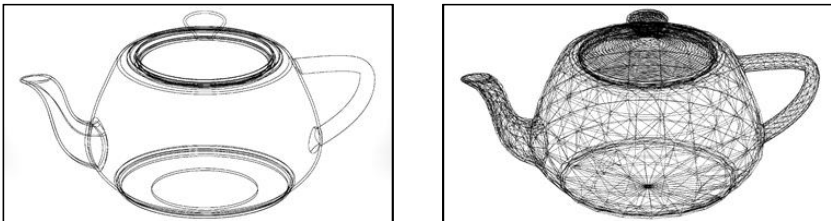


Abbildung 2.58: Parametrisches Modell (links) und Polygonnetz-Modell (rechts) desselben 3D-Objekts

Für die Verwendung in AR-Szenen müssen CAD-Modelle daher in Polygonnetz-Modelle umgewandelt und zudem in ein Dateiformat konvertiert werden, das von

der Laufzeitumgebung der AR-Szene unterstützt wird. Neben der reinen Umwandlung ist in der Regel auch eine Vereinfachung der Objektgeometrie erforderlich, um die Anzahl der Polygone und damit auch die benötigte Rechendauer für das Rendern einzelner Frames zu reduzieren. Angesichts der begrenzten Rechenleistung mobiler AR-Systeme ist dieser Schritt notwendig, um die für die Echtzeitfähigkeit der AR-Szene geforderte Bildrate zu erreichen. Er bedingt jedoch zwangsläufig eine irreversible Reduktion des Informationsgehalts eines geometrischen Produktmodells. Eine Rückführung des vereinfachten Polygonnetz-Modells aus einer virtuellen Szene in den CAD-Workflow des Produktentwicklungsprozesses ist daher in der Regel nicht möglich. (Jung & Vitzthum, 2019)

In der Literatur werden verschiedene Beispiele für Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung beschrieben. Tabelle 2.14 gibt einen Überblick über ausgewählte Fälle. Dabei handelt es sich in der Regel um kontrollierte Versuchsaufbauten außerhalb realer Entwicklungsprojekte. Während in älteren Fallbeispielen häufig selbst aus Einzelkomponenten zusammengestellte, oft stationäre AR-Systeme zum Einsatz kommen, werden in den letzten Jahren zunehmend fertige am Markt verfügbare AR-Systeme herangezogen.

Tabelle 2.14: Beispiele für Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung

<i>Autor</i>	<i>Eingesetztes AR-System</i>	<i>Beschreibung Anwendungsbeispiel</i>
Menk (2019)	Projektionsbasiertes AR-System	Validierung von Design, Ergonomie und Erreichbarkeit durch Überlagerung teilvirtueller Gesamtfahrzeug- und Cockpit-Prototypen mit virtuellen Inhalten
Auricht, Beckmann-Dobrev & Stark (2012)	Projektionsbasierte, 5-seitige VR-CAVE	Validierung ergonomischer Eigenschaften einer PKW-Heckklappe durch Kombination eines speziell konstruierten realen Interaktionsgeräts mit virtuellen Modellen von Heckklappe und Karosserie
Ng, Ong & Nee (2010)	Optical-See-Through-System als HMD mit markerbasiertem Tracking	Synthese einfacher Gestaltkonzepte durch Kombination und Modifikation vorgegebener realer und virtueller Objekte in einer AR-Umgebung
Bordegoni et al. (2009)	Optical-See-Through-System als HMD mit markerbasiertem Tracking	Validierung der Bedienbarkeit einer Waschmaschine durch Überlagerung eines Interaktionsgeräts mit einem virtuellen Modell der Maschine

<i>Autor</i>	<i>Eingesetztes AR-System</i>	<i>Beschreibung Anwendungsbeispiel</i>
Park (2008)	Stationäres Video-See-Through-System mit markerbasiertem und markerlosem Tracking	Konfiguration des Design-Prototyps eines Multimediageräts durch Überlagerung realer, austauschbarer Bausteine mit virtuellen Inhalten
Nölle (2006)	Stationäres Video-See-Through-System mit markerbasiertem Tracking und 2D-Marker	Bauraumanalyse durch Überlagerung des realen Motorraums eines Referenzfahrzeugs mit virtuellen Modellen verschiedener Komponenten
Nölle (2006)	Stationäres Video-See-Through-System mit markerbasiertem Tracking und 2D-Marker	Unterstützung eines Druckversuchs an einem realen Fahrzeugsitz durch Überlagerung mit virtuellen Simulationsergebnissen aus vorheriger FEM-Berechnung
Gausemeier, Radkowski, Oehlschlaeger & Krebs (2005)	Video-See-Through-System als vom Fahrer getragenes HMD	Validierung von Ergonomie und Rundumsicht an einem teilvirtuellen Fahrzeugprototypen durch Überlagerung von Teilen der Karosserie und des Cockpits durch virtuelle Inhalte
Oehme & Huschka (2003)	Stationäres Video-See-Through-System mit markerbasiertem Tracking und 2D-Marker	Validierung verschiedener Gestaltvarianten von Felgen durch Überlagerung eines realen Fahrzeugs mit virtuellen Felgenmodellen

Grundsätzlich lassen sich Anwendungsbeispiele der AR-Technologie in der Produktvalidierung und solche zur Unterstützung der Kreation unterscheiden. Letztere werden etwa von Ng et al. (2010) sowie von Park (2008) beschrieben. Beide entwickeln Applikationen zur Synthese einfacher Gestaltkonzepte durch Kombination und Modifikation vorgegebener realer und virtueller Objekte in einer AR-Umgebung. Die Mehrzahl der beschriebenen Anwendungsbeispiele bezieht sich hingegen auf den Einsatz der AR-Technologie im Kontext der Produktvalidierung. Im Fokus steht dabei häufig die Evaluation von Ergonomie- oder Gestalteeigenschaften an teilvirtuellen Prototypen (vgl. Auricht et al., 2012; Bordegoni et al., 2009; Gausemeier et al., 2005; Menk, 2019; Oehme & Huschka, 2003). Als reale Objekte in der AR-Szene kommen in diesen Fällen sowohl physische Referenzprodukte und Prototypen als auch spezielle Interaktionsgeräte zum Einsatz, die ausschließlich der Generierung haptisch-taktiler Stimuli dienen und vollständig von virtuellen, visuellen Inhalten überlagert werden.

Die Anwendung der AR-Technologie zur Produktvalidierung wird in einigen der aufgeführten Fallbeispiele im Kontext von Kundentests zur Präferenzmessung beschrieben. Die unmittelbare Handhabung des AR-Systems im Zuge der Durchführung der Validierungsaktivität erfolgt in diesen Fällen durch den Anwender des Produkts selbst (vgl. Auricht et al., 2012; Bordegoni et al., 2009; Gausemeier et al., 2005; Menk, 2019; Oehme & Huschka, 2003). Die AR-Technologie unterstützt dabei die Wahrnehmung und das Erlebnis des zu validierenden Produkts. Beides geht nach Hassenzahl (2006) zwingend der Bewertung eines Produkts durch den Anwender voraus (vgl. 2.3.3). Der Anwender ist dafür zwingend aktiv und physisch in die AR-basierter Validierungsumgebungen eingebunden. Die Anwendung der AR-Technologie im Rahmen von Kundentests bleibt damit folglich auf interaktive Produkte beschränkt. Von einer interaktiven Wahrnehmung bis hin zur Interaktion durch Manipulation kann der Grad der Interaktion zwischen Anwender und Produkt dabei gleichwohl unterschiedlich ausgeprägt sein.⁴

Daneben finden sich in der Literatur Anwendungsfälle der AR-Technologie in der Produktvalidierung, die vielmehr auf die direkte Unterstützung der Produktentwickler abzielen. Dazu zählen die von Nölle (2006) beschriebene Bauraumanalyse durch Überlagerung des realen Motorraums eines Referenzfahrzeugs mit virtuellen Modellen eines Ausgleichsbehälters, einer E-Box oder eines Schlauchkomplexes sowie die Unterstützung eines Druckversuchs an einem realen Fahrzeugsitz durch Überlagerung mit virtuellen Simulationsergebnissen aus einer vorherigen FEM-Berechnung.

Der Anwendung der AR-Technologie im Rahmen der kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte wird in der Literatur ein besonderes Potenzial zugesprochen. Rode (2013) sieht im Einsatz virtueller Stimuli in Kundentests die Möglichkeit für einen „vorgezogenen Erkenntnisgewinn zu Kundenanforderungen zu neuen Produktideen“ (Rode, 2013, S. 18). Er führt dies auf die frühere Verfügbarkeit virtueller Stimuli im Vergleich zu Stimuli in Form realer Prototypen zurück. Der Einsatz AR-basierter Prototypen in Kundentests hat demzufolge das Potenzial zur Reduktion der für die Frühe Phase charakteristischen hohen marktlichen Unsicherheit sowie zur Verlagerung von Entwicklungsentscheidungen in die Frühe Phase im Sinne des Frontloadings (vgl. Kapitel 2.3.4). Neben dem indirekten Kosteneffekt infolge der

⁴ In Anlehnung an den in der Literatur etablierten Begriff der Kundenintegration wird im Folgenden von kundenintegrierter Validierung oder Kundentest gesprochen. Im Kontext der AR-gestützten Validierung interaktiver Produkte zielt der Begriff genau genommen auf die Einbindung des Anwenders eines Produkts in die Validierungsaktivität ab. Der Anwender nimmt gleichwohl nur in bestimmten Fällen gleichzeitig die Rolle des Kunden ein (vgl. Kapitel 2.3.3).

Vermeidung später Änderungen im Produktentwicklungsprozess betonen einige Autoren das Potenzial zur direkten Kostenreduktion durch den teilweisen Ersatz potenziell teurerer physischer Prototypen durch teilvirtuelle AR-Prototypen (Stark, Beckmann-Dobrev, Schulze, Adenauer & Israel, 2009; Wittke, 2007).

Voraussetzung für zielgerichtete und aussagekräftige Ergebnisse von Kundentests ist ein möglichst umfangreiches Produktwissen der beteiligten Kunden und Anwender aus der Interaktion mit entsprechenden Prototypen und anderen Produktmodellen (Rode, 2013). Die Qualität der Interaktion und damit auch des daraus gewonnenen Produktwissens wird dabei maßgeblich durch die Wiedergabetreue der verwendeten Prototypen in den für den Kundentest relevanten Wiedergabedimensionen bestimmt (vgl. Kapitel 2.3.3.2). Im Gegensatz zur Verwendung verbaler sowie einfacher bildlicher Stimuli wie Skizzen ermöglicht der Einsatz AR-basierter Prototypen im Rahmen der Produktvalidierung ein potenziell realistisches Produkterlebnis, auch wenn das zu untersuchende System nicht oder nur in Teilen real vorliegt (Irlitti & Itzstein, 2013; Peschl, 2018; Porter, Marnier, Smith, Zucco & Thomas, 2010). Im Vergleich zu rein virtuellen VR-Szenen wird das Realitätsempfinden in einer AR-Szene durch die Einbindung in die reale Umgebung sowie die Möglichkeit zur Kombination virtueller Objekte mit physischen Prototypen oder Referenzprodukten unterstützt (Krevelen & Poelman, 2010). Die realistische, multimodale Darstellung des Prototyps in einer AR-Szene sowie die Möglichkeit zur haptisch-taktilen Interaktion erhöht die Akzeptanz und Glaubwürdigkeit für den Probanden und damit sein Präsenzepfinden (Irlitti & Itzstein, 2013; Oehme & Huschka, 2003; Porter et al., 2010). Katičić (2012) weist zudem darauf hin, dass das Präsenzepfinden in virtuellen Szenen und deren nutzerzentrierte, interaktive Gestaltung Probanden dazu befähigt implizites Wissen in die Beurteilung des Produkts einzubeziehen.

2.4.5 Zwischenfazit

Augmented Reality bezeichnet die computergestützte, echtzeitfähige und interaktive Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung der realen Umgebung um virtuelle Inhalte. Sie grenzt sich von der Virtual Reality ab, in der der Anwender seine reale Umwelt nicht mehr wahrnimmt. Ein mithilfe der AR-Technologie durch virtuelle Objekte überlagerter realer Raum wird als AR-Szene oder AR-Umgebung bezeichnet. AR-Szenen werden mithilfe eines AR-Systems generiert. Die einzelnen Subsysteme sind bei modernen AR-Systemen meist in einem Gerät zusammengefasst. Zu den gängigsten AR-Systemen zählen Video-See-Through-Systeme in Form moderner Smartphones und Tablets sowie Optical-See-Through-Systeme in Form so-

genannter Head-Mounted-Displays. Mit der Verfügbarkeit verhältnismäßig günstiger, kompakter und gleichzeitig leistungsfähiger AR-Systeme findet die AR-Technologie in den letzten Jahren eine immer stärkere Verbreitung in industriellen und anderen Anwendungen.

Eine charakteristische Eigenschaft von AR-Umgebungen ist die sogenannte Immersion. Sie bezeichnet die Eigenschaft einer virtuellen Szene beim Anwender ein subjektives Gefühl der Präsenz zu erzeugen. Erreicht die AR-Szene einen hohen Immersionsgrad, ist der Anwender im Extremfall nicht mehr in der Lage zwischen realen und virtuellen Objekten zu unterscheiden. Das Präsenzepfinden wird dabei sowohl von der Gestaltung der AR-Szene durch den Entwickler als auch von den technischen Eigenschaften des AR-Systems beeinflusst.

Die Möglichkeit zur Kombination physischer und virtueller Objekte in einer immersiven Umgebung begründet das besondere Potenzial der AR-Technologie für ihren Einsatz in der Produktentwicklung im Allgemeinen und der Produktvalidierung im Speziellen. So ermöglichen AR-basierte Prototypen ein potenziell realistisches Produkterlebnis, auch wenn das zu untersuchende System nicht oder nur in Teilen real vorliegt. Ihr Einsatz im Rahmen der kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte hat daher das Potenzial zur Reduktion der für die Frühe Phase charakteristischen hohen marktlichen Unsicherheit.

2.5 Fazit

In Kapitel 2 wurde ausgehend vom systemtechnischen Verständnis der Produktentwicklung ein Überblick über die theoretische Fundierung des Betrachtungsgegenstands dieser Arbeit gegeben. Dabei wurden zentrale Inhalte der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung eingeführt, die einen modelltheoretischen Rahmen für die in Kapitel 6 beschriebene Systematik bilden. Als zentrales Beschreibungsmodell wurde das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers vorgestellt. Mithilfe des Modells der PGE wurde zudem das Verständnis der Frühen Phase von Produktentwicklungsprozessen konkretisiert. Dabei wurde sowohl ihre besondere Bedeutung für den späteren Markterfolg eines Produktes beschrieben, als auch die charakteristischen Herausforderungen früher Entwicklungsphasen, die sich etwa durch ein hohes Maß an Unsicherheit infolge unbekannter Anforderungen relevanter Stakeholder wie Kunden und Anwendern auszeichnen. Der wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens ist gleichwohl maßgeblich von dessen Fähigkeit zur Identifikation und Befriedigung der Bedürfnissituation aus Kunden-, Anwender- und Anbietersicht abhängig. In diesem Zusammenhang wurde die

zentrale Rolle der Produktvalidierung als wissensgenerierender Aktivität in der Produktentwicklung beschrieben. Zudem wurde auf die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Stakeholder bei der Validierung sowie auf die Relevanz und Herausforderungen früher und kontinuierlicher Validierungsaktivitäten eingegangen. Mit der Augmented-Reality-Technologie wurde schließlich eine Technologie vorgestellt, die geeignet ist, den besonderen Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten zu begegnen. Anhand von Fallbeispielen aus Praxis und Wissenschaft wurden die Potenziale der AR-Technologie für einen Einsatz im Rahmen kundenintegrierter Validierungsaktivitäten diskutiert.

3 Zielsetzung

In diesem Kapitel wird die Zielsetzung dieser Arbeit dargelegt. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und der zugrundeliegenden Forschungshypothese wird dazu in Kapitel 3.1 zunächst der Forschungsbedarf für die Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE hergeleitet. Der Forschungsbedarf wird in Kapitel 3.2 anschließend anhand von Forschungsfragen operationalisiert.

3.1 Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit adressiert die Anwendung der AR-Technologie für die kundenintegrierte Validierung interaktiver Produkte zur Präferenzmessung speziell in der Frühen Phase. Auf Basis der Literatur wurde die Frühe Phase von Produktentwicklungsprozessen als eine Phase charakterisiert, die aufgrund ihrer Bedeutung für den späteren Markterfolg eines Produkts eine besondere Rolle einnimmt, gleichzeitig aber mit speziellen Herausforderungen verbunden ist. Diesen Herausforderungen stehen die beschriebenen Potenziale durch den Einsatz AR-basierter Prototypen in der Frühen Phase gegenüber, zu denen insbesondere die Reduktion der für die Frühe Phase charakteristischen hohen marktlichen Unsicherheit zählt.

Die im Stand der Forschung geschilderten Fallbeispiele sowie die Einordnung in den Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies machen deutlich, dass sich Anwendungen der AR-Technologie in der heutigen Entwicklungspraxis vielfach noch im Versuchsstadium befinden. Neben der erst verhältnismäßig kurzen Verfügbarkeit günstiger, kompakter und gleichzeitig leistungsfähiger AR-Systeme wurden Hürden bei der Integration der AR-Technologie in etablierte, CAD-basierte Arbeitsabläufe in der Produktentwicklung als Herausforderung für einen produktiven Einsatz in der Entwicklungspraxis identifiziert. Dieser steht gerade in kleineren Unternehmen oft noch aus (IDG Research Services, 2019). Es lässt sich daher annehmen, dass ein umfangreiches Erfahrungswissen sowie etablierte Vorgehensweisen zum Einsatz der AR-Technologie in der Produktvalidierung in der Entwicklungspraxis in der Regel nicht vorhanden sind.

Gleichwohl erfordert die Nutzung der im Stand der Forschung beschriebenen Potenziale aus der Anwendung der AR-Technologie zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte speziell in der Frühen Phase der Produktentwicklung ein entsprechendes Vorwissen der beteiligten Produktentwickler (Schilling, 2008). Dies betrifft zum einen deren Kenntnis über geeignete Anwendungsfälle der AR-Technologie in der Produktvalidierung. Darüber hinaus ist ausreichendes Wissen über das Vorgehen zur bedarfsgerechten Konfiguration und den Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen sowie zur Durchführung und Auswertung von Kundentests in AR-Umgebungen erforderlich. Angesichts der fehlenden Erfahrungen im Einsatz der AR-Technologie in der Entwicklungspraxis folgt daraus der Bedarf an einer durchgängigen methodischen Unterstützung von Produktentwicklern und Produktentwicklungsteams. Vor diesem Hintergrund wird die folgende Forschungshypothese formuliert, die dem Forschungsziel dieser Arbeit zugrunde liegt:

Forschungshypothese

Ein methodisches Vorgehen ermöglicht die Nutzung von Potenzialen aus der Anwendung der Augmented-Reality-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung und damit insbesondere die Reduktion der für diese Phase charakteristischen hohen marktlichen Unsicherheit.

Der Einsatz der AR-Technologie im Rahmen kundenintegrierter Validierungsaktivitäten zur Präferenzmessung ist nach dem derzeitigen Stand der Forschung nur schwach methodisch unterstützt. Die in der Literatur dokumentierten und im Stand der Forschung vorgestellten Beispiele für Anwendungen der Augmented-Reality-Technologie in der Produktentwicklung beschränken sich überwiegend auf die Beschreibung der verwendeten AR-Systeme in Form von Hard- und Softwarekomponenten sowie das Aufzeigen möglicher Potenziale für die Entwicklungspraxis. Es finden sich lediglich vereinzelte Ansätze zur methodischen Unterstützung in der Literatur, die sich jedoch entweder auf einzelne, wenige Aspekte des Vorgehens zur AR-gestützten Validierung beschränken, oder aber auf die Unterstützung beim Einsatz der in der Entwicklungspraxis bereits weiter verbreiteten Virtual-Reality-Technologie abzielen.

Zu ersteren zählen die Arbeiten von Bordegoni et al. (2009) und von Schilling (2008). Bordegoni et al. (2009) entwickeln ein Framework zur Klassifizierung von Anwendungsfällen der AR-Technologie in der Produktentwicklung entlang des Virtualitätsgrades von AR-Prototyp und Anwender. Schilling (2008) wiederum entwickelt eine Konfigurationssystematik zur Auswahl geeigneter Komponenten von AR-Systemen für verschiedene Anwendungen in der Produktentwicklung. Ansätze zur methodischen Unterstützung beim Einsatz der VR-Technologie finden sich bei Rademacher

et al. (2014) und bei Katičić (2012). Rademacher et al. (2014) entwickeln ein Vorgehensmodell zur Beurteilung der Verwendbarkeit von VR für verschiedene Aufgaben im automobilen Produktentwicklungsprozess. Katičić (2012) beschreibt ein durchgängiges methodisches Vorgehen zum Einsatz der VR-Technologie zur Produktvalidierung, das jedoch ausschließlich auf die emotionale Präferenzmessung abzielt.

Vor dem Hintergrund des beschriebenen Forschungsbedarfs soll in dieser Arbeit ein methodisches Vorgehen in Form einer Systematik zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE entwickelt werden. Die Systematik soll Produktentwickler und Produktentwicklungsteams entlang des gesamten Vorgehens zur AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung zur Präferenzmessung unterstützen. Die Systematik soll dazu gezielt Erkenntnisse etablierter Modelle der KaSPro, insbesondere des Modells der PGE, des IPEK-XiL-Ansatzes und von Produktprofilen aufgreifen und für die Validierung in AR-basierten Validierungsumgebungen in der Entwicklungspraxis nutzbar machen. Entsprechend der formulierten Forschungshypothese soll die Systematik auf diese Weise die Nutzung von Potenzialen aus der Anwendung der Augmented-Reality-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Frühen Phase ermöglichen. Dabei zielt die Systematik insbesondere darauf ab, durch den strukturierten, methodisch unterstützten Einsatz der AR-Technologie eine Reduktion der für die Frühe Phase charakteristischen hohen marktlichen Unsicherheit zu erreichen.

3.2 Forschungsfragen

Ausgehend vom identifizierten Forschungsbedarf werden fünf Forschungsfragen formuliert. Die Forschungsfragen dienen der Operationalisierung der Zielsetzung und sollen im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden:

Forschungsfragen

- FF1: Wie wird die AR-Technologie in der Entwicklungspraxis zur Produktvalidierung in der Frühen Phase eingesetzt?
- FF2: Welche Potenziale hat der Einsatz der AR-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Entwicklungspraxis?
- FF3: Welche Anforderungen sind an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu stellen?

- | | |
|------|---|
| FF4: | Wie ist eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu gestalten? |
| FF5: | Welchen Beitrag kann die Systematik hinsichtlich der definierten Anforderungen leisten, um insbesondere bei der Reduktion der marktlichen Unsicherheit zu unterstützen? |

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen sowie ihre Einordnung in den Aufbau der Arbeit wird im folgenden Kapitel 4 beschrieben.

4 Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird das wissenschaftliche Vorgehen zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen beschrieben. Das Vorgehen ist angelehnt an die Forschungsmethodik *Design Research Methodology (DRM)*, die in Kapitel 4.1 allgemein beschrieben und auf diese Arbeit übertragen wird. In Kapitel 4.2 werden anschließend die im Rahmen der Arbeit verwendeten empirischen Methoden eingeführt.

4.1 Einordnung in die Design Research Methodology

Die DRM geht auf Blessing & Chakrabarti (2009) zurück und wurde mit dem Ziel entwickelt eine systematische und allgemeingültige Struktur für Forschungsarbeiten speziell aus dem Bereich der anwendungsorientierten Methodenforschung in der Produktentwicklung zur Verfügung zu stellen. Den Kern der DRM bildet ein Vorgehensmodell, das das Forschungsvorgehen in vier Phasen untergliedert (Blessing & Chakrabarti, 2009):

- Die *Klärung des Forschungsgegenstands* stellt die erste Phase im Vorgehensmodell der DRM dar. Sie dient der Einordnung des Forschungsthemas in den Stand der Forschung sowie der Ableitung von Zielsetzung und Forschungsfragen.
- In der *Deskriptiven Studie I (DS I)* wird das Verständnis des Forschungsgegenstands anhand von weitergehenden, mitunter empirischen Analysen vertieft. Auf Basis der Untersuchungen werden Anforderungen an die zu entwickelnde Methode abgeleitet.
- Im Rahmen der *Präskriptiven Studie (PS)* wird anschließend die Methode zur Unterstützung der Produktentwicklung entwickelt. Die Entwicklung der Methode erfolgt vor dem Hintergrund der geforderten Unterstützungsleistung, deren Erfüllung bereits während der Präskriptiven Studie im Zuge der sogenannten *Support Evaluation* zu überprüfen ist.
- Die entwickelte Methode wird abschließend in der *Deskriptiven Studie II (DS II)* evaluiert. Die Evaluation erfolgt dabei hinsichtlich der Erfüllung der Anwendbarkeit der Methode (*Application Evaluation*) und des Erfolgsbeitrags der Methode (*Success Evaluation*).

Die vier generischen Phasen können je nach Art der Forschungsarbeit in unterschiedlichem Umfang durchlaufen werden. Blessing & Chakrabarti (2009) unterscheiden dabei zwischen einer rein literaturbasierten Studie, einer umfassenden Studie sowie einer initialen Studie. Durch die verschiedenartige Kombination dieser Ausprägungen ergeben sich sieben mögliche Typen von Forschungsprojekten in der Produktentwicklungsforschung (vgl. Abbildung 4.1).

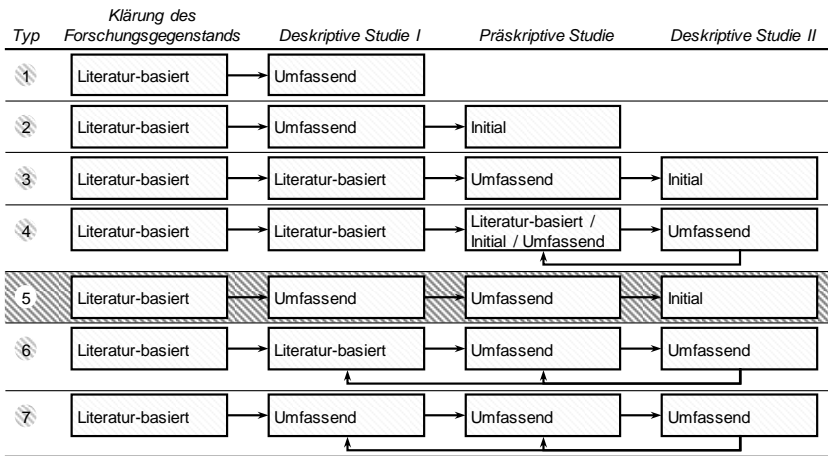
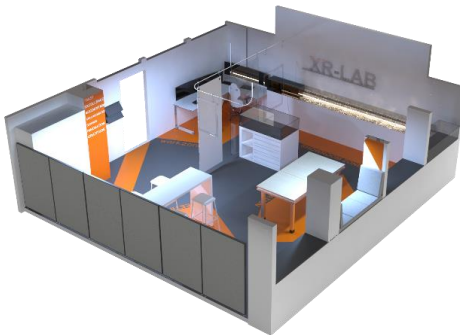


Abbildung 4.1: Mögliche Typen von Forschungsprojekten in der Produktentwicklungsforschung nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 18)

Die Vorgehensweise, die im Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekts verfolgt wurde, entspricht der des fünften Projekttyps. Zur Klärung des Forschungsgegenstands wurde der relevante Stand der Forschung anhand einer Literaturanalyse dargelegt (Kapitel 2). Darauf aufbauend wurden die Zielsetzung sowie die Forschungsfragen abgeleitet (Kapitel 3). Der Stand der Forschung war gleichzeitig Grundlage für die durchgeführte Deskriptive Studie I (Kapitel 5). Anhand von drei empirischen Studien wurde darin das Verständnis für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase vertieft. In zwei Fragebogen-Studien (Kapitel 5.1 und 5.2) wurden dabei zunächst die Forschungsfragen FF1 und FF2 untersucht. Anschließend wurde in einer Delphi-Befragung (Kapitel 5.3) die Forschungsfrage FF3 beantwortet.

In der Präskriptiven Studie wurde eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE entwickelt und in diesem Zuge die Forschungsfrage FF4 adressiert (Kapitel 6). Für die Präskriptive Studie wurde ein iterativ-explorativer Ansatz gewählt. Diesem Ansatz folgend wurden jeweils Teile der Systematik nacheinander im Verlauf einer begleitenden praktischen Anwendung entwickelt. Als Anwendungsfälle dienten dazu sowohl AR-gestützte Validierungsstudien in Kooperation mit verschiedenen Unternehmen als auch AR-Prototypen, die speziell zu Forschungszwecken aufgebaut wurden. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des Forschungsprojekts ein Labor („IPEK XR-Lab“) eingerichtet und mit geeigneten Hardware- und Softwaresystemen ausgestattet, die den Aufbau und die Exploration unterschiedlicher AR-Szenen ermöglichen (vgl. Abbildung 4.2).



IPEK XR-Lab

- AR-/VR-Hardware (inkl. Microsoft® HoloLens™, HTC® Oculus Rift™, Tablets)
- Software für 3D-Modellierung, Texturierung, Simulation, Animation, Rendering, Software-/Szenenentwicklung
- Workstations mit leistungsstarken Grafikprozessoren für Erstellung und Pre-Rendering virtueller Szenen
- Höhenverstellbares Podest für flexible Positionierung physischer und virtueller Modelle
- Tageslicht-Studieleuchten mit Diffusor zur schattenarmen Ausleuchtung
- Sammlung AR-basierter Referenzmodelle

Abbildung 4.2: Ausstattung des IPEK XR-Lab

Die entwickelte Systematik wurde abschließend im Rahmen der Deskriptiven Studie II in drei Fallstudien angewandt und evaluiert (Kapitel 7). Dies zielte auf die Beantwortung der Forschungsfrage FF5 sowie auf die Ableitung zukünftiger Forschungsbedarfe zur Weiterentwicklung der Systematik. Für die Evaluation kamen in den Fallstudien fragebogengestützte Umfragen sowie eine Dokumentenanalyse zum Einsatz.

Das forschungsmethodische Vorgehen im Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekts entlang der vier Phasen der DRM ist in Abbildung 4.3 zusammenfassend dargestellt. Die Abbildung ordnet jeder DRM-Phase jeweils die

DRM-Phase	Kapitel	Forschungsinhalte	Zielsetzung	Empirische Methoden
Klärung des Forschungsgegenstands	1	Einleitung	<ul style="list-style-type: none"> Motivation 	Literatur-recherche
	2	Grundlagen und Stand der Forschung	<ul style="list-style-type: none"> Forschungslücke 	
	3	Zielsetzung	<ul style="list-style-type: none"> Forschungsbedarf Forschungsfragen 	
	4	Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> Forschungsdesign 	
DS I	5	Untersuchung der Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase	<ul style="list-style-type: none"> Vertieftes Verständnis für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase in der Entwicklungspraxis Anforderungen an die Systematik 	Interview, Umfrage, Delphi-Befragung
PS	6	Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase	<ul style="list-style-type: none"> Unterstützung entlang des gesamten Vorgehens zur AR-gestützten kundenintegrierten Produktvalidierung im Sinne der Präferenzmessung 	-
DS II	7	Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> Evaluation der Systematik 	Interview, Umfrage, Dokumenten-analyse
	8	Zusammenfassung und Ausblick	<ul style="list-style-type: none"> Identifikation weiterführender Forschungsarbeiten 	-

Abbildung 4.3: Einordnung der Arbeit in die Design Research Methodology

zugehörigen Forschungsinhalte des Forschungsprojekts, die verfolgte Zielsetzung sowie die verwendeten empirischen Methoden zu. Die empirischen Methoden werden im folgenden Kapitel 4.2 näher beschrieben.

4.2 Empirische Methoden

Zur Beantwortung der Forschungsfragen kamen im Rahmen der Deskriptiven Studie I sowie der Deskriptiven Studie II eine Reihe empirischer Methoden zum Einsatz. Empirische Methoden dienen in der Produktentwicklungsforschung der systematischen Erhebung und Auswertung von Daten aus Fallstudien, Experimenten und realen Entwicklungsprozessen (Marxen, 2014). Neben Erhebungs- und Auswertungsmethoden lassen sich nach der Art der behandelten Daten zudem qualitative und quantitative Methoden voneinander unterscheiden (Heiser, 2018). Im Rahmen des Forschungsprojekts, das dieser Arbeit zugrunde liegt, wurden zum Teil in Kombination miteinander semistrukturierte Interviews, fragebogengestützte Umfragen,

eine Delphi-Befragung sowie Dokumentenanalysen eingesetzt. Zur Auswertung der erhobenen Daten kamen zudem statistische Verfahren zum Einsatz. Die verwendeten empirischen Methoden sind im Folgenden beschrieben.

4.2.1 Interview

Interviews zählen zu den verbreitetsten Methoden zur Erhebung empirischer Daten (Marxen, 2014). Sie zielen meist darauf ab, persönliche Meinungen, Einschätzungen und implizites Wissen von Personen und insbesondere von Experten zu erschließen. In diesem Fall wird auch von einem Experteninterview gesprochen (Heiser, 2018). Die Quantität und Qualität der in einem Interview erhobenen Daten hängt wesentlich von den Interviewfragen ab, die der interviewten Person vom Interviewer gestellt werden (Marxen, 2014). In der Literatur werden verschiedene Grundsätze beschrieben, die bei der Formulierung von Interviewfragen zu beachten sind. So weist etwa Atteslander (2010) darauf hin, dass Interviewfragen stets möglichst kurz, konkret und jeweils auf einen einzelnen Sachverhalt bezogen zu stellen sind. Weiterhin sollen sie in einer möglichst neutralen Sprache formuliert sein und in keiner Weise gewünschte oder antizipierte Antworten implizieren.

Je nachdem zu welchem Grad die Interviewfragen bereits im Vorfeld des Interviews festgelegt sind, wird zwischen unstrukturierten, semistrukturierten und strukturierten Interviews unterschieden. Während bei unstrukturierten Interviews nur das Thema des Interviews vorgegeben ist, werden bei strukturierten Interviews sowohl die Interviewfragen sowie auch deren Reihenfolge und ggf. die Antwortkategorien im Vorfeld festgelegt. Die Interviewfragen werden dabei zusammen mit dem geplanten Ablauf des Interviews in einem sogenannten Interviewleitfaden festgehalten. Strukturierte Interviews haben gegenüber unstrukturierten Interviews den Vorteil, dass empirische Daten schneller erhoben werden können und sich leichter zwischen verschiedenen befragten Experten vergleichen lassen. Sie erfordern jedoch ein signifikantes Vorwissen des Interviewers und lassen wenig Spielraum, um den Verlauf des Interviews an die gegebenen Antworten anzupassen. Als Alternative zu strukturierten und unstrukturierten Interviews bieten sich semistrukturierte Interviews an, in denen zwar die Interviewfragen, nicht jedoch ihre Reihenfolge und die Antwortmöglichkeiten festgelegt werden. Sie ermöglichen einen strukturierten Interviewverlauf, der sich gleichzeitig flexibel an die gegebenen Antworten anpassen lässt. (Atteslander, 2010; Heiser, 2018; Marxen, 2014)

Das Ergebnis eines Interviews liegt in der Regel zunächst in Form eines Transkripts vor. Für dessen Auswertung werden Methoden der sogenannten qualitativen Inhaltsanalyse herangezogen. Dabei werden in einem ersten Schritt die relevanten

Aussagen aus dem Transkript extrahiert und in einem zweiten Schritt kategorisiert. (Heiser, 2018)

In dieser Arbeit wird zur Beantwortung der Forschungsfrage FF3 ein semistrukturiertes Interview im Rahmen einer Delphi-Befragung (vgl. Kapitel 4.2.3) eingesetzt.

4.2.2 Umfrage

Ähnlich eines strukturierten Interviews zielen Umfragen darauf ab, Meinungen und Einschätzungen von befragten Personen zu einer Reihe vordefinierter Fragen zu erheben. Im Gegensatz zu Interviews erfordern Umfragen dabei nicht die Anwesenheit eines Interviewers, sondern werden mithilfe von Fragebögen durchgeführt, die den interviewten Personen meist in physischer oder digitaler Form zur Verfügung gestellt werden. Umfragen eignen sich damit insbesondere zur Befragung einer größeren Anzahl von Personen. (Marxen, 2014)

Neben den Fragen sind in fragebogengestützten Umfragen häufiger als in Interviews auch die Antwortmöglichkeiten vorgegeben. Fragen dieser Art werden auch als geschlossene Fragen bezeichnet und damit von offenen Fragen abgegrenzt, bei denen die Antwortmöglichkeiten nicht vorgegeben sind (Hollenberg, 2016). Geschlossene Fragen ermöglichen die quantitative Auswertung der erhobenen empirischen Daten mithilfe statistischer Verfahren. Die dafür infrage kommenden Verfahren hängen insbesondere von der Art der Skalierung der Antwortmöglichkeiten ab. Dabei werden drei Stufen der Skalierbarkeit, sogenannte Skalenniveaus unterschieden (Hollenberg, 2016; Marxen, 2014):

- *Nominalskalen* erlauben lediglich die Unterscheidung verschiedener Antwortmöglichkeiten. Es ist dagegen nicht möglich sie in eine Reihenfolge zu bringen (Beispiel: männlich, weiblich). Normalskalierte Variablen lassen sich im Zuge der Auswertung anhand ihres Modus beschreiben. Dieser bezeichnet bei einer Umfrage die Antwortmöglichkeit zu einer Frage, die am häufigsten genannt wurde.

- *Ordinalskalen* erlauben neben der Unterscheidung der Antwortmöglichkeiten auch die Bildung einer Rangfolge (Beispiel: klein, mittel, groß). Der Abstand zwischen zwei Antwortmöglichkeiten ist auf einer Ordinalskala jedoch nicht definiert. Häufig wird den Antwortmöglichkeiten auf einer Ordinalskala trotzdem eine Zahl zugeordnet (Beispiel: 1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = befriedigend, etc.). Diese Zahl dient dabei lediglich der einfacheren Handhabung der erhobenen empirischen Daten und lässt nicht auf gleiche Abstände zwischen den Antwortmöglichkeiten schließen. Ordinalskalen werden daher auch als semiquantitative Skalen bezeichnet. Ordinalskalierte Variablen lassen sich neben dem Modus auch anhand ihres Medians beschreiben. Aufgrund der nicht definierten Abstände ist die Bildung des arithmetischen Mittelwerts jedoch nicht zulässig.
- *Kardinalskalen* erlauben die Bestimmung des Abstands zweier Antwortmöglichkeiten und eignen sich damit zur Skalierung quantitativer Variablen (Beispiel: 1 Jahr, 2 Jahre, 3 Jahre). Kardinalskalierte Variablen lassen sich anhand ihres Modus, Medians sowie ihres Mittelwerts beschreiben.

Ein häufig zur Messung persönlicher Einstellungen mithilfe fragebogengestützter Umfragen eingesetztes Verfahren ist die sogenannte Likert-Skala. Die einzelnen Items des Fragebogens sind nach diesem Verfahren nicht in Form von Fragen, sondern vielmehr in Form von Aussagen vom sogenannten Likert-Typ formuliert. Die Antwortmöglichkeiten sind ordinalskaliert und drücken den Grad der Zustimmung oder Ablehnung der befragten Person aus (Beispiel: stimme voll und ganz zu, stimme eher zu, stimme eher nicht zu, stimme überhaupt nicht zu). Um eine Tendenz der befragten Personen zur mittleren Antwortmöglichkeit zu vermeiden, wird in der Literatur mitunter eine gerade Anzahl an Abstufungen empfohlen (Marxen, 2014). (Hollenberg, 2016)

Umfragen dienen oft nicht allein der Erhebung von Meinungen einzelner Personen, sondern vielmehr ganzer Gruppen. Handelt es sich dabei um große Gruppen, wie etwa ganzer Bevölkerungsteile, werden in der Praxis in der Regel Personen aus einer Stichprobe befragt, um von deren Antworten auf die Meinung der jeweiligen Grundgesamtheit zu schließen. Sofern die befragten Personen nach dem Zufallsprinzip aus der Grundgesamtheit ausgewählt werden, handelt es sich um eine sogenannte Zufallsstichprobe. Um zu gewährleisten, dass die Ergebnisse aus der Befragung von Personen aus der Zufallsstichprobe repräsentativ für die Grundgesamtheit sind, ist ein ausreichend großer Stichprobenumfang erforderlich (Hollenberg, 2016). Dieser notwendige Umfang n der Zufallsstichprobe ergibt sich wie folgt (Mayer, 2013):

$$n \geq \frac{t^2 N p(1-p)}{t^2 p(1-p) + d^2 (N-1)} \quad (7)$$

Dabei entspricht N dem Umfang der Grundgesamtheit. Da sich die errechnete Mindestgröße der Stichprobe ab einer Grundgesamtheit von 20.000 nur noch geringfügig ändert, wird bei einer unbekanntem, großen Grundgesamtheit oft dieser Wert angenommen. t ist der sogenannte Sicherheitsfaktor, der in Abhängigkeit des Konfidenzniveaus bestimmt wird. Bei einem gängigen Konfidenzniveau von 95% ergibt sich $t \approx 1,96$. p ist ein Maß für die zu erwartende Streuung der Antworten. Ist diese nicht bekannt, weil eine Umfrage etwa zum ersten Mal durchgeführt wird, wird in der Regel $p = 50\%$ angenommen. d ist der akzeptierte Stichprobenfehler, der in der Praxis meist mit $d = 5\%$ angesetzt wird. (Hollenberg, 2016; Mayer, 2013)

Als Alternative zu zufällig gezogenen Stichproben haben sich in der Praxis der Markt- und Meinungsforschung sogenannte Quotenstichproben etabliert. Dabei werden zunächst eine Reihe von Kontrollmerkmalen ausgewählt, die im Zusammenhang mit dem Antwortverhalten der befragten Personen stehen. Für die Zusammensetzung der Stichprobe werden anschließend Quoten für jedes Kontrollmerkmal sowie für die Kombination verschiedener Kontrollmerkmale vorgegeben, die der Verteilung in der Grundgesamtheit entsprechen. Gängige Kontrollmerkmale sind etwa das Geschlecht, das Alter, der Beruf oder die Herkunftsregion. Einheitliche Empfehlungen für die Größe einer Quotenstichprobe finden sich in der Literatur nicht. Generell gilt aber, dass der Stichprobenumfang umso kleiner gewählt werden kann, je genauer die Zusammensetzung der Grundgesamtheit durch die Quoten relevanter Kontrollmerkmale in der Stichprobe abgebildet wird. (Meier & Hansen, 1999)

Fragebogengestützte Umfragen werden in dieser Arbeit zur Beantwortung der Forschungsfragen FF1, FF2, FF3 und FF5 herangezogen. Neben einfachen deskriptiven statistischen Operatoren wie dem Modus, Median und Mittelwert kommen dabei zum Teil weitere statistische Testverfahren zur quantitativen Auswertung der Umfrageergebnisse zum Einsatz. Umfangreiche Ausführungen zu verschiedenen statistischen Methoden der Datenanalyse finden sich etwa bei Hahs-Vaughn & Lomax (2020), Dodge (2008), Sheskin (2007) oder bei Anderson & Finn (1996).

4.2.3 Delphi-Befragung

Die Delphi-Befragung ist ein spezielles Verfahren zur Erhebung von Experteneinschätzungen. Delphi-Befragungen existieren in verschiedenen Varianten. Ihnen gemein ist, dass die Befragung der beteiligten Experten in mehreren Stufen erfolgt. Dazu werden die ausgewerteten und aggregierten Ergebnisse einer ersten Befragungsrunde denselben oder aber anderen Experten in einer weiteren Befragung zur

Bewertung vorgelegt. Dies kann so lange wiederholt werden bis etwa eine gewünschte Stabilität der erhaltenen Antworten erreicht ist. Delphi-Befragungen in der Praxis beschränken sich dabei jedoch häufig auf zwei Durchgänge. Für die verschiedenen Befragungsstufen können unterschiedliche qualitative und quantitative empirische Methoden zur Datenerhebung, wie etwa Interviews und Umfragen, zum Einsatz kommen. Zu den Einsatzbereichen von Delphi-Befragungen zählt nach Häder (2019) neben der Prognose zukünftiger Entwicklung auf einem bestimmten Gebiet auch die Identifikation und Konkretisierung von Forschungsbedarfen. (Häder, 2019)

In dieser Arbeit wird eine zweistufige Delphi-Befragung zur Beantwortung der Forschungsfrage FF3 eingesetzt. Die beteiligten Experten werden dabei in der ersten Stufe in einem semistrukturierten Interview und in der zweiten Stufe mithilfe einer Umfrage befragt.

4.2.4 Dokumentenanalyse

Anstelle von eigens erhobenen empirischen Daten besteht insbesondere in der prozessorientierten Produktentwicklungsforschung die Möglichkeit zur Auswertung bereits vorhandener Daten. Als solche kommen verschiedenste Artefakte infrage, die während des Produktentwicklungsprozesses generiert werden. Hierzu zählen etwa Skizzen, E-Mails, Protokolle, Präsentationen, Anforderungslisten, Prototypen sowie sonstige physische oder digitale Dokumente und Produktmodelle. Das Vorgehen zur Auswertung vorhandener Dokumente unterscheidet sich dabei stark je nach Art des Dokuments und der darin enthaltenen Daten. Zur Analyse dokumentierter Kommunikationsflüsse etwa in Form von E-Mails oder Protokollen bieten sich ähnlich wie bei Transkripten von Interviews die Methoden der qualitativen Inhaltsanalyse an (vgl. Kapitel 4.2.1). Quantitative Daten aus vorhandenen Dokumenten lassen sich hingegen oft direkt mithilfe statistischer Operatoren und Verfahren auswerten. (Marxen, 2014)

In dieser Arbeit wird die Analyse quantitativer Daten aus einem im Produktentwicklungsprozess dokumentierten Zielsystem zur Beantwortung der Forschungsfrage FF5 herangezogen.

5 Untersuchung der Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase

In diesem Kapitel wird das Verständnis für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase anhand der Ergebnisse aus drei empirischen Studien weiter vertieft. Kapitel 5.1 beschreibt zunächst die Ergebnisse einer fragebogengestützten Umfrage unter deutschen Industrieunternehmen zur Untersuchung des Einsatzes der AR-Technologie zur Produktvalidierung in der Entwicklungspraxis. In Kapitel 5.2 werden die Ergebnisse einer weiteren empirischen Studie dargelegt, die auf die Bewertung der Potenziale durch den Einsatz AR-basierter Prototypen in der Frühen Phase abzielt. Schließlich werden in Kapitel 5.3 die Ergebnisse einer Delphi-Befragung zur Ermittlung von Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik beschrieben.

5.1 Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung in der Frühen Phase in der Entwicklungspraxis

Im ersten Teil der Deskriptiven Studie I wird näher untersucht, wie die AR-Technologie in der Entwicklungspraxis zur Produktvalidierung in der Frühen Phase eingesetzt wird. Zu diesem Zweck wurde eine fragebogengestützte Umfrage unter deutschen Industrieunternehmen durchgeführt. Anhand der Umfrage wird zunächst ein Eindruck davon vermittelt, welche Bedeutung Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase in der Entwicklungspraxis einnehmen und welche empfundenen Herausforderungen mit ihnen verbunden sind. Weiterhin wird die Erfahrung der Umfrageteilnehmer im Einsatz der AR-Technologie, ihre Einschätzung der Potenziale der AR-Technologie in der Produktvalidierung sowie des damit einhergehenden Unterstützungsbedarfs dargelegt. Die Umfrage adressiert damit die Forschungsfragen FF1 und FF2:

- | | |
|------|---|
| FF1: | Wie wird die AR-Technologie in der Entwicklungspraxis zur Produktvalidierung in der Frühen Phase eingesetzt? |
| FF2: | Welche Potenziale hat der Einsatz der AR-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Entwicklungspraxis? |

Der Aufbau und die Ergebnisse der Umfrage sind im Folgenden beschrieben. Die Umfrageergebnisse wurden in Ausschnitten zudem bereits bei Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019), Albers, Reinemann, Hirschter et al. (2019) und Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019) veröffentlicht. Die operative Durchführung und Auswertung der Umfrage erfolgte zum Teil im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Humpert (2018)¹ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurde.

5.1.1 Studiendesign

Die Umfrage wurde mithilfe eines anonymen Online-Fragebogens durchgeführt, der an Alumni und aktive Projektpartner des IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Deutschland verschickt wurde. Die Umfrage wurde im Zeitraum von August bis Oktober 2018 durchgeführt. An der Online-Umfrage nahmen insgesamt 84 Personen teil. In 66 Fällen wurden alle Fragen vollständig beantwortet. Für die Auswertung der Umfrage wurden ausschließlich die 66 vollständig beantworteten Fragebögen berücksichtigt.

Der Fragebogen besteht aus 12 Fragen mit unterschiedlich skalierten Antwortmöglichkeiten. Für Fragen nach der Zustimmung der Befragten zu verschiedenen Aussagen vom Likert-Typ wurden ordinale Antwortskalen mit vier Ausprägungen verwendet. Die Auswertung dieser Fragen erfolgt durch Angabe der relativen Antworthäufigkeiten in Prozent. Für die Frage nach der Relevanz verschiedener Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten wurde eine Kardinalskalierung der fünfstufigen Antwortskala angenommen. Zur Auswertung dieser Frage wird der arithmetische Mittelwert herangezogen. Bei allen Fragen war eine Enthaltung durch die Auswahl der zusätzlichen Antwortmöglichkeit „Kann ich nicht sagen“ möglich. Die relative Häufigkeit dieser Antwort ist in der Auswertung in der Regel nicht ausgewiesen. Sie entspricht der Differenz der ausgewiesenen Häufigkeiten zu 100%.

Zur Charakterisierung der Stichprobe wurden am Anfang des Online-Fragebogens vier Fragen zur Branche, der Unternehmensgröße sowie dem individuellen Tätigkeitsbereich und der Dauer der Unternehmenszugehörigkeit der Befragten gestellt. Ca. 70% der Umfrageteilnehmer sind in ihrem Unternehmen im Bereich der Produktentwicklung tätig (inkl. Vorentwicklung, Serienentwicklung, Test/Validierung). Die restlichen ca. 30% verteilen sich auf die Bereiche IT (4,5%), Produktion (3%), Einkauf, Vertrieb und Unternehmensleitung (je 1,5%) sowie sonstige Geschäftsbe-

¹ Unveröffentlichte Masterarbeit

reiche. Etwa die Hälfte der Befragten arbeitet seit 1 bis 3 Jahren für ihr Unternehmen, wiederum ca. 20% seit weniger als einem Jahr, ca. 15% seit 3 bis 5 Jahren, ca. 10% seit 5 bis 10 Jahren und ca. 5% seit mehr als 10 Jahren. Unter den Teilnehmern der Umfrage sind Mitarbeiter aus Unternehmen verschiedener Branchen, wobei Automobilhersteller und -zulieferer einen Anteil von 70% einnehmen. Unternehmen mit mehr als 5.000 Mitarbeitern nehmen in der Stichprobe mit 62% den größten Anteil ein. 8% der Befragten arbeiten in Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern. Die Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Branchen sowie nach Unternehmensgröße ist in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 dargestellt.

<i>Branche</i>	<i>Anteil (in Prozent)</i>
Automobilhersteller	52
Automobilzulieferer	18
Maschinen- und Anlagenbau	9
Elektronik / Elektrotechnik	6
Metallbe- und verarbeitung	3
Sonstige	12

Abbildung 5.1: Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Branchen (n = 66)

<i>Unternehmensgröße (Anzahl Mitarbeiter)</i>	<i>Anteil (in Prozent)</i>
> 5.000	62
1.000 - 5.000	14
250 - 999	17
50 - 249	5
< 50	3

Abbildung 5.2: Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Unternehmensgröße (n = 66)²

Die Charakterisierung der Stichprobe legt nahe, dass große Unternehmen der Automobilindustrie sowie Mitarbeiter mit einer kurzen Unternehmenszugehörigkeit in

² Die Summe der Prozentwerte entspricht aufgrund von Rundungsdifferenzen nicht 100%.

der Stichprobe überrepräsentiert sind. Dies gilt unter der Annahme, dass die Grundgesamtheit der Menge der Produktentwickler in deutschen Industrieunternehmen entspricht. Aufgrund der weitgehend unbekanntem Zusammensetzung der Grundgesamtheit wurde dennoch auf die Gewichtung der Stichprobe hinsichtlich der ermittelten Stichprobenmerkmale verzichtet. Gleichwohl ist die Charakterisierung der Stichprobe bei der Interpretation der Umfrageergebnisse zu bedenken.

5.1.2 Studienergebnisse

Im Stand der Forschung wurde die besondere Bedeutung früher und kontinuierlicher Validierungsaktivitäten für den wirtschaftlichen Erfolg eines Entwicklungsprojekts dargelegt und gleichzeitig auf die besonderen Herausforderungen hingewiesen, die mit der Frühen Phase im Allgemeinen und frühen Validierungsaktivitäten im Speziellen einhergehen (vgl. Kapitel 2.2.3 und Kapitel 2.3.4). Abbildung 5.3 zeigt die Zustimmung der Umfrageteilnehmer zu verschiedenen Aussagen zur Rolle der Produktvalidierung in der Frühen Phase, die in Anlehnung an den Stand der Forschung formuliert wurden. Demnach wird die Einschätzung zur Relevanz früher Validierungsaktivitäten aus der Literatur auch in der Entwicklungspraxis von einer Mehrheit der Umfrageteilnehmer geteilt. So stimmen 98% der Befragten der Aussagen voll und ganz oder eher zu, wonach frühe Validierungsaktivitäten ein wichtiger Bestandteil von Entwicklungsprozessen sind (A1). Bezogen auf agile Entwicklungsprozesse erreicht der Anteil der Befragten, die der Aussage voll und ganz zustimmen einen noch höheren Wert (A2). Der potenzielle Nutzen früher Validierungsaktivitäten wird in den folgenden Aussagen A3 bis A8 weiter spezifiziert. Alle diese Aussagen erreichen Zustimmungswerte von jeweils mindestens 76%. Ein besonders hoher Anteil der Befragten stimmt dabei dem Beitrag früher Validierungsaktivitäten zur Konkretisierung der Entwicklungsziele (A5), zur Ausrichtung der Entwicklungsziele an den Anforderungen von Kunden und Anwendern (A6) sowie zur Vermeidung von späten Änderungen im Entwicklungsprozess (A8) zu. Trotz der breiten Zustimmung zur Relevanz und zum positiven Beitrag von Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase, stimmen 82% der Umfrageteilnehmer der Aussage zu, wonach frühe Validierungsaktivitäten in der Entwicklungspraxis oft vernachlässigt werden (A13). Gleichzeitig stimmen 67% der Umfrageteilnehmer zu, dass die Randbedingungen der Frühen Phase die Durchführung früher Validierungsaktivitäten erschweren (A12).

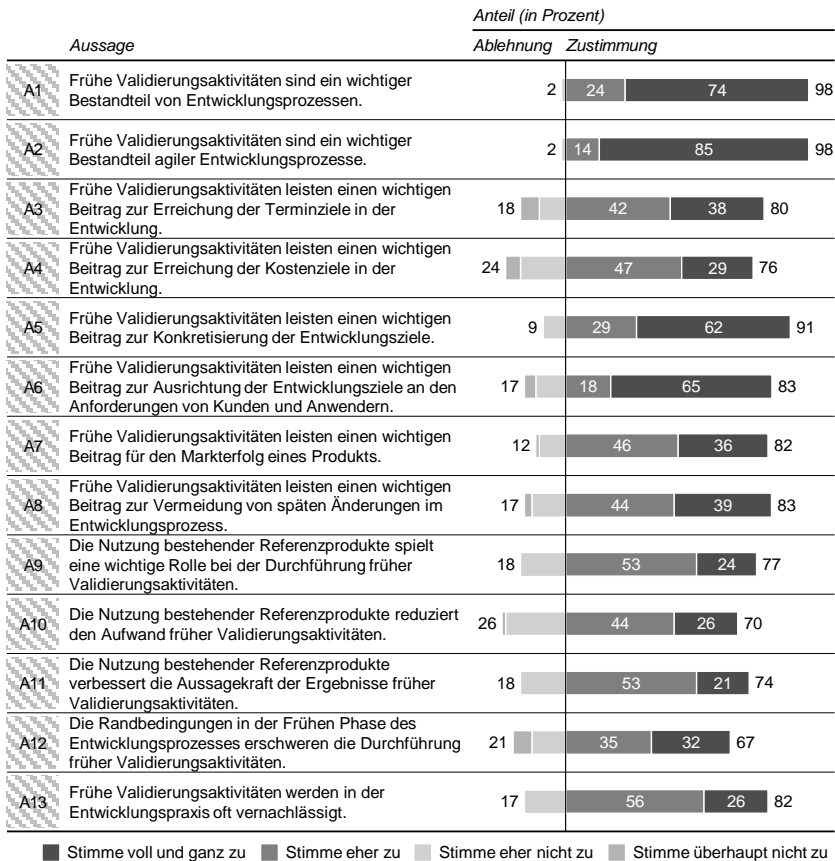


Abbildung 5.3: Umfrageergebnisse zu Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase der Produktentwicklung (n = 66)³

Um das Verständnis der in der Entwicklungspraxis empfundenen Herausforderungen bei der Durchführung von Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase der Produktentwicklung zu vertiefen, wurden die Umfrageteilnehmer gebeten, verschiedene mögliche Herausforderungen nach ihrer Relevanz zu bewerten. Abbildung 5.4

³ Aufgrund von Rundungsdifferenzen kann die Summe der einzelnen Positionen von der angegebenen Summe abweichen.

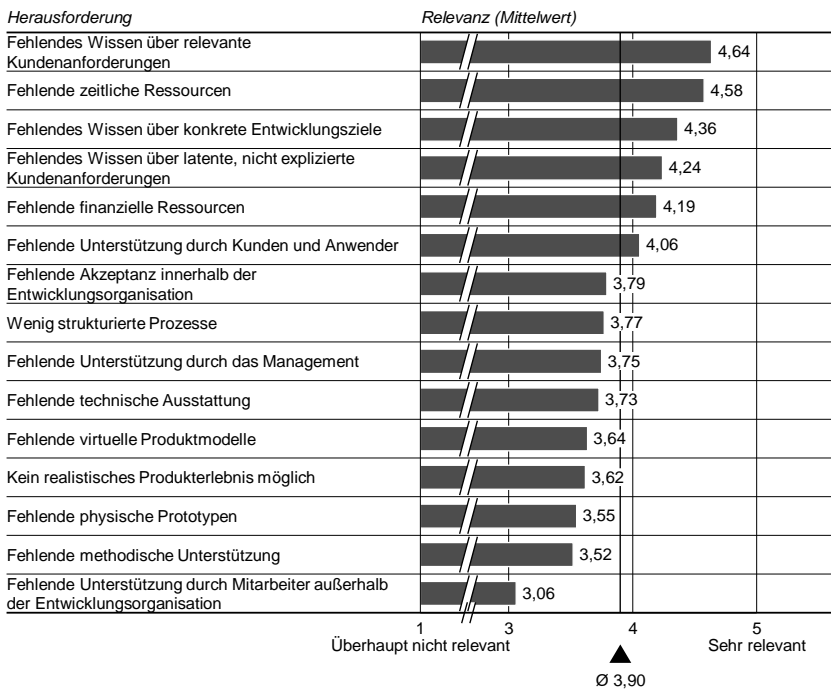


Abbildung 5.4: Umfrageergebnisse zu Herausforderungen von Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase der Produktentwicklung (n = 66)

zeigt die mittlere Relevanz für jede der Herausforderungen auf einer Skala von 1 bis 5. Die höchste Relevanz hat für die Befragten demnach das fehlende Wissen über relevante Kundenanforderungen sowie fehlende zeitliche Ressourcen. Aber auch fehlendes Wissen über konkrete Entwicklungsziele und latente, nicht explizite Kundenanforderungen sowie fehlende finanzielle Ressourcen und die fehlende Unterstützung durch Kunden und Anwender werden in ihrer Relevanz als überdurchschnittlich hoch bewertet.

Den besonderen Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten stehen Potenziale durch den Einsatz der AR-Technologie entgegen. Im Stand der Forschung wurde in dem Zusammenhang auf direkte und indirekte Kosteneffekte durch den Einsatz von AR-Prototypen sowie die frühe Verfügbarkeit virtueller Stimuli und ein potenziell realistischeres Produkterlebnis im Vergleich zu anderen Produktmodellen

für Kundentests in der Frühen Phase eingegangen (vgl. Kapitel 2.4.4). Um das Verständnis für den Einsatz der AR-Technologie in der Entwicklungspraxis sowie die empfundenen Potenziale zu vertiefen wurden die Umfrageteilnehmer zunächst gebeten ihre Erfahrungen im Einsatz der AR-Technologie in der betrieblichen Praxis der Produktentwicklung anzugeben. Abbildung 5.5 zeigt die dazugehörigen Umfrageergebnisse.

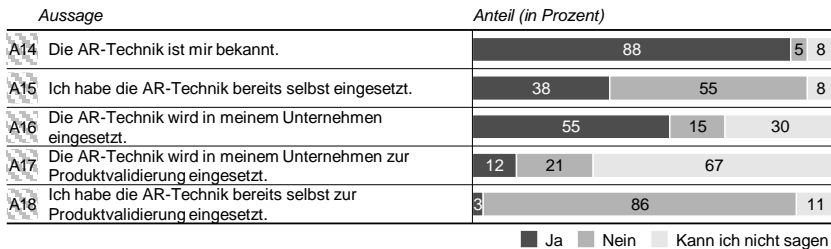


Abbildung 5.5: Umfrageergebnisse zu Erfahrungen im Einsatz der AR-Technologie (n = 66)

Die Umfrageergebnisse zeigen, dass die AR-Technologie mit 88% einem Großteil der Befragten bekannt ist (A14). 38% der Befragten haben die AR-Technologie dabei bereits selbst eingesetzt (A15). Wiederum 55% der Umfrageteilnehmer geben an, dass die AR-Technologie bereits in ihrem Unternehmen eingesetzt wird (A16). Jedoch geschieht dies nur bei 12% der Befragten im Rahmen der Produktvalidierung (A17). Lediglich 3% der Befragten haben die AR-Technologie bereits selbst zur Produktvalidierung eingesetzt (A18).

Die Umfrageteilnehmer wurden weiterhin um ihre Einschätzung zu möglichen Potenzialen aus der Anwendung der AR-Technologie zur Produktvalidierung gebeten. Abbildung 5.6 zeigt die Zustimmung der Umfrageteilnehmer zu verschiedenen Aussagen zu Potenzialen AR-basierter Validierungsumgebungen, die in Anlehnung an den Stand der Forschung formuliert wurden. Die größte Zustimmung von 86% erfährt demnach die Aussage wonach die AR-Technologie die direkte Einbindung von Kunden in die Validierungsumgebung erlaubt (A19). Auch stimmen etwa drei Viertel der Umfrageteilnehmer den Aussagen zu, dass der Einsatz von AR-Prototypen die Erfassung latenter, nicht expliziter Kundenanforderungen (A20) sowie ein realistisches Produkterlebnis (A21) ermöglicht. Ca. 70% der Befragten sind zudem der Meinung, dass sich auf diese Weise die Akzeptanz früher Validierungsaktivitäten innerhalb der Entwicklungsorganisation (A22) sowie die Unterstützung durch das

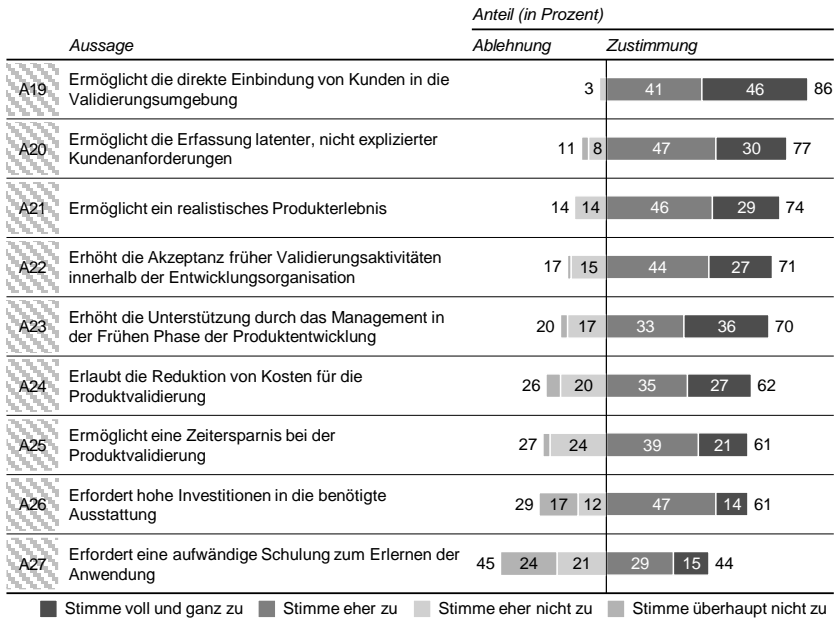


Abbildung 5.6: Umfrageergebnisse zu Potenzialen der AR-Technologie in der Produktvalidierung (n = 66)⁴

Management (A23) erhöhen lässt. Einer möglichen Kosten- und Zeitersparnis durch den Einsatz von AR-Prototypen stimmen jeweils ca. 60% der Befragten zu (A24, A25). Dem gegenüber steht eine Zustimmung von ebenfalls gut 60% der Umfrageteilnehmer für die Aussage, wonach der Einsatz von AR-Prototypen hohe Investitionen in die benötigte Ausstattung erfordert (A26). Die Zustimmung zur Aussage es sei eine aufwändige Schulung zum Erlernen der Anwendung erforderlich, fällt mit 44% im Vergleich gering aus (A27).

Die Umfrageteilnehmer wurden schließlich nach einer zusammenfassenden Einschätzung zum Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung sowie des damit einhergehenden Unterstützungsbedarfs befragt. Die entsprechenden Umfrageergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Demnach sehen 85% der Befragten ein

⁴ Aufgrund von Rundungsdifferenzen kann die Summe der einzelnen Positionen von der angegebenen Summe abweichen.

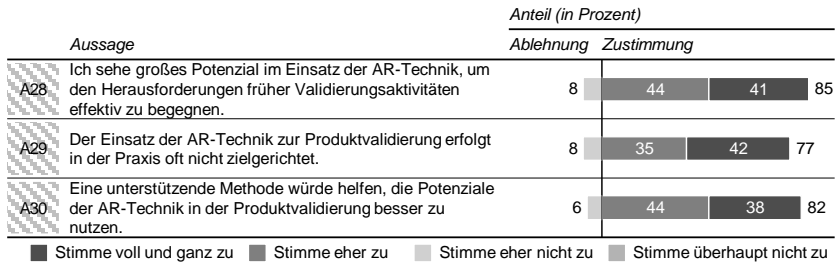


Abbildung 5.7: Umfrageergebnisse zum Unterstützungsbedarf beim Einsatz der AR-Technologie in der Produktvalidierung (n = 66)

großes Potenzial im Einsatz der AR-Technik, um den Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten effektiv zu begegnen (A28). Gleichzeitig stimmen 77% der Befragten der Aussage zu, wonach der Einsatz der AR-Technik zur Produktvalidierung in der Praxis oft nicht zielgerichtet erfolgt (A29). Entsprechend hoch fällt mit 82% die Zustimmung der Umfrageteilnehmer zum Bedarf einer methodischen Unterstützung bei der AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung in der Frühen Phase aus (A30).

5.1.3 Zwischenfazit

Die durchgeführte fragebogengestützte Umfrage vertieft das Verständnis zum Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung in der Entwicklungspraxis und adressiert dabei die beiden Forschungsfragen FF1 und FF2. Die Umfrageergebnisse bestätigen die im Stand der Forschung dargelegte besondere Bedeutung früher und kontinuierlicher Validierungsaktivitäten für den wirtschaftlichen Erfolg eines Entwicklungsprojekts aus Sicht der Umfrageteilnehmer. Auch die im Stand der Forschung beschriebenen Herausforderungen bei der Durchführung von Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase der Produktentwicklung spiegeln sich in den Umfrageergebnissen wieder. Demnach wird in der Entwicklungspraxis insbesondere die hohe marktliche Unsicherheit infolge fehlenden Wissens über relevante Kundenanforderungen sowie fehlende zeitliche Ressourcen als relevante Hürden empfunden, die die Durchführung von Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase erschweren.

Die Umfrageteilnehmer sehen im Einsatz der AR-Technologie das Potenzial, den Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten effektiv zu begegnen. Gleichzeitig sind sie mehrheitlich der Meinung, dass der Einsatz der AR-Technik zur Produkt-

validierung in der Praxis oft nicht zielgerichtet erfolgt und eine unterstützende Methode helfen würde, die Potenziale der AR-Technik in der Produktvalidierung besser zu nutzen. Die Umfrageergebnisse bekräftigen damit den Forschungsbedarf an einem methodischen Vorgehen zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase, der vor dem Hintergrund der dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungshypothese formuliert wurde (vgl. Kapitel 3.1).

Die Interpretation der Umfrageergebnisse ist vor dem Hintergrund der Zusammensetzung der Stichprobe zu betrachten, in der große Unternehmen der Automobilindustrie sowie Mitarbeiter mit einer kurzen Unternehmenszugehörigkeit tendenziell überrepräsentiert sind. Gleichwohl besteht kein Anhaltspunkt dafür, dass die Zustimmung zu Aussagen zum Forschungsbedarf einem starken Einfluss der Branche, der Unternehmensgröße oder der Dauer der Unternehmenszugehörigkeit unterliegt. Es ist allenfalls davon auszugehen, dass gerade kleine Unternehmen über ein geringes Maß an Erfahrungswissen im Einsatz der AR-Technologie in der Entwicklungspraxis verfügen und folglich einen höheren Bedarf für eine methodische Unterstützung haben.

5.2 Potenziale der AR-Technologie in der Validierung interaktiver Produkte

Im zweiten Teil der Deskriptiven Studie I wird das Verständnis für die Potenziale der AR-Technologie in der Validierung interaktiver Produkte vertieft. Zu diesem Zweck wurde eine experimentelle Untersuchung an einem AR-Prototypen durchgeführt, die mit einer Befragung der beteiligten Probanden einherging. Die Ergebnisse der Untersuchung geben Aufschluss über geeignete Anwendungsfälle der AR-Technologie in der Produktvalidierung im Vergleich zu etablierten Produktmodellen in der Frühen Phase. Die Untersuchung adressiert damit die Forschungsfrage FF2:

FF2: Welche Potenziale hat der Einsatz der AR-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Entwicklungspraxis?
--

Die Untersuchungsergebnisse wurden in Teilen bereits bei Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019) veröffentlicht. Die operative Durchführung und Auswertung der experi-

mentellen Untersuchung erfolgte zum Teil im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Harms (2018)⁵ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurde.

5.2.1 Studiendesign

Zur experimentellen Untersuchung der Potenziale der AR-Technologie in der Validierung interaktiver Produkte wurde eine Probandenstudie mit 68 Teilnehmern unter Laborbedingungen durchgeführt. Die Studie fand an zwei getrennten Terminen im Juli und im Oktober 2018 statt, deren Ablauf grundsätzlich identisch war. Sechs der 68 Teilnehmer waren wissenschaftliche Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit abgeschlossenem Maschinenbaustudium und ein bis drei Jahren Berufserfahrung. Alle weiteren Teilnehmer waren Studierende am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Ca. 10% der studentischen Teilnehmer waren Studierende im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen. Wiederum ca. 90% waren im Studiengang Maschinenbau eingeschrieben. Unter allen studentischen Teilnehmern der Studie lag der Anteil der Studierenden im Bachelorstudium bei ca. 11% und der Anteil der Studierenden im Masterstudium bei ca. 89%.

Die Probanden wurden im Rahmen der Studie gebeten verschiedene Modelle desselben interaktiven Produkts auszuprobieren. Als solches wurde ein sogenannter Quadropter, eine Flugdrohne mit vier Rotoren, ausgewählt. „Als Produktmodelle standen eine einfache Produktskizze, ein digitales CAD-Modell sowie ein AR-Modell zur Verfügung (vgl. Abbildung 5.8). CAD- und AR-Modell stammen aus einem Beispieldatensatz der Firma PTC Inc. Die Produktskizze wurde den Probanden in gedruckter Form präsentiert, während sie das CAD-Modell an einem Computerarbeitsplatz erfahren konnten. Für die Interaktion mit dem AR-Modell wurde die Microsoft® HoloLens™ eingesetzt.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 41) Bei dem AR-Modell des Quadropters handelte es sich um ein vollständig virtuelles Modell, das jedoch mithilfe der AR-Brille in den Kontext der realen Umgebung eingebunden war. Die AR-Szene wurde mithilfe der Software PTC® Vuforia™ Studio erstellt.

„Zu Beginn eines jeden Durchlaufs des Experiments wurde die Reihenfolge, in der die drei alternativen Produktmodelle den Probanden zur Exploration angeboten wurden, zufällig gewählt. Die Zeit für die Interaktion mit den Produktmodellen war jeweils auf 5 Minuten begrenzt. Im unmittelbaren Anschluss wurden die Probanden

⁵ Unveröffentlichte Bachelorarbeit



Abbildung 5.8: Verwendete alternative Produktmodelle eines Quadropters nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 41)

jeweils gebeten das Produktmodell, mit dem sie soeben konfrontiert waren, zu bewerten.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 41–42) Als Bewertungskriterium wurde die Wiedergabetreue des jeweiligen Produktmodells herangezogen (vgl. Kapitel 2.3.3.1). Die Wiedergabetreue bezeichnet die Ähnlichkeit eines Produktmodells mit dem späteren Endprodukt und ist als Kriterium zur Auswahl geeigneter Prototypen für spezifische Validierungsaufgaben etabliert. Zur Differenzierung der Bewertung der Wiedergabetreue entlang verschiedener Dimensionen wurde das Filter-Fidelity-Profil nach Kohler et al. (2013) aufgegriffen und um ausgewählte Dimensionen ergänzt, um den Spezifika AR-basierter Prototypen gerecht zu werden. Tabelle 5.1 zeigt eine vollständige Übersicht über die so entstandenen Wiedergabedimensionen in den vier Kategorien Erscheinung (visuell), Erscheinung (non-visuell), Funktionalität und Interaktivität. (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019)

Entsprechend des Anwendungsfokus der AR-Technologie im Bereich der visuellen Darstellung entfallen 12 der 18 Wiedergabedimensionen auf die entsprechende Kategorie, die wiederum in die Unterkategorien Größe, Lage, Farbe sowie Form und Struktur unterteilt ist. Durch die Möglichkeit zur Kombination virtueller und physischer Modelle sowie, je nach verwendetem AR-System, zur Einbindung von akustischen Signalen, lassen sich AR-Prototypen jedoch auch hinsichtlich ihrer Wiedergabetreue der Akustik und Haptik des späteren realen Produkts bewerten. Beide Wiedergabedimensionen sind zur Kategorie Erscheinung (non-visuell) zusammengefasst. Durch die Möglichkeit zur Animation von AR-Modellen lassen sich zudem Funktionen des späteren Produkts abbilden. Deren Wiedergabetreue ist durch die Dimensionen in der Kategorie Funktionalität beschrieben. Abhängig vom verwendeten AR-System besteht zudem die Möglichkeit zur Implementierung von Interaktionsmöglichkeiten mit dem AR-Prototyp, etwa durch Handgesten (vgl. Kapitel 2.4.3). Die Wiedergabetreue von Aktionen und Reaktionen aus der Interaktion mit dem AR-Prototypen ist durch die Dimensionen in der Kategorie Interaktivität beschrieben.

Tabelle 5.1: Dimensionen der Wiedergabetreue AR-basierter Prototypen nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 41)

<i>Wiedergabedimensionen</i>		<i>Beschreibung</i>	
Erscheinung (visuell)	Größe	Proportionen	Größenverhältnis der Elemente des Prototyps untereinander
		Räumliche Dimensionen	Größenverhältnis des Prototyps zur Umgebung
	Lage	Räumliche Orientierung	Rotatorische Lage des Prototyps zur Umgebung (statisch und dynamisch)
		Räumliche Positionierung	Translatorische Lage des Prototyps zur Umgebung (statisch und dynamisch)
	Farbe	Farbwirkung	Farben und Muster des Prototyps
		Lichtwirkung	Licht, Schatten, Reflexionen in Wechselwirkung mit Prototyp und Umgebung
		Transparenz	Lichtdurchlässigkeit und -undurchlässigkeit des Prototyps
		Okklusion	Optische Verdeckung des Prototyps durch Objekte der Umgebung
	Form und Struktur	Form	Außenkontur des Prototyps
		Oberflächenstruktur	Plastische Struktur der Oberfläche des Prototyps
		Konstruktions-tiefe	Visuelle Differenzierung der Teilsysteme des Prototyps
		Wirkbeziehungen	Visuelle Kopplung und Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen des Prototyps
	Erscheinung (non-visuell)	Akustik	Akustisches Feedback des Prototyps
		Haptik	Haptisches Feedback des Prototyps
	Funktionalität	Funktionsumfang	Anzahl dargestellter Funktionen des Prototyps
		Funktionstiefe	Ausprägung der Funktionsdarstellung des Prototyps
Interaktivität	Eingabeverhalten	Mögliche Aktionen zur Interaktion mit dem Prototyp	
	Ausgabeverhalten	Mögliche Reaktionen aus der Interaktion mit dem Prototyp	

Neben produktinhärenten Eigenschaften, Merkmalen und Funktionen bieten AR-Modelle die Möglichkeit zur Darstellung und Implementierung von Metainformationen und -funktionen, die über den Umfang derer des späteren Produkts hinausgehen (vgl. Tabelle 5.2). Dies kann etwa die Darstellung von weiterführenden Produktinformationen oder Simulationsergebnissen im Kontext des AR-Modells sein. Weitere gängige Meta-Funktionen von AR-Modellen sind die Möglichkeit zur flexiblen Größenskalierung, zur Variation und Konfiguration oder zum Ein- und Ausblenden von Elementen des Prototyps oder dem Platzieren von Schnitten. Zumal derartige Meta-Funktionen zwar im AR-Modell, nicht jedoch im späteren Endprodukt abgebildet werden können, lässt sich das Verständnis der Wiedergabetreue als Ähnlichkeit eines Produktmodells mit dem späteren Endprodukt nicht auf sie anwenden. Sie sind daher in den identifizierten Wiedergabedimensionen für AR-basierte Prototypen nicht berücksichtigt und wurden auch im Rahmen der experimentellen Untersuchung nicht weiter betrachtet.

Tabelle 5.2: Mögliche Meta-Funktionen AR-basierter Prototypen nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 41)

<i>Meta-Funktionen</i>	<i>Beschreibung</i>
Darstellung von Metainformationen	Möglichkeit zur Darstellung von Metainformationen zum Prototyp (z.B. Produktinformationen, Simulationsergebnisse)
Skalierbarkeit	Möglichkeit zur Skalierung der Größe des Prototyps
Variierbarkeit	Möglichkeit zur Variation und Konfiguration des Prototyps
Einsehbarkeit	Möglichkeit zum Ein- und Ausblenden von Elementen des Prototyps und zum Platzieren von Schnitten

Ebenfalls von der Bewertung ausgenommen wurden aufgrund der fehlenden Ausgestaltung in allen drei Modellen die Wiedergabedimensionen Transparenz, Okklusion, Oberflächenstruktur, Akustik und Haptik. Die Bewertung der Wiedergabetreue in den übrigen Wiedergabedimensionen erfolgte in der experimentellen Untersuchung für alle Produktmodelle auf einer Ordinalskala von 1 bis 5. Ein Wert von 5 entspricht dabei einer vollständigen Ausgestaltung des Prototyps in der betreffenden Wiedergabedimension im Vergleich zum späteren Produkt, während ein Wert von 1 eine fehlende Ausgestaltung angibt. „Zusätzlich zum Fragebogen wurde den Probanden eine Erklärung der Bedeutung der einzelnen Dimensionen zur Verfügung gestellt. Neben den Fragen zur Wiedergabetreue der Prototypen wurden zudem Fragen zur Person der Probanden, ihren Vorkenntnissen zur AR-Technik und zu verschiedenen Eindrücken aus der Interaktion mit dem AR-Modell gestellt.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 42)

5.2.2 Studienergebnisse

Die Bewertungsergebnisse für die drei verglichenen Produktmodelle sind in Abbildung 5.9 dargestellt. „Die Abbildung zeigt für jede untersuchte Wiedergabedimension den Median der Wiedergabetreue aus der Befragung der Studienteilnehmer. Demnach empfanden die Probanden die Wiedergabetreue des AR-Modells entlang der Mehrheit der untersuchten Dimensionen in den Bereichen *Erscheinung*, *Funktionalität* und *Interaktivität* als besser oder mindestens gleichwertig zur Wiedergabetreue der einfachen Papierskizze und des CAD-Modells. Die Wiedergabetreue der einfachen Papierskizze wurde von den Probanden erwartungsgemäß in jeder der untersuchten Dimensionen am niedrigsten bewertet.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 42)

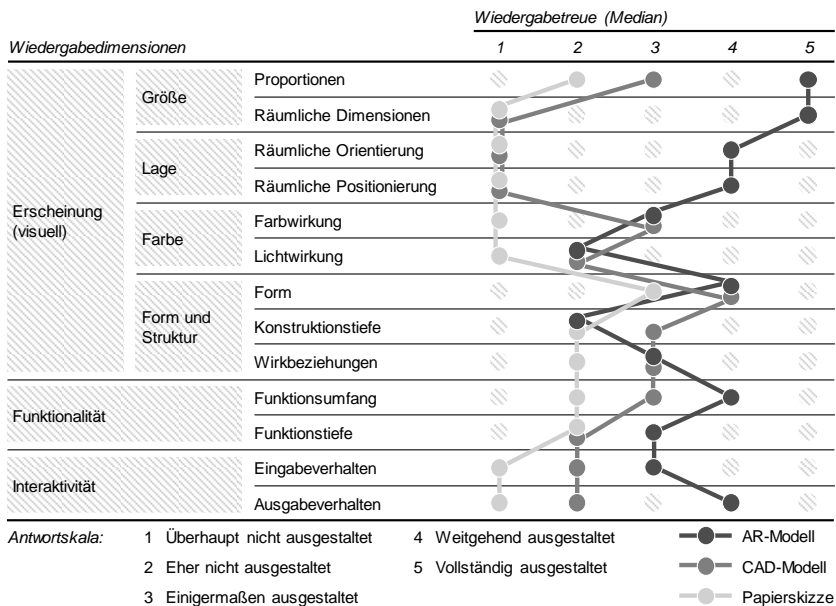


Abbildung 5.9: Ergebnisse aus der Bewertung der Wiedergabetreue der verglichenen Prototypen (n = 68) nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 43)

„Dieses Ergebnis lässt auf die besondere Eignung AR-basierter Prototypen zur Validierung heterogener Gebrauchsprodukte mit hohem Interaktionsanteil schließen. Besonderes Potenzial zeigt das AR-Modell in solchen Wiedergabedimensionen, die sich auf die Wechselwirkung des Modells mit seiner physischen Umgebung beziehen (vgl. *Räumliche Dimensionen*, *Räumliche Orientierung*, *Räumliche Positionierung*). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Proband durch die AR-Technik in die Lage versetzt wird das virtuelle Modell im direkten Kontext der realen Umgebung zu erfahren. Die Beurteilung der Proportionen des Modells sowie dessen Orientierung im Raum und zum Anwender selbst fällt so leichter, was in einem realistischeren Produkterlebnis in den jeweiligen Wiedergabedimensionen resultiert.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 42)

„Besonders hohe Werte in der Wiedergabetreue erzielt das AR-Modell im Vergleich zu den beiden anderen Produktmodellen zudem in den untersuchten Wiedergabedimensionen aus den Bereichen *Funktionalität* und *Interaktivität*. Insbesondere die Ausgestaltung des *Funktionsumfangs* im AR-Modell und das *Ausgabeverhalten*, d.h. die Reaktion des Modells auf Eingaben des Anwenders, wurde von den Probanden mit einer vergleichsweise hohen Wiedergabetreue bewertet. Prinzipiell ermöglichten das CAD-Modell und das AR-Modell den Probanden durch entsprechend implementierte Animationen die Exploration desselben Funktionsumfangs des Quadropters. Dabei handelte es sich um eine Funktion zum Batteriewechsel durch die Öffnung des Batteriefachs sowie um das Fliegen des Quadropters. Analog zu den Wiedergabedimensionen aus dem Bereich *Erscheinung* lässt sich die höher bewertete Wiedergabetreue des AR-Modells in den Bereichen *Funktionalität* und *Interaktivität* darauf zurückführen, dass die Probanden die Funktion des virtuellen Modells und die Interaktion mit diesem im Kontext der realen Umgebung erfahren konnten. So erlaubte ihnen das AR-Modell den virtuellen Quadropter im realen Raum fliegen zu lassen, während sich die Funktion im CAD-Modell lediglich durch sich drehende Rotoren abbilden ließ. Auf der Papierskizze konnte der Funktionsumfang wiederum mithilfe der dargestellten Bewegungsunschärfe der Rotoren lediglich angedeutet werden, was sich in der entsprechend niedrig bewerteten Wiedergabetreue im Vergleich zu CAD-Modell und AR-Modell widerspiegelt.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 43–44)

„Keine signifikanten Vorteile des AR-Modells gegenüber dem CAD-Modell und teilweise auch der Papierskizze zeigen die Bewertungsergebnisse hingegen in den Dimensionen *Farbwirkung*, *Lichtwirkung*, *Konstruktionstiefe* und *Wirkbeziehungen*. Die Wiedergabetreue in der Dimension *Konstruktionstiefe* wurde von den Probanden für das CAD-Modell höher bewertet als für das AR-Modell. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass das AR-Modell von den Probanden eher aus Gesamtproduktsicht wahrgenommen wird, während der deutlich erkennbare Aufbau des CAD-

Modells aus parametrisch modellierten Einzelbauteilen einen bewussten und unbewussten Eindruck von der Baustruktur des Quadropters bei den Probanden erzeugt. In den Dimensionen *Farb-* und *Lichtwirkung* wurde die Wiedergabebetreue von AR- und CAD-Modell gleich hoch bewertet. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in der AR-Umgebung keine umgebungssensitive Anpassung des Renderings der Modelloberflächen stattfindet. Stattdessen arbeiten die entsprechenden, für die Erzeugung der Farb- und Lichtwirkung zuständigen Shader sowohl im CAD- als auch im AR-Modell auf Basis eines virtuellen Umgebungsmodells. Ändert sich die reale Beleuchtungssituation im Raum, hat dies auch beim AR-Modell keine Auswirkungen auf das Ergebnis des Rendering-Prozesses.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 44)

Die Bewertungsergebnisse für die verschiedenen Wiedergabedimensionen zeigen, dass der AR-Prototyp dem Anwender in vielen Dimensionen eine realistischere Produktwahrnehmung im Vergleich zu den zwei alternativen Produktmodellen erlaubt. Dies geht ebenso aus der Auswertung der zusätzlichen Befragung der Probanden hervor, die zum Abschluss der Studie vorgenommen wurde (vgl. Abbildung 5.10). Demnach stimmen 79% der Probanden der Aussage voll und ganz oder eher zu, wonach die Art der Darstellung des AR-Modells ihre Realitätswahrnehmung unterstützt hat (B4). Obwohl lediglich 31% der Probanden zustimmen, geübt im Umgang

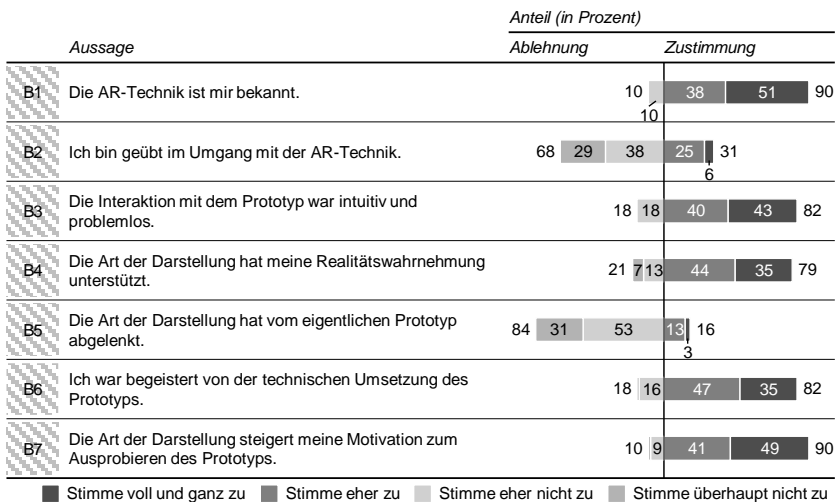


Abbildung 5.10: Ergebnisse aus der Zusatzbefragung der Probanden zum AR-Prototyp (n = 68) nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019, S. 45)

mit der AR-Technik zu sein (B2), stimmen 82% von ihnen der Aussage zu, wonach die Interaktion mit dem AR-Prototyp intuitiv und problemlos war (B3). Lediglich 16% der Probanden stimmen der Aussage zu, wonach die Art der Darstellung vom eigentlichen Prototyp abgelegt hat (B5). Jedoch ist eine positive Verzerrung der Bewertung des Prototyps durch einen Framing-Effekt infolge der positiven Einstellung der Probanden gegenüber der AR-Technik nicht auszuschließen. Auf ein mögliches Risiko für einen solchen Effekt weist die Zustimmung von 82% der Probanden zu der Aussage hin, wonach sie begeistert von der technischen Umsetzung des Prototyps waren (B6). Auch die Zusammensetzung der Probandengruppe aus mehrheitlich jüngeren, technikaffinen Studierenden kann als Hinweis für das Risiko eines positiven Framing-Effekts gedeutet werden. (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019)

5.2.3 Zwischenfazit

Die durchgeführte experimentelle, fragebogengestützte Untersuchung vertieft das Verständnis für die Potenziale der AR-Technologie in der Validierung interaktiver Produkte und adressiert dabei die Forschungsfrage FF2. „Die Ergebnisse der Befragung zeigen für das AR-Modell in der Mehrheit der untersuchten Dimensionen in den Bereichen *Erscheinung*, *Funktionalität* und *Interaktivität* eine mitunter deutlich höhere Wiedergabetreue als für die zum Vergleich herangezogenen Produktmodelle. Dies gilt insbesondere für solche Wiedergabedimensionen, die sich auf die Wechselwirkung des Modells mit seiner physischen Umgebung beziehen. Die Möglichkeit mithilfe der AR-Technik virtuelle Modelle im realen Kontext zu erfahren, begünstigt demnach in vielen Wiedergabedimensionen eine realistischere Produktwahrnehmung.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 46) Bei der Interpretation der vorgestellten Ergebnisse ist gleichwohl die Möglichkeit einer Verzerrung in der Bewertung des AR-Modells durch einen positiven Framing-Effekt zu berücksichtigen. (Reinemann, Fahl et al., 2019)

Die für die Untersuchung identifizierten Dimensionen der Wiedergabetreue AR-basierter Prototypen, die sich grundsätzlich in AR-Szenen adressieren lassen, erlauben ebenso einen Rückschluss auf die Grenzen möglicher Anwendungsfälle der AR-Technologie in der kundenintegrierten Produktvalidierung. Diese beschränken sich grundsätzlich auf die Validierung von Produktmerkmalen, die sich für den Anwender unmittelbar durch seine menschliche Sinneswahrnehmung erschließen lassen. Der Anwender ist dafür zwingend aktiv und physisch in die AR-basierte Validierungsumgebungen eingebunden. Die Anwendung der AR-Technologie im Rahmen von Kundentests bleibt damit folglich auf interaktive Produkte beschränkt. Von einer interaktiven Wahrnehmung bis hin zur Möglichkeit der Interaktion durch Manipulation kann der Grad der Interaktion zwischen Anwender und Produkt dabei

gleichwohl unterschiedlich ausgeprägt sein. Weiterhin bleibt das Potenzial zur Erzielung einer hohen Wiedergabetreue in den beschriebenen adressierbaren Wiedergabedimensionen für den virtuellen Teil der AR-Szene auf visuell erlebbare Produktmerkmale beschränkt, zumal der Fokus der für diese Untersuchung eingesetzten Microsoft® HoloLens™ wie auch bei anderen heute gängigen AR-Systemen auf der Generierung visueller illusorischer Stimuli liegt. Davon unberührt bleibt die Möglichkeit zur Kombination virtueller Objekte mit physischen Modellen in einer AR-Szene, um auf diese Weise eine non-visuelle, multimodale Produktwahrnehmung zu erzielen. Auch der Einsatz spezieller Ein- und Ausgabegeräte wie etwa von Force-Feedback-Handschuhen für die virtuelle Simulation haptischer oder anderer non-visueller Sinnesreize ist grundsätzlich geeignet diese Einschränkungen aufzuheben, wenngleich sie in der breiten Anwendung der AR-Technologie heute noch wenig etabliert sind. Die Grenzen möglicher Anwendungsfälle der AR-Technologie in der kundenintegrierten Produktvalidierung werden demnach maßgeblich von der Ausstattung des verfügbaren AR-Systems bestimmt. Bei der Interpretation der vorgestellten Ergebnisse ist daher zu beachten, „dass die Bewertung der Wiedergabetreue von AR-Modellen einerseits von den spezifischen Modelleigenschaften und andererseits von dem Entwicklungsstand der AR-Technik im Allgemeinen und der verwendeten AR-Hardware im Speziellen abhängig ist.“ (Reinemann, Fahl, Albers et al., 2019, S. 46)

5.3 Anforderungen an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase

Im dritten Teil der Deskriptiven Studie I werden Anforderungen an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase ermittelt und damit die Forschungsfrage FF3 adressiert:

FF3: Welche Anforderungen sind an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu stellen?
--

Entsprechend der drei Evaluationstypen der DRM werden Anforderungen an die Unterstützungsleistung, die Anwendbarkeit und den Erfolgsbeitrag der Systematik betrachtet (vgl. Kapitel 4.1). Zur Anforderungsermittlung diente eine zweistufige Delphi-Befragung unter Experten (vgl. Kapitel 4.2.3). Die Befragung wurde im Rahmen

der studentischen Abschlussarbeit von Walker (2019)⁶ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt, die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurde.

5.3.1 Studiendesign

In der ersten Stufe der Delphi-Befragung wurden zunächst mögliche Anforderungen erhoben, welche anschließend aggregiert und in der zweiten Stufe auf ihre Relevanz bewertet wurden. Als Quelle für die Anforderungserhebung in der ersten Delphi-Stufe dienten sowohl eine Reihe von Experteninterviews wie auch eine Literaturrecherche sowie die Ergebnisse der in Kapitel 5.1 beschriebenen Umfrage. Im Rahmen der jeweils ca. 20-minütigen Interviews wurden insgesamt 11 Experten befragt. Dabei handelte es sich mehrheitlich um wissenschaftliche Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), deren Forschungs- und Arbeitsschwerpunkte in den Bereichen Produktvalidierung, methodische Produktentwicklung und Prototyping liegen. Die Interviews waren als semistrukturierte Interviews angelegt, für die eine Reihe von Leitfragen formuliert wurden, deren Reihenfolge jedoch nicht zwingend festgelegt war (vgl. Kapitel 4.2.1). Die transkribierten Interviews wurden nach der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet. Dazu wurden Aussagen zu möglichen Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik aus den Transkripten extrahiert und anschließend mit ähnlichen Aussagen zusammengefasst. Die so ermittelten Anforderungen wurden jeweils einem der drei DRM-Evaluationstypen zugeordnet.

Um die identifizierten Anforderungen in der zweiten Delphi-Stufe in ihrer Relevanz zu bewerten, wurden diese in einen Online-Fragebogen überführt. Dieser sah zur Relevanzbewertung eine fünfstufige Ordinalskala vor. Der Fragebogen wurde neben den in der ersten Delhi-Stufe befragten Experten zusätzlich an Masterstudenten, Alumni und aktive Projektpartner des IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Deutschland verschickt. Der Fragebogen wurde insgesamt von 52 Personen vollständig ausgefüllt. Abbildung 5.11 zeigt die Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Tätigkeitsfeldern. Ca. 40% der Befragten arbeitet seit 1 bis 3 Jahren für ihr Unternehmen, wiederum ca. 12% seit weniger als einem Jahr, ca. 23% seit 3 bis 5 Jahren und ca. 25% seit 5 bis 10 Jahren. 56% der Umfrageteilnehmer stimmten im Rahmen der Befragung der Aussage voll und ganz oder eher zu, wonach sie Erfahrungen mit der Produktvalidierung in AR-basierten Validierungsumgebungen haben.

⁶ Unveröffentlichte Masterarbeit

<i>Tätigkeitsfeld</i>	<i>Anteil (in Prozent)</i>
Wissenschaft und Forschung	38
Student(in)	12
Automobilzulieferer	13
Automobilhersteller	12
Sonstiger Fahrzeugbau	6
Maschinen- und Anlagenbau	2
Sonstige	17

Abbildung 5.11: Verteilung der Umfrageteilnehmer nach Tätigkeitsfeldern (n = 52)

Für den Vergleich der Relevanzbewertungen der unterschiedlichen Anforderungen wurde ein Friedman-Test⁷ durchgeführt. Im Zuge dessen wurden für jede befragte Person anhand ihrer jeweiligen Relevanzbewertung die individuelle Rangfolge der Anforderungen für jede der drei DRM-Evaluationstypen gebildet und anschließend für jede Anforderung wiederum die Rangsumme berechnet. Der Vergleich der Rangsummen mithilfe des Friedman-Tests ergab für jeden Evaluationstyp einen signifikanten Unterschied zwischen den zugehörigen Anforderungen. Zur differenzierten Untersuchung der Relevanzunterschiede der einzelnen Anforderungen eines Evaluationstyps wurden anschließend paarweise Dunn-Bonferroni-Tests⁸ durchgeführt. Auf eine Bonferroni-Korrektur der p-Werte wurde dabei verzichtet. Ein signifikanter Unterschied in der Relevanzbewertung zweier Anforderungen wurde dementsprechend im Fall eines nicht korrigierten p-Werts kleiner 0,05 angenommen. Anhand der Ergebnisse der Dunn-Bonferroni-Tests wurden die Anforderungen schließlich zu Ranggruppen zusammengefasst. Ranggruppen wurden dabei so gebildet, dass sich die mittleren Ränge der Anforderungen innerhalb einer Ranggruppe nicht signifikant voneinander unterscheiden. Für alle Anforderungen einer Ranggruppe gelten zudem stets dieselben Aussagen zur Signifikanz der Rangunterschiede zu anderen Ranggruppen.

⁷ Für weiterführende Informationen zum Friedman-Test siehe auch Friedman (1937); Hahs-Vaughn und Lomax (2020); Sheskin (2007).

⁸ Für weiterführende Informationen zum Dunn-Bonferroni-Test siehe auch Dinno (2015).

5.3.2 Studienergebnisse

Insgesamt wurden im Rahmen der zweistufigen Delphi-Befragung 19 Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik identifiziert und entsprechend ihrer Relevanz bewertet. Die sechs identifizierten Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik für die Support Evaluation nach DRM sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Entsprechend der Ergebnisse der Relevanzbewertung im Zuge der zweiten Delphi-Stufe können diese Anforderungen in fünf Ranggruppen eingeordnet werden (vgl. Abbildung 5.12). Während der grundsätzliche Bedarf für eine methodische Unterstützung bei der AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung in der Frühen Phase schon im ersten Teil der Deskriptiven Studie I empirisch bestätigt wurde (vgl. Kapitel 5.1), lässt er sich anhand der identifizierten Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik weiter konkretisieren. Aus den geführten Experteninterviews ergeben sich sechs konkrete Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik. Voraussetzung für die durchgängige Unterstützung entlang des gesamten Vorgehens zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase ist demnach zunächst die Unterstützung bei der einheitlichen Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen (U1). Weiterhin soll die Auswahl und Konkretisierung geeigneter Validierungsziele (U2), die bedarfsgerechte Konfiguration (U3) und der Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen (U4) sowie die Durchführung (U5) und Auswertung (U6) von Kundentests in AR-Umgebungen unterstützt werden.

Tabelle 5.3: Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik (Support Evaluation)

<i>Die Systematik soll ...</i>	
<i>U1</i>	... die einheitliche Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen unterstützen.
<i>U2</i>	... die Auswahl und Konkretisierung der Validierungsziele unterstützen.
<i>U3</i>	... die Konfiguration AR-basierter Validierungsumgebungen unterstützen.
<i>U4</i>	... den Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen unterstützen.
<i>U5</i>	... die Testdurchführung in AR-basierten Validierungsumgebungen unterstützen.
<i>U6</i>	... die Interpretation der Testergebnisse unterstützen.

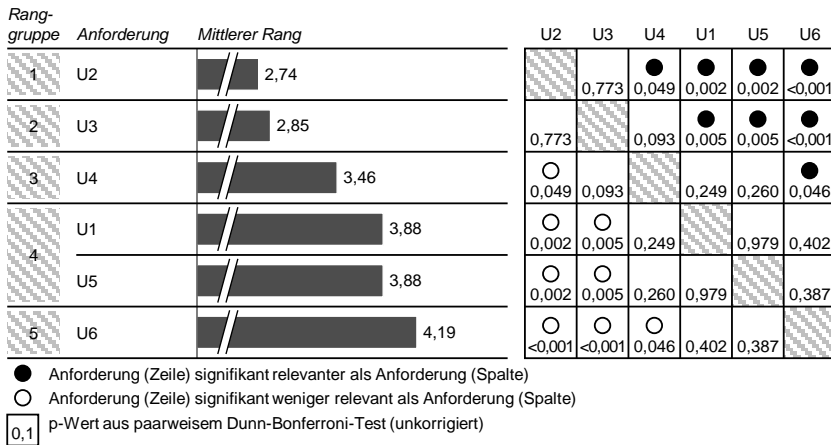


Abbildung 5.12: Ergebnisse der Relevanzbewertung der Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik (n = 52)

Der Friedman-Test auf Basis der Bewertungsergebnisse der zweiten Delphi-Runde ergab mit einer Teststatistik von $\chi^2(5) = 36,531$ und einem p-Wert von $p < 0,001$ signifikante Unterschiede in der Relevanz der unterschiedlichen Anforderungen an die Unterstützungsleistung. Aus den Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests geht hervor, dass der Forderung nach einer Unterstützung bei der Auswahl und Konkretisierung der Validierungsziele die höchste Relevanz zugesprochen wird. Die entsprechende Anforderung U2 bildet eine eigene Ranggruppe mit signifikant höherer Relevanz als die Anforderungen der Ranggruppen 3, 4 und 5. Eine ebenfalls hohe Relevanz ergibt sich für die Forderung nach einer Unterstützung bei der Konfiguration AR-basierter Validierungsumgebungen (U3).

Tabelle 5.4 zeigt die sechs im Rahmen der Experteninterviews identifizierten Anforderungen an die Anwendbarkeit der Systematik für die Application Evaluation nach DRM. Ähnliche Anforderungen an die Anwendbarkeit von Entwicklungsmethoden im Allgemeinen finden sich auch in der Literatur, so etwa bei Kirschner (2011), Messerle (2016), Greiffenberg (2003) und Posner, Keller, Binz & Roth (2012). Der Friedman-Test ergab mit einer Teststatistik von $\chi^2(5) = 120,872$ und einem p-Wert von $p < 0,001$ signifikante Unterschiede in der Relevanz der unterschiedlichen Anforderungen an die Anwendbarkeit. Abbildung 5.13 zeigt die Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests. Die Anforderungen mit der höchsten Relevanz und dem entsprechend niedrigsten mittleren Rang stellen das angemessene Verhältnis von

Aufwand und Nutzen (A1) sowie die einfache Anwendbarkeit für den Produktentwickler (A2) dar. Sie bilden zusammen die Ranggruppe 1 mit signifikant höherer Relevanz als die Anforderungen der Ranggruppen 2 und 3.

Tabelle 5.4: Anforderungen an die Anwendbarkeit der Systematik (Application Evaluation)

Die Systematik soll ...

A1	... ein angemessenes Verhältnis von Aufwand und Nutzen haben.
A2	... für den Produktentwickler einfach anwendbar sein.
A3	... in sinnvolle Arbeitsschritte gegliedert sein.
A4	... einen angemessenen Detaillierungsgrad haben.
A5	... sich leicht in bestehende Prozesse der Produktentwicklung integrieren lassen.
A6	... sich leicht auf unterschiedliche Produkte und Industrien übertragen lassen.

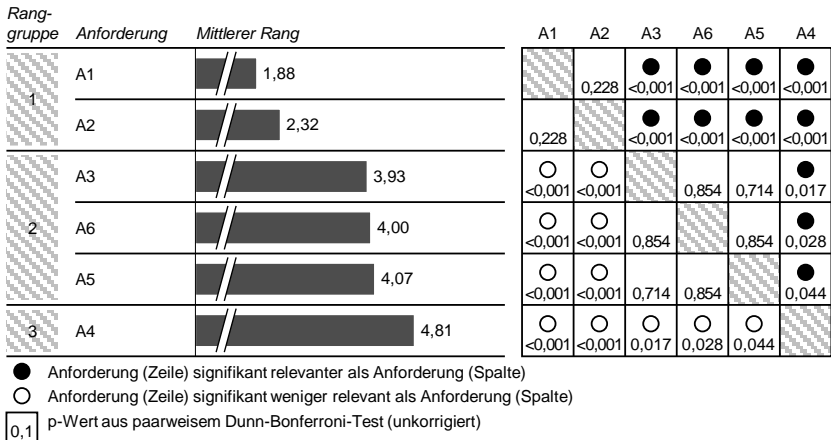


Abbildung 5.13: Ergebnisse der Relevanzbewertung der Anforderungen an die Anwendbarkeit der Systematik (n = 52)

Für die Success Evaluation nach DRM wurden sieben Anforderungen an den Erfolgsbeitrag der Systematik identifiziert, die in Tabelle 5.5 abgebildet sind. Der Friedman-Test ergab mit einer Teststatistik von $\chi^2(6) = 91,710$ und einem p-Wert von $p < 0,001$ signifikante Unterschiede in der Relevanz der unterschiedlichen Anforderungen an den Erfolgsbeitrag. Entsprechend der Ergebnisse der Relevanzbewertung können die Anforderungen in drei Ranggruppen eingeordnet werden (vgl. Abbildung 5.14). Die Anforderung mit der höchsten Relevanz und dem entsprechend niedrigsten mittleren Rang stellt die Forderung zur Unterstützung bei der Reduktion der marktlichen Unsicherheit bzgl. Zielen und Anforderungen aus Kunden- und Anwendersicht (E3) dar. Sie bildet eine eigene Ranggruppe mit signifikant höherer Relevanz als die Anforderungen der Ranggruppen 2 und 3. Die Unterschiede in der mittleren Relevanzbewertung der vier Anforderungen mit dem nächst niedrigeren mittleren Rang sind nicht signifikant, sodass diese die gemeinsame Ranggruppe 2 bilden. Alle Anforderungen der Ranggruppe 2 sind signifikant relevanter als diejenige der Ranggruppe 3.

Tabelle 5.5: Anforderungen an den Erfolgsbeitrag der Systematik (Success Evaluation)

Die Systematik soll ...

<i>E1</i>	... den zielgerichteten Einsatz der AR-Technik zur Produktvalidierung sicherstellen.
<i>E2</i>	... die Einbindung von Kunden und Anwendern in frühe Validierungsaktivitäten erleichtern.
<i>E3</i>	... die marktliche Unsicherheit bzgl. Zielen und Anforderungen aus Kunden- und Anwendersicht frühzeitig reduzieren.
<i>E4</i>	... die Erfassung latenter Ziele und Anforderungen aus Kunden- und Anwendersicht erleichtern.
<i>E5</i>	... den Aufwand früher Validierungsaktivitäten in AR-basierten Validierungsumgebungen reduzieren.
<i>E6</i>	... die Akzeptanz früher Validierungsaktivitäten in AR-basierten Validierungsumgebungen erhöhen.
<i>E7</i>	... das Vertrauen in die erzielten Validierungsergebnisse erhöhen.

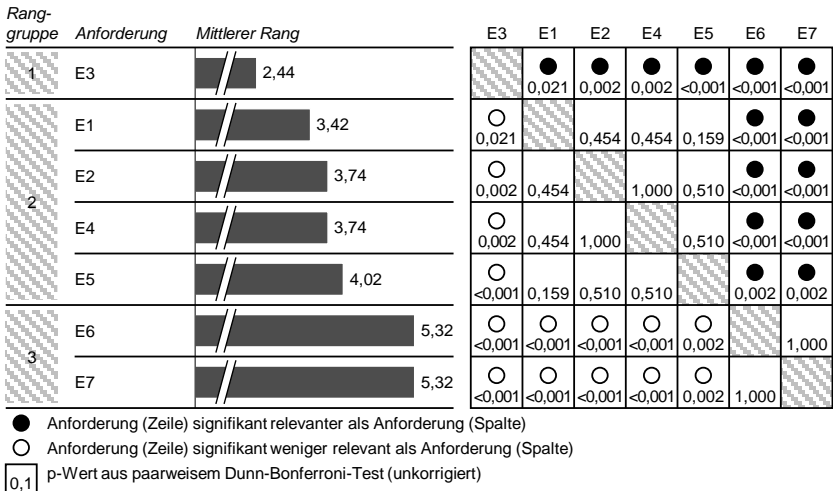


Abbildung 5.14: Ergebnisse der Relevanzbewertung der Anforderungen an den Erfolgsbeitrag der Systematik (n = 52)

5.3.3 Zwischenfazit

Mithilfe der durchgeführten zweistufigen Delphi-Studie wurden Anforderungen an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase identifiziert und damit die Forschungsfrage FF3 adressiert. In der ersten Delphi-Stufe wurden im Rahmen von Experteninterviews 19 Anforderungen ermittelt, die jeweils einem der drei DRM-Evaluationstypen zuzuordnen sind. Die Anforderungen wurden in der zweiten Delphi-Stufe im Rahmen einer fragebogengestützten Online-Umfrage in ihrer Relevanz bewertet.

Anhand der identifizierten Anforderungen lässt sich der zuvor beschriebene Forschungsbedarf zur Entwicklung eines methodischen Vorgehens in Form einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE konkretisieren. So ergibt sich aus den Anforderungen an die Unterstützungsleistung der Systematik unmittelbar der geforderte Umfang der Systematik. Im dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekt dienten sie damit der Steuerung und Priorisierung der Forschungsarbeiten im Rahmen der Präskriptiven Studie. Auch die Anforderungen an die Anwendbarkeit sowie den Erfolgsbeitrag der Systematik wurden bereits im Rahmen der Entwicklung der Systematik

berücksichtigt. Gleichzeitig erfüllen sie die Funktion von Kriterien für die Evaluation der Forschungsergebnisse in der abschließenden Deskriptive Studie II.

5.4 Fazit

In Kapitel 5 wurden die Ergebnisse der Deskriptiven Studie I beschrieben. Die Deskriptive Studie I wurde mit dem Ziel durchgeführt das Verständnis für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase zu vertiefen. Im Zuge dessen wurden die drei Forschungsfragen FF1, FF2 und FF3 adressiert:

- FF1: Wie wird die AR-Technologie in der Entwicklungspraxis zur Produktvalidierung in der Frühen Phase eingesetzt?
- FF2: Welche Potenziale hat der Einsatz der AR-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Entwicklungspraxis?
- FF3: Welche Anforderungen sind an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu stellen?

Die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgte im Rahmen von drei empirischen Studien. In der ersten Studie wurde eine fragebogengestützte Umfrage unter deutschen Industrieunternehmen zur Untersuchung des Einsatzes der AR-Technologie zur Produktvalidierung in der Entwicklungspraxis durchgeführt (vgl. Kapitel 5.1). Die Umfrageergebnisse zeigen eine breite Zustimmung zum Potenzial der AR-Technologie, den Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten effektiv zu begegnen. Die Umfrageteilnehmer sehen im Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung demnach etwa einen Weg zur direkten Einbindung von Kunden in die Validierungsumgebung im Rahmen von Kundentests, zur Erfassung latenter, nicht expliziter Kundenanforderungen sowie zur Vermittlung eines realistischen Produkterlebnisses bereits in der Frühen Phase, auch wenn das zu untersuchende System nicht oder nur in Teilen real vorliegt.

Die dafür erforderliche Wiedergabetreue AR-basierter Prototypen wurde in der zweiten Studie differenziert entlang verschiedener Wiedergabedimensionen aus den Bereichen Erscheinung, Funktionalität und Interaktivität untersucht (vgl. Kapitel 5.2). Dazu wurden Probanden in einer experimentellen Untersuchung gebeten die Wiedergabetreue eines AR-Prototyps im Vergleich zu einer Produktskizze und einem CAD-Modell zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen für den AR-Prototyp in der Mehrzahl der untersuchten Wiedergabedimensionen eine deutlich höhere Bewertung der Wiedergabetreue. Im direkten Vergleich mit Produktmodellen, die ebenfalls bereits in der Frühen Phase zur Verfügung stehen, ermöglichen AR-basierte Prototypen

damit ein potenziell realistischeres Erlebnis des zu validierenden Produkts und schaffen so die Voraussetzung für zielgerichtete und aussagekräftige Ergebnisse von Kundentests.

Die ersten beiden durchgeführten empirischen Studien bestätigen damit die literaturbasierte Analyse geeigneter Anwendungsfälle der AR-Technologie in der Produktvalidierung aus dem Stand der Forschung (vgl. Kapitel 2.4.4). Besonderes Potenzial für die Anwendung der AR-Technologie in der Produktvalidierung besteht demnach bei Kundentests zur Präferenzmessung in der Frühen Phase. Grenzen für die Anwendung der AR-Technologie in der Produktvalidierung ergeben sich dabei grundsätzlich durch Beschränkung auf die Validierung von Produktmerkmalen, die sich für den Anwender unmittelbar durch seine menschliche Sinneswahrnehmung erschließen lassen. Die Anwendung der AR-Technologie im Rahmen von Kundentests bleibt damit folglich auf interaktive Produkte beschränkt. Weiterhin bleibt das Potenzial zur Erzielung einer hohen Wiedergabetreue in diesen Wiedergabedimensionen für den virtuellen Teil der AR-Szene bei heute gängigen AR-Systemen auf visuell erlebbare Produktmerkmale beschränkt.

Die Umfrageergebnisse der ersten Studie zeigen gleichzeitig, dass die Potenziale der AR-Technologie in der Validierung interaktiver Produkte in der Entwicklungspraxis bisher nur unzureichend genutzt werden, zumal eine Mehrheit der Umfrageteilnehmer angibt, dass der Einsatz der AR-Technik zur Produktvalidierung in der Praxis oft nicht zielgerichtet erfolgt und eine unterstützende Methode helfen würde, die Potenziale der AR-Technik in der Produktvalidierung besser zu nutzen. Die Umfrageergebnisse bekräftigen damit den in Kapitel 3.1 formulierten Forschungsbedarf.

Der Forschungsbedarf konnte im Zuge der dritten Studie, die im Rahmen der Deskriptiven Studie I durchgeführt wurde, weiter konkretisiert werden (vgl. Kapitel 5.3). Dazu wurden in einer zweistufigen Delphi-Studie 19 Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase identifiziert und in ihrer Relevanz bewertet. Die Anforderungen beziehen sich entsprechend der drei DRM-Evaluationstypen auf die Unterstützungsleistung, die Anwendbarkeit und den Erfolgsbeitrag der Systematik. Sie werden in der Deskriptiven Studie II als Evaluationskriterien herangezogen und in der Präskriptiven Studie bei der Entwicklung der Systematik berücksichtigt.

6 Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase

In diesem Kapitel wird die ausgehend von den in Kapitel 5.3 identifizierten Anforderungen im Rahmen der Präskriptiven Studie entwickelte Systematik zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE beschrieben. Das Kapitel adressiert damit die Forschungsfrage FF4:

FF4: Wie ist eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu gestalten?

Den modelltheoretischen und methodischen Rahmen für die Systematik bilden die im Stand der Forschung eingeführten Inhalte der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung. Insbesondere liegt der Systematik ein Verständnis der Produktentwicklung im Sinne des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers zugrunde (vgl. Kapitel 2.2.2). Weiterhin basieren zentrale Bestandteile der Systematik auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (vgl. Kapitel 2.3.5), dem Produktprofil (vgl. Kapitel 2.1.3.1) sowie dem Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation (vgl. Kapitel 2.1.3.2). Zur Strukturierung und Modellierung der Systematik werden die Problemlösungsmethode SPALTEN (vgl. Kapitel 2.1.4.1) sowie das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM (vgl. Kapitel 2.1.4.5) herangezogen.

Zu den zwei zentralen Bestandteilen der Systematik zählen ein Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen sowie ein Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen, die in den beiden folgenden Kapiteln 6.1 und 6.2 im Detail beschrieben sind (vgl. Abbildung 6.1). Der Aufbau des Referenzprozessmodells gliedert sich in fünf Phasen, die wiederum jeweils einzelne Prozessschritte umfassen. Das Referenzprozessmodell bildet den prozessualen Rahmen für verschiedene entwickelte Methoden und Leitfäden. Sie dienen der operativen Unterstützung der Prozessschritte und sind ebenfalls in Kapitel 6.2 dargestellt. Die Methoden und Leitfäden referenzieren neben den beschriebenen Inhalten der KaSPro auch das entwickelte Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen, dem daher eine zentrale Rolle in der Systematik zukommt.

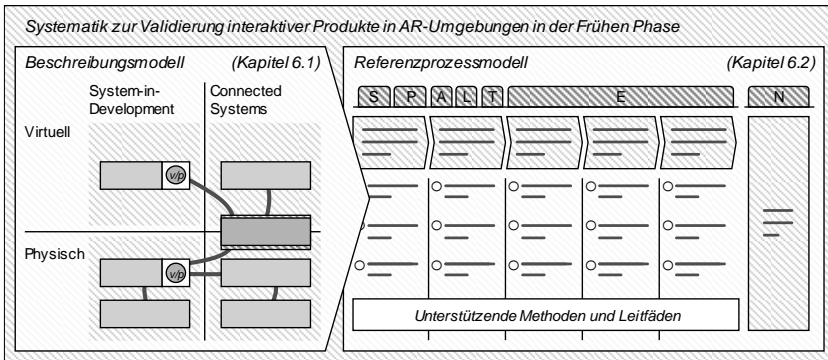


Abbildung 6.1: Umfang der Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase

Abbildung 6.2 zeigt die entwickelte Systematik im Kontext des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM. Das im Prozessmodell entlang der einzelnen Prozessschritte beschriebene Vorgehen für die AR-gestützte Produktvalidierung lässt sich im iPeM verschiedenen Basis- und Kern-Aktivitäten auf den zwei Layern Produkt G_n und Validierungssystem zuordnen (vgl. Modellierung des Referenzprozesses im iPeM in Kapitel 6.2). Zu den adressierten Aktivitäten der Produktentstehung zählen die Basis-Aktivitäten Projekte managen, Validieren und Verifizieren, Wissen managen und Änderungen managen sowie die Kern-Aktivitäten Ideen finden, Prinzip und Gestalt modellieren und Prototyp aufbauen. Die einzelnen Phasen des entwickelten Prozessmodells folgen in ihrer grundsätzlichen Logik zudem den Aktivitäten der Problemlösung nach der SPALTEN-Methode. Das im Prozessmodell beschriebene durchgängige methodische Vorgehen zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen lässt sich demnach als spezifische Auslegung eines allgemeinen Problemlösungsprozesses begreifen. Bei dem entwickelten Prozessmodell handelt es sich im Sinne der Abstraktionsgrade im Phasenmodell des iPeM um ein Referenzprozessmodell, also um eine auf Basis von Erfahrungswerten erstellte Vorlage des Projektverlaufs für die AR-gestützte Produktvalidierung (vgl. Kapitel 2.1.4.5). Für die Umsetzung in einem konkreten Entwicklungsprojekt ist der im Referenzprozessmodell beschriebene Referenzverlauf entsprechend der projektspezifischen Rahmenbedingungen anzupassen und in einen Soll-Verlauf zu überführen, der wiederum in einem SOLL-Prozessmodell abzubilden ist.

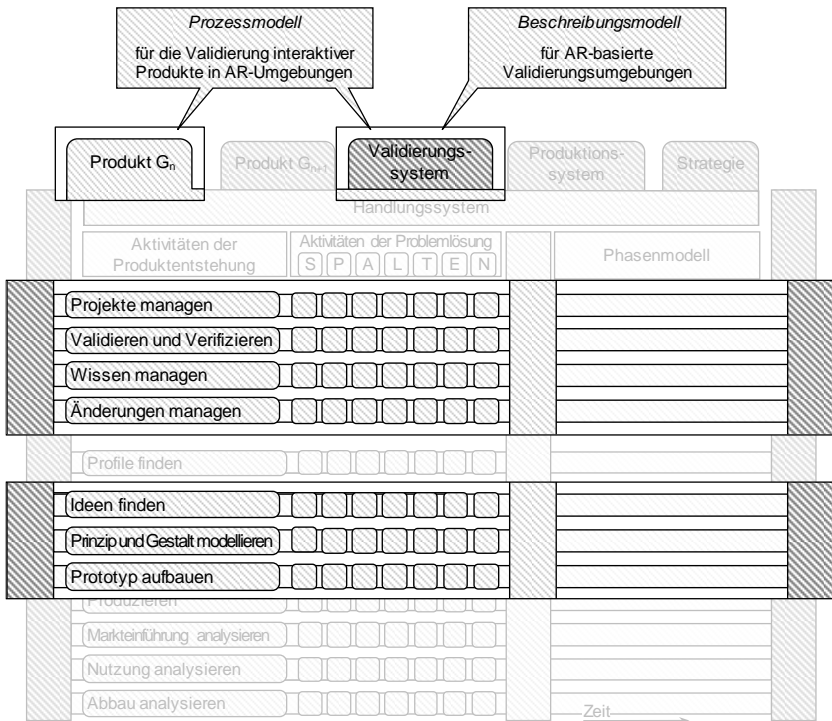


Abbildung 6.2: Verortung der Systematik im integrierten Produktentstehungsmodell iPeM

Das Beschreibungsmodell als Teil der entwickelten Systematik zielt auf die Bereitstellung einer Modellsprache zur Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen und damit eines spezifischen Teils des Validierungssystems ab. Eine AR-basierte Validierungsumgebung stellt nach diesem Verständnis eine Auswahl der Elemente des Validierungssystems dar, welches darüber hinaus noch weitere Validierungsumgebungen umfassen kann. Die Entwicklung des Validierungssystems und damit auch die Entwicklung AR-basierter Validierungsumgebungen ist im iPeM durch einen eigenen Entwicklungsprozess auf einem separaten Layer repräsentiert. Das entwickelte Beschreibungsmodell ist in Abbildung 6.2 daher diesem Layer zugeordnet. Das Validierungssystem ist wiederum Teil des Layer-übergreifenden Ressourcensystems und steht als solchem dem im Produkt-Layer modellierten Entwicklungsprozess als Ressource zur Verfügung. Das entwickelte Beschreibungs- sowie

das Referenzprozessmodell sind in ihrer kodifizierten Form wiederum selbst Teil des Ressourcensystems und auf diese Weise dem Produktentwickler als Teil des Handlungssystems zugänglich.

Die Systematik aus Beschreibungs- und Referenzprozessmodell sowie den unterstützenden Methoden und Leitfäden wurde in Teilen bereits bei Reinemann, Albers et al. (2018), Albers, Reinemann, Hirschter et al. (2019) und Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019) veröffentlicht. Relevante Vorarbeiten für die Entwicklung der Systematik wurden zudem im Rahmen der studentischen Abschlussarbeiten von Güttinger (2018)¹, Kiziltug (2019)¹, Pfeiffer (2018)², Schmid (2019)² und Syring (2018)¹ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erbracht, die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurden.

6.1 Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen

Voraussetzung für die methodische Unterstützung von Produktentwicklern und Produktentwicklungsteams bei der AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung in der Frühen Phase ist die Verfügbarkeit einer Modellsprache zur einheitlichen Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen. Das im Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekts entwickelte Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen stellt ebensolch eine Modellsprache zur Verfügung. Es bildet damit einen grundlegenden Bestandteil der entwickelten Systematik.

Das entwickelte Beschreibungsmodell baut auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz nach Albers auf (vgl. Kapitel 2.3.5). Der IPEK-XiL-Ansatz stellt mit dem IPEK-XiL-Framework und dem Modell der IPEK-XiL-Architektur bereits Beschreibungsmodelle für Validierungsumgebungen und deren Konfigurationen bereit. Das entwickelte Beschreibungsmodell greift in weiten Teilen auf diese bestehenden Modelle zurück. Um dabei den Anforderungen des speziellen Anwendungsfalls der Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen gerecht zu werden, wurden die generischen Beschreibungsmodelle des IPEK-XiL-Ansatzes selektiv konkretisiert. Der Anwendungsbereich des spezifischen Beschreibungsmodells für AR-basierte Validierungsumgebungen und -konfigurationen umfasst damit einen Teilbereich des

¹ Unveröffentlichte Masterarbeit

² Unveröffentlichte Bachelorarbeit

Umfangs der zugrundeliegenden, generischen Beschreibungsmodelle des IPEK-XiL-Ansatzes (vgl. Abbildung 6.3). (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

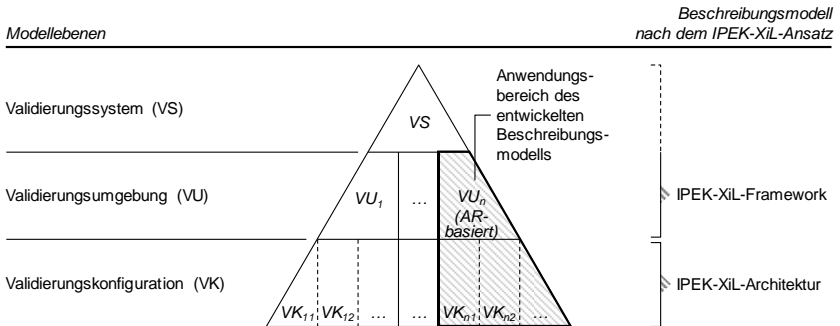


Abbildung 6.3: Modellebenen und Anwendungsbereich des spezifischen Beschreibungsmodells für AR-basierte Validierungsumgebungen im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 437)

Um die generischen Beschreibungsmodelle des IPEK-XiL-Ansatzes an die spezifischen Anforderungen AR-basierter Validierungsumgebungen anzupassen, wurden Konkretisierungen in drei Bereichen vorgenommen. Diese betreffen die Einbindung des Anwenders in die Validierungsumgebung, die Modellierung von AR-Interfaces als Teil der Validierungsumgebung sowie die Modellierung von gemischt physisch-virtuellen Teilsystemen. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die Konkretisierungen an den generischen Beschreibungsmodellen des IPEK-XiL-Ansatzes für den spezifischen Anwendungsfall AR-basierter Validierungsumgebungen. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Einbindung des Anwenders in die Validierungsumgebung

Dem Verständnis des IPEK-XiL-Ansatzes folgend, erfolgt die Validierung eines Teilsystems stets im Kontext seines Supersystems sowie der mit ihm verbundenen Connected Systems (Albers, Behrendt et al., 2016). Zu diesen verbundenen Systemen gehört insbesondere auch der Anwender als ein obligatorischer Bestandteil jeder Validierungsumgebung. Er kann dabei physisch in die Validierungsumgebung eingebunden sein oder durch ein virtuelles Echtzeit-Simulationsmodell repräsentiert

Tabelle 6.1: Übersicht der AR-spezifischen Konkretisierungen an den Beschreibungsmodellen des IPEK-XiL-Ansatzes nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 437)

	<i>IPEK-XiL-Ansatz</i>	<i>AR-spezifische Konkretisierungen</i>
<i>Einbindung des Anwenders in die Validierungsumgebung</i>	Anwender können physisch eingebunden oder durch virtuelle Echtzeit-Simulationsmodelle repräsentiert sein.	Der reale Anwender muss physisch eingebunden sein.
<i>Modellierung von AR-Interfaces</i>	Teilsystemmodelle, die untereinander keine direkte Verbindung eingehen können, werden mithilfe von Koppel-funktionen verbunden, die durch Koppelsysteme implementiert werden.	Das AR-Interface erfüllt die Koppel-funktion zur Verbindung aller virtuellen und physischen Teilsystemmodelle der Validierungsumgebung. Das AR-Interface ist als Koppelsystem modelliert.
<i>Modellierung von gemischt physisch-virtuellen Teilsystemen</i>	Einzelne Teilsysteme können entweder durch Modelle in der physischen oder der virtuellen Domäne der Validierungsumgebung repräsentiert sein. In der Validierungskonfiguration wird eine eindeutige Zuordnung der Teilsystemmodelle vorgenommen.	Die AR-Technologie ermöglicht es, dass einzelne Teilsystemmodelle als gemischte physisch-virtuelle Modelle in zwei Domänen gleichzeitig existieren können. Zwischen ihnen besteht über das AR-Interface ein funktionaler Zusammenhang. Die Zusammengehörigkeit der physischen und virtuellen Modelle ein und desselben Teilsystems wird im Beschreibungsmodell durch ein spezielles Symbol angezeigt.

werden, das den realen Anwender ersetzt. Im Falle AR-basierter Validierungsumgebungen ist jedoch die physische Integration des realen Anwenders zwingend erforderlich. Dies ist dadurch bedingt, dass die auf dem Markt erhältlichen AR-Systeme für den Gebrauch durch reale Anwender ausgelegt sind. Darüber hinaus fehlen geeignete virtuelle Ersatzmodelle zur Beurteilung der in der AR-Umgebung adressierten visuellen, auditiven und haptischen Sinnesreize. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Modellierung von AR-Interfaces

AR-Interfaces wie AR-Brillen oder Tablets kommen in AR-basierten Validierungsumgebungen eine zentrale Rolle zu. Der Terminologie des IPEK-XiL-Ansatzes folgend, kann ihre Funktion als sogenannte Koppelfunktion beschrieben werden, die durch ein Koppelsystem, in diesem Fall des AR-Systems, erfüllt wird. AR-basierte Validierungsumgebungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie über mindestens ein Koppelsystem in Form eines AR-Systems verfügen. Die Koppelfunktion dieses Systems dient der Verbindung der virtuellen und physischen Teilsysteme der Validierungsumgebung (d.h. des System-in-Development, des Anwenders sowie der Connected Systems). Ein Beispiel hierfür ist die Überlagerung eines physischen Prototyps mit einer virtuellen Textur mit Hilfe einer vom Anwender getragenen AR-Brille. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Die Modellierung eines AR-Interface als Koppelsystem ist nach der Definition eines Koppelsystems im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes nur dann zulässig, wenn es keinen Einfluss auf das relevante Systemverhalten hat (Albers, Pinner et al., 2016; Albers, Mandel et al., 2018). Für AR-Interfaces ist dies eine stark vereinfachende Annahme. Tatsächlich ist ein solcher Einfluss aufgrund der vorhandenen technischen Defizite der auf dem Markt erhältlichen AR-Systeme nicht auszuschließen. Die Wahrnehmung der AR-Umgebung durch den Anwender wird zu einem gewissen Grad nicht nur durch die umgebenden physischen und virtuellen Teilsysteme, sondern ebenso durch die Eigenschaften des AR-Interfaces als Koppelsystem beeinflusst. Zu diesen die Wahrnehmung beeinflussenden Eigenschaften von AR-Interfaces gehören etwa der Tragekomfort, die Interaktionsmöglichkeiten, die Rendering-Qualität der virtuellen Inhalte, die Farbwirkung und Opazität der verwendeten Bildschirmtechnologie oder die Wiederholrate und Latenz des verwendeten Tracking-Verfahrens (vgl. Kapitel 2.4.3). Viele der in Kapitel 2.4.3 beschriebenen technischen Limitationen derzeit verfügbarer AR-Systeme, die zu einem geringeren Immersionsgrad und damit einem gestörten Präsenzepfinden des Anwenders führen können, werden jedoch bereits im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten adressiert und haben keinen permanenten Charakter (Rademacher et al., 2014). Mit der fortschreitenden Entwicklung der AR-Technologie ist daher ein immer geringerer Einfluss des AR-Interface auf das Systemverhalten zu erwarten. Vielmehr ist davon auszugehen, dass perspektivisch weniger die technischen Spezifikationen der AR-Systeme den Immersionsgrad virtueller Szenen beschränken, sondern die Gestaltung der virtuellen Szene durch den Entwickler einer AR-Applikation. Vor diesem Hintergrund erscheint die Modellierung des AR-Interface als Koppelsystem im Sinne des IPEK-XiL-Ansatzes gerechtfertigt. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Modellierung von gemischt physisch-virtuellen Teilsystemen

Der Einsatz von AR-Interfaces in AR-basierten Validierungsumgebungen ermöglicht es einzelne Teilsysteme der Validierungsumgebung nicht entweder physisch oder virtuell, sondern vielmehr gemischt physisch-virtuell darzustellen. So lässt sich beispielsweise bei einem physischen Prototyp, der mit einer virtuellen Textur überlagert ist, die Oberflächenrauigkeit physisch abbilden, während die Farbwirkung desselben Teilsystems virtuell dargestellt wird. Im Modell der IPEK-XiL-Architektur, dem Beschreibungsmodell des IPEK-XiL-Ansatzes für Validierungskonfigurationen, können einzelne Teilsystemmodelle entweder Teil der physischen oder virtuellen Domäne der Validierungsumgebung sein (Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Mandel et al., 2018). In der Validierungskonfiguration ist in dieser Hinsicht eine eindeutige Zuordnung vorgesehen. Im konkretisierten Beschreibungsmodell für Konfigurationen AR-basierter Validierungsumgebungen wird diese Einschränkung aufgehoben. Damit wird es möglich, dass Modelle desselben Teilsystems gleichzeitig in der physischen und virtuellen Domäne der Validierungsumgebung existieren können. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Die Beschreibung des Aufbaus einer AR-basierten Validierungsumgebung und deren Konfiguration folgt im konkretisierten Beschreibungsmodell analog zum IPEK-XiL-Ansatz einem Top-Down-Ansatz ausgehend von den drei relevanten Übersystemen Anwender, Produkt und Umwelt (Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Mandel et al., 2018; Geier, Jäger, Stier & Albers, 2012). Während das Produkt und die Umwelt physisch, virtuell oder gemischt physisch-virtuell vorliegen können, ist der

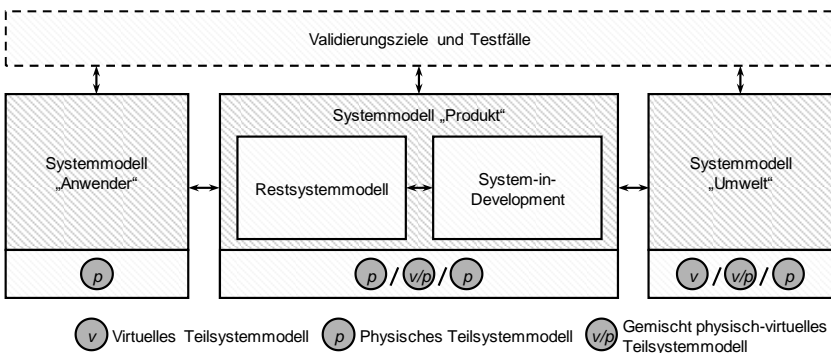


Abbildung 6.4: Konkretisiertes Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen basierend auf dem IPEK-XiL-Framework nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 439)

reale Anwender zwingend physisch in die AR-basierte Validierungsumgebung eingebunden. Als Teilsysteme des Produktsystems wird zwischen dem System-in-Development und dem Restsystem unterschieden. Die Auswahl der in eine AR-basierte Validierungsumgebung eingebundenen Teilsysteme geschieht im Hinblick auf die Erfüllung eines oder mehrerer spezifischer Validierungsziele in einem oder mehreren spezifischen Testfällen. Abbildung 6.4 zeigt den gewählten Modellierungsansatz für die Beschreibung von AR-basierten Validierungsumgebungen auf Basis des IPEK-XiL-Frameworks. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Die Teilsysteme einer Validierungsumgebung lassen sich weiter unterteilen in Systems-in-Development und Connected Systems (Albers, Behrendt et al., 2016). Zwischen den Teilsystemen einer Validierungsumgebung bestehen (gegenseitige)

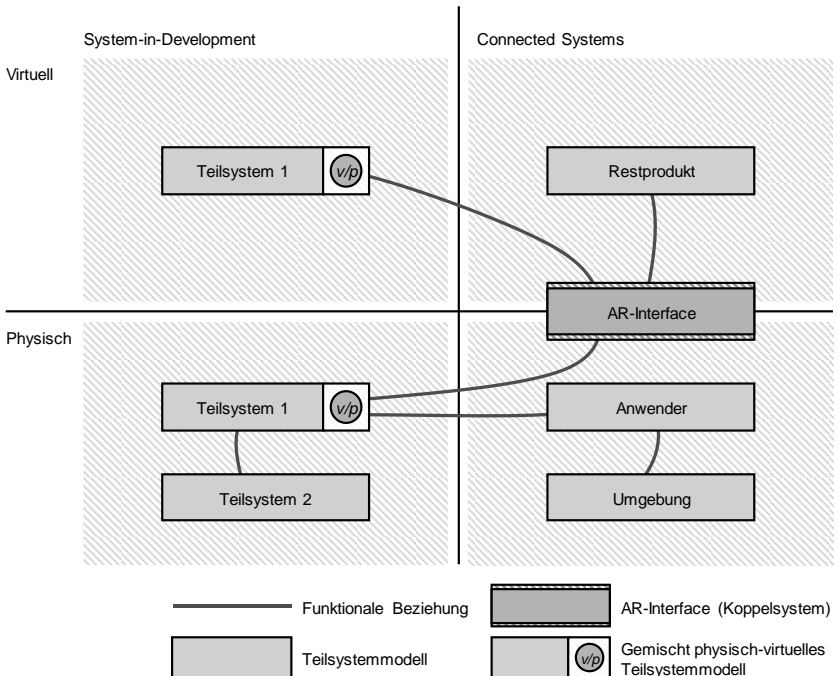


Abbildung 6.5: Konkretisiertes Beschreibungsmodell für die Konfiguration AR-basierter Validierungsumgebungen basierend auf dem Modell der IPEK-XiL-Architektur nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 440)

funktionale Beziehungen. Die funktionalen und strukturellen Elemente einer Validierungsumgebung bilden die Grundlage für den gewählten Modellierungsansatz zur Beschreibung der Konfiguration von AR-basierten Validierungsumgebungen auf der Basis des Modells der IPEK-XiL-Architektur (vgl. Abbildung 6.5). (Albers, Reinemann, Fahl & Hirscher, 2019)

Durch Zuordnung zu einem der vier Quadranten zeigt das Beschreibungsmodell für jedes der Teilsysteme weiterhin die jeweilige Art der Darstellung (physisch bzw. virtuell) an. Der Anwender ist dabei stets im vierten Quadranten verortet. Wie zuvor beschrieben, können gemischt physisch-virtuelle Modelle von Teilsystemen gleichzeitig in der physischen und virtuellen Domäne der Validierungsumgebung existieren. Zwischen ihnen besteht über das AR-Interface ein funktionaler Zusammenhang. Die Zusammengehörigkeit des physischen und virtuellen Modells ein und desselben Teilsystems zueinander wird im Beschreibungsmodell durch ein spezielles Symbol gekennzeichnet. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirscher, 2019)

6.2 Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen

Neben dem Beschreibungsmodell stellt das Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen den zweiten zentralen Bestandteil der entwickelten Systematik dar. Das Modell bildet einen Referenzprozess für ein durchgängiges methodisches Vorgehen zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE ab. Der Prozess unterstützt Produktentwickler und Produktentwicklungsteams entlang des gesamten Vorgehens zur AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung in der Frühen Phase. Er ist in fünf Phasen gegliedert, die jeweils einzelne Prozessschritte umfassen. Zu den fünf Phasen des Referenzprozesses gehören das Festlegen und Konkretisieren der Validierungsziele, das Konfigurieren und der Aufbau der Validierungsumgebung, die Durchführung des Tests und die abschließende Interpretation der Testergebnisse. Um eine kontinuierliche Verbesserung der Systematik zu ermöglichen, sieht der Referenzprozess im Anschluss an ihre Anwendung zudem ein Nachbereiten und Lernen vor.

Das gesamte Vorgehen lässt sich damit als spezifische Auslegung eines allgemeinen Problemlösungsprozesses begreifen und folgt in seiner grundsätzlichen Logik den einzelnen Aktivitäten der Problemlösung nach der SPALTEN-Methode. Der im Referenzprozessmodell beschriebene Referenzprozess kann in der entwicklungspraktischen Anwendung als Ganzes oder aber auch in Teilen durchlaufen werden. Darüber hinaus sind Wiederholungen einzelner Phasen sowie Iterationen explizit

möglich. Abbildung 6.6 zeigt das Prozessmodell mit dem Referenzprozess entlang der fünf Phasen sowie die zugehörigen Prozessschritte und ihre Zuordnung zu den Aktivitäten der Problemlösung nach der SPALTEN-Methode.

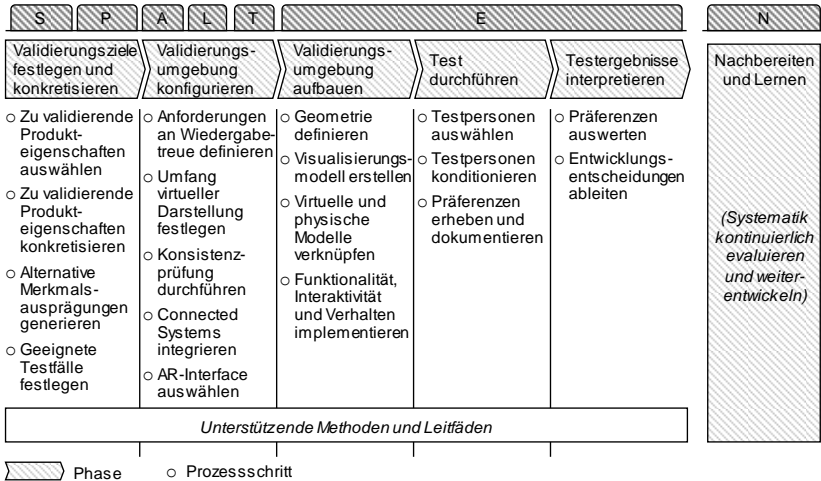
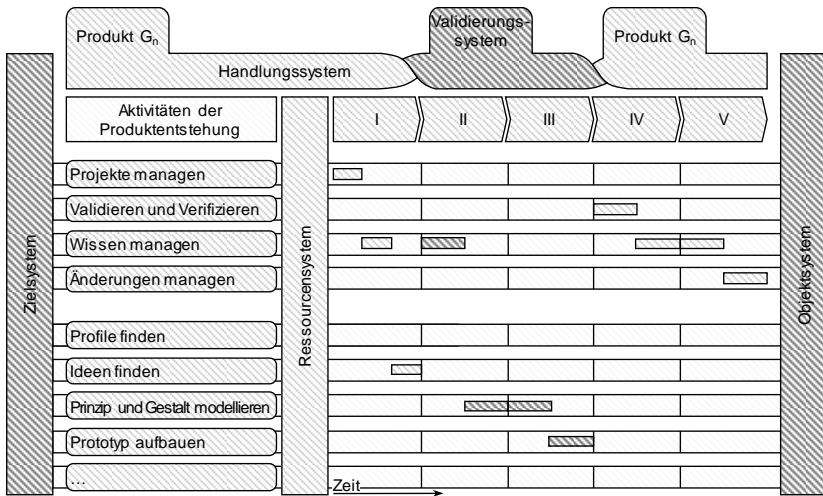


Abbildung 6.6: Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen nach Reinemann, Albers et al. (2018, S. 313)

Wie zuvor beschrieben, adressiert der entwickelte Referenzprozess verschiedene Basis- und Kern-Aktivitäten der Produktentstehung aus dem integrierten Produktentstehungsmodell iPeM auf den zwei Layern Produkt G_n und Validierungssystem. Abbildung 6.7 zeigt die einzelnen Phasen des Referenzprozesses im Phasenmodell des iPeM und ordnet das entlang der einzelnen Prozessschritte beschriebene Vorgehen den Aktivitäten der Produktentstehung zu. Die absolute sowie auch die relative Dauer der einzelnen Phasen zueinander ist stark abhängig von den projektspezifischen Randbedingungen und ist daher in der Abbildung nicht näher ausgewiesen.

Die Prozessschritte werden operativ durch verschiedene entwickelte Methoden und Leitfäden unterstützt. In den folgenden Kapiteln werden für jede Phase des Referenzprozesses die zugehörigen Prozessschritte beschrieben sowie im Zuge dessen auch auf die unterstützenden Methoden und Leitfäden für die entwicklungspraktische Anwendung eingegangen.



Prozessschritte des Referenzprozesses:

- | | | |
|--|-----------------------------------|---|
| I Validierungsziele festlegen und konkretisieren | III Validierungsumgebung aufbauen | Referenzprozess im Layer Produkt G_n |
| II Validierungsumgebung konfigurieren | IV Test durchführen | Referenzprozess im Layer Validierungssystem |
| | V Testergebnisse interpretieren | |

Abbildung 6.7: Modellierung des entwickelten Referenzprozesses im iPeM

6.2.1 Validierungsziele festlegen und konkretisieren

Im Rahmen der ersten Phase des Referenzprozesses erfolgt die Festlegung und Konkretisierung der Validierungsziele. Als Prozessschritte umfasst sie die Auswahl und Konkretisierung der zu validierenden Produkteigenschaften, die Generierung alternativer Merkmalsausprägungen sowie die Festlegung geeigneter Testfälle.

Zu validierende Produkteigenschaften auswählen

Die Festlegung des Validierungsziels, d.h. des spezifischen Zwecks der Validierungsaktivität, steht unabhängig von der Art der Validierungsaktivität am Anfang des Validierungsprozesses (Albers, Behrendt et al., 2016; Klingler, 2016). Im Kontext kundenintegrierter Validierungsaktivitäten zur Präferenzmessung liegt das Validierungsziel allgemein gesprochen in der Ermittlung des Einflusses bestimmter Produkteigenschaften und deren Ausprägungen auf den Grad der Bedürfnisbefriedigung von Kunden und Anwendern. Die Festlegung des Validierungsziels erfordert

demnach zunächst die Auswahl der im Zuge der Validierungsaktivität zu validierenden Produkteigenschaften.

Albers, Klingler & Wagner (2014) schlagen ein Vorgehen zur Festlegung von Validierungszielen auf Basis einer Kritikalitätsbewertung der zu validierenden Funktionen und Teilsysteme eines Produkts vor (vgl. Kapitel 2.3.3). In der Frühen Phase ist die technische Realisierung des Kunden- und Anwendernutzens in Form von Funktionen und Teilsystemen jedoch zumindest in Teilen oft noch weitgehend unbekannt (vgl. Kapitel 2.2.3). Den Ausgangspunkt für Validierungsaktivitäten bildet in dieser Phase vielmehr die lösungsoffene Modellierung des mit einer Produktgeneration angestrebten Nutzens im Produktprofil (vgl. Kapitel 2.3.4). Zur Unterstützung bei der Festlegung von Validierungszielen für AR-gestützte Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase wurde daher ein methodisches Vorgehen ausgehend von der Modellierung des Kunden- und Anwendernutzens durch lösungsoffene, kundenerlebbare Produkteigenschaften gewählt. Grundlage der Methode ist das Produktprofil in seiner Form als Eigenschaftsprofil (vgl. Kapitel 2.1.3.1).

Die AR-gestützte Validierung erfordert jedoch gleichwohl die Konkretisierung der lösungsoffenen Produkteigenschaften bis zu einem Grad, der die Abbildung des angestrebten Kunden- und Anwendernutzens in Form eines AR-Prototyps als konkretem Artefakt erlaubt. Unter Berücksichtigung der anhand von AR-Prototypen abbildbaren Wiedergabedimensionen und damit auch der Grenzen für die Anwendung der AR-Technologie in der Produktvalidierung ist dazu der technische Lösungsraum für die zu validierenden Produkteigenschaften hinsichtlich der visuellen und non-visuellen Erscheinung, Funktionalität und Interaktivität der Produktgeneration zu konkretisieren (vgl. Kapitel 5.2). Die Kenntnis des technischen Lösungsprinzips zur Realisierung der Produkteigenschaften ist dagegen für den Aufbau des AR-Prototyps nicht notwendigerweise erforderlich. Die notwendige Konkretisierung der zu validierenden lösungsoffenen Produkteigenschaften erfolgt nach der Logik des erweiterten ZHO-Modells im Rahmen eines Kreationsschritts (vgl. Kapitel 2.1.4). Mit der vorherigen Festlegung des Validierungsziels wird folglich ein Entwicklungsschwerpunkt für den gesamten zusammenhängenden Zyklus aus Validierung und Kreation gesetzt, zumal sich der Kreationsschritt innerhalb des Zyklus ebenfalls am Validierungsziel orientiert. Ein derartiges Vorgehen lässt sich als validierungsgetriebene Kreation verstehen (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019; Reinemann, Albers et al., 2018).

Die für die erste Phase des Referenzprozesses entwickelte Methode unterstützt neben der Festlegung auch die notwendige Konkretisierung der Validierungsziele für die AR-gestützte Validierung. Die ausgewählten lösungsoffenen Produkteigen-

schaften werden dazu im Zuge des methodischen Vorgehens mit alternativen technischen Lösungen verknüpft. Die Konkretisierung geschieht dabei entlang der Ebenen des Produktmodells zur Strukturierung der Produktspezifikation (vgl. Kapitel 2.1.3.2). Abbildung 6.8 zeigt den gesamten methodisch unterstützten Prozess zur Auswahl und Konkretisierung von Produkteigenschaften für die AR-gestützte Validierung in der Frühen Phase anhand des Ausschnitts eines ausgefüllten Templates für ein Entwicklungsprojekt aus der Automobilindustrie. Exemplarisch wird das methodische Vorgehen hier anhand der beiden lösungsoffenen Produkteigenschaften *Alltagstauglichkeit* und *Fahrkomfort* dargestellt. Die beiden Produkteigenschaften stellen nur einen Teil des gesamten Produktprofils dar. Auch die zugeordneten Produktfunktionen und Teilsysteme sind in der Abbildung nicht in ihrer Gesamtheit dargestellt und dienen nur der Veranschaulichung. Ausgangspunkt der Methode sind die im Produktprofil in seiner Modellierung als Eigenschaftsprofil definierten lösungsoffenen, kundenerlebbaaren Produkteigenschaften. Standardisierte Eigenschaftsstrukturen dieser Art werden in der Entwicklungspraxis häufig dazu verwendet, zusammenhängende Produkteigenschaften über mehrere hierarchische Ebenen zu strukturieren (Schirmer, 1990; Schulte-Henke, 2007). Die hier vorgestellte Methode ist auf zwei Ebenen beschränkt. Beispielsweise ist das *Kofferraumvolumen* eine Eigenschaft der zweiten Ebene, die der übergeordneten Eigenschaft *Alltagstauglichkeit* zuzuordnen ist. (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen ist es angesichts von Effizienzzielen und Ressourcenbeschränkungen weder möglich noch sinnvoll, alle Produkteigenschaften in einem Kurations-Validierungs-Zyklus zu berücksichtigen und in entsprechender Granularität zu spezifizieren. Der methodische Ansatz sieht daher die Auswahl derjenigen Produkteigenschaften vor, die im jeweiligen Kurations-Validierungs-Zyklus vorrangig berücksichtigt werden sollen. Mit der Auswahl der zu validierenden Produkteigenschaften erfolgt sogleich implizit die Festlegung des Validierungsziels. Die Auswahl basiert auf einer Priorisierung anhand der drei Kriterien Kundenrelevanz, Wettbewerbspositionierung sowie Soll-Veränderung, welche für jede Produkteigenschaft unabhängig voneinander bewertet werden. Die Bewertung der Kundenrelevanz orientiert sich am Kano-Modell (vgl. Kapitel 2.1.2.2). Dabei wird entsprechend zwischen Begeisterungsmerkmalen, Leistungsmerkmalen und Basismerkmalen unterschieden. Als zweites relevantes Bewertungskriterium für die Auswahl der zu priorisierenden Produkteigenschaften wird deren Bedeutung für die Wettbewerbspositionierung der Produktgeneration herangezogen. Auf diese Weise lassen sich gezielt differenzierende Produkteigenschaften festlegen, deren Realisierung und Validierung in frühen Kurations-Validierungs-Zyklen priorisiert werden soll. Die Produkteigenschaften werden dazu den Kategorien *BIC*, *TOP*, *IBC* und *keine Wettbewerbspositionierung* zugeordnet (vgl. Legende in Abbildung 6.8). (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Zu validierende Produkteigenschaften auswählen				Zu validierende Produkteigenschaften konkretisieren			Alternative Ausprägungen generieren			
Produkteigenschaften	Wettbewerbspositionierung Kundenrelevanz	Soll-Veränderung	Auswahl	Produktfunktion	Teilsystem	Produktmerkmal	Variationsart	Alternative Ausprägungen		
Alltags-tauglich-keit	Ablage-möglich-keiten	1	BIC	++	<input checked="" type="checkbox"/>	-	Getränke-halter	Position	GV	Mittelkonsole Armaturen-brett Türverkleidung
								Form	GV	Einteilig Zweiteilig
								Größe	GV	0,5l Flasche 0,75l Flasche 1l Flasche
	Kofferraum-volumen	2	TOP	o	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-	
	Gelände-gängigkeit	2	n/a	--	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-	
Fahr-komfort	Federungs-komfort	1	BIC	+	<input checked="" type="checkbox"/>	Aktive Wank-stabilisierung	Feder-Dämpfer-System	Feder-konstante	GV	Weich Mittel Starr
								Dämpfungs-koeffizient	GV	Niedrig Mittel Hoch
								Federlänge	GV	Kurz Mittel Lang
	Geräusch-komfort	3	BC	o	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-	
Vibrations-komfort	2	n/a	o	<input type="checkbox"/>	-	-	-	-		
...	...									
Kundenrelevanz:			Wettbewerbspositionierung:			Soll-Veränderung:				
1 Basisanforderung			BIC Alleiniger Bester (Best in Class)			+/-+ Besser als Referenzprodukt				
2 Leistungsanforderung			TOP Bester (nicht alleinig)			-/- Schlechter als Referenzprodukt				
3 Begeisterungsanforderung			IBC In der Gruppe der Besten, aber nicht bester (In Best Class)			o Genauso gut wie Referenzprodukt				
			n/a Keine Wettbewerbspositionierung							

Abbildung 6.8: Methodisches Vorgehen zur Auswahl und Konkretisierung von Produkteigenschaften für die AR-gestützte Validierung in der Frühen Phase an einem Beispiel aus der Entwicklung einer neuen PKW-Generation nach Albers, Reinemann, Hirschter et al. (2019, S. 634)

Das dritte Bewertungskriterium ist die Soll-Veränderung, die in Bezug auf ein zuvor definiertes Element des Referenzsystems anzugeben ist. Als solches kommen insbesondere relevante Referenzprodukte infrage. Grundsätzlich kann das Referenzprodukt ein internes Produkt (aus dem Unternehmen selbst) oder ein externes Produkt (aus einem Unternehmen innerhalb oder außerhalb der eigenen Branche) sein. Zudem können Referenzprodukte real (z.B. bereits verfügbare Produkte eines Wettbewerbers) oder fiktiv (angenommene zukünftige Produkte eines Wettbewerbers) sein (Albers, Haug et al., 2016). Um eine hohe Stabilität des Zielsystems zu erreichen, wird in der Entwicklungspraxis oft die vorangegangene Produktgeneration des zu entwickelnden Produkts als Referenzprodukt zur Bestimmung der Soll-Veränderung herangezogen. Für diesen Fall geht aus der Zuordnung zu einer der Kategorien der 5-stufigen Ordinalskala hervor, inwieweit die jeweilige Eigenschaft im Vergleich zur Vorgängergeneration besser (+/++), schlechter (-/--) oder gleich gut (o) ausgeprägt sein soll. Grundsätzlich ist dabei eine Vielzahl produktstrategischer Gründe für eine Soll-Veränderung der Produktgeneration denkbar, die sowohl endogen (z.B. gezielte Produktpositionierung) als auch exogen (z.B. gesetzliche Vorgaben) sein können (Hirschter, Albers et al., 2018). Befindet sich die Produktgeneration G_1 in der Entwicklung und existiert damit keine vorangegangene Produktgeneration, lassen sich alternativ andere unternehmensinterne oder -externe Referenzprodukte zur Bestimmung der Soll-Veränderung heranziehen. (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Im Anschluss an die Bewertung entlang der drei Kriterien erfolgt die übergreifende Priorisierung und Auswahl derjenigen Produkteigenschaften, die im Kurations-Validierungs-Zyklus berücksichtigt werden sollen und damit auch die Festlegung der Validierungsziele. Die Auswahl erfolgt auf der Grundlage der Bewertungsergebnisse für alle drei Kriterien. Da sie unter Umständen mehrdeutig sein kann, erfordert sie eine individuelle Abwägung durch den Produktentwickler. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn Produkteigenschaften mit geringer Kundenrelevanz und ohne Priorität für die Wettbewerbspositionierung dennoch eine hohe Soll-Veränderung zugewiesen bekommen. Ein Beispiel hierfür ist die Umweltverträglichkeit eines PKW. Trotz vergleichsweise geringer Kundenrelevanz und geringer Relevanz für die Wettbewerbsdifferenzierung führen zunehmend strenge Abgasvorschriften in der Praxis zu einer hohen Soll-Veränderung der Produkteigenschaft, die daher frühzeitig validiert werden muss (Hirschter, Albers et al., 2018). Die Priorisierung und Auswahl bestimmter Produkteigenschaften zur frühzeitigen Validierung anhand ihrer Kundenrelevanz, Wettbewerbsposition und Soll-Veränderung lässt jedoch keineswegs den Schluss zu, dass im Rahmen eines Entwicklungsprojekts gänzlich auf die Validierung der zunächst gering priorisierten Produkteigenschaften verzichtet werden könnte. Vielmehr muss spätestens mit der Markteinführung des Produktes am Ende des Entwicklungsprojektes eine möglichst vollständige Validierung des

Gesamtproduktes sichergestellt werden. In der Praxis führt die Vernachlässigung der Validierung von Produkteigenschaften mit geringer Relevanz für die Wettbewerbsdifferenzierung, die nach ihrem Einfluss auf die Kundenzufriedenheit als Basismerkmale klassifiziert wurden, nicht selten zu späteren Produktrückrufen mit einem potenziell hohen wirtschaftlichen Schaden. (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Zu validierende Produkteigenschaften konkretisieren

Auf die Priorisierung und Auswahl der relevanten lösungsoffenen Produkteigenschaften und die damit verbundene implizite Festlegung der Validierungsziele, folgt deren Konkretisierung. Die Produkteigenschaften werden dazu „mit denjenigen Elementen der Funktions- und Baustruktur des Referenzprodukts [verknüpft], die einen Beitrag zur Erfüllung des im Validierungsziel postulierten Kunden- und Anwendernutzens leisten und daher potenziell eine Prinzip- bzw. Gestaltvariation in der zu entwickelnden Produktgeneration erfahren“ (Reinemann, Albers et al., 2018, S. 314). Die Konkretisierung der Produkteigenschaften bis zu einem bestimmten Grad ist eine notwendige Voraussetzung für deren anschließende kundenintegrierte, AR-gestützte Validierung, zumal diese eine Konfrontation mit zumindest teilweise lösungsspezifischen Artefakten in Form von AR-Prototypen erfordert. So lässt sich im Beispiel der in Abbildung 6.8 beschriebenen Produkteigenschaften einer neuen PKW-Generation etwa erst das Teilsystem Getränkehalter als konkretes Artefakt in einer AR-Szene abbilden, nicht aber die zugrundeliegende lösungsoffene Eigenschaft Alltagstauglichkeit. Um ferner im Rahmen der Validierung eine vergleichende Bewertung alternativer Lösungen im Sinne einer komparativen Präferenzmessung zu ermöglichen, müssen im Zuge der Konkretisierung für jede Produkteigenschaft zudem alternative Lösungen identifiziert werden. (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Die entwickelte Methode sieht ein strukturiertes zweistufiges Vorgehen vor, um die Konkretisierung der ausgewählten Produkteigenschaften zu unterstützen. Im ersten Schritt erfolgt zunächst die Konkretisierung der lösungsoffenen Produkteigenschaften auf die Ebene der Produktfunktionen und die Ebene der lösungsspezifischen technischen Teilsysteme. Die Ebene der Produktfunktionen spielt dabei eine moderierende Rolle. Sie unterstützt im Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation die Konkretisierung von der lösungsoffenen auf die lösungsspezifische Ebene. Produktfunktionen sind zentral für die Produktentwicklung. Sie konkretisieren einerseits die Produkteigenschaften und abstrahieren andererseits die Wechselwirkungen zwischen mehreren technischen Teilsystemen. Daher ist es unerlässlich, bei der Variation technischer Teilsysteme nicht nur die direkte Kundenwahrnehmung, sondern auch die Wechselwirkungen mit anderen Teilsyste-

men zu berücksichtigen, die derselben Produktfunktion dienen. So lassen sich beispielsweise die indirekten Auswirkungen der Variation eines Motorsteuergeräts auf die Kundenwahrnehmung nur durch das Verständnis der technischen Zusammenhänge mit den betroffenen Produktfunktionen nachvollziehen. Die entwickelte Methode sieht daher eine Konkretisierung über die Funktionsebene vor. Anschließend erfolgt die Identifikation eines konkreten technischen Teilsystems für jede ausgewählte Produkteigenschaft. Die im mathematischen Sinne eindeutige Zuordnung eines zu variierenden technischen Teilsystems zu einer Produkteigenschaft ist in der Praxis, insbesondere bei komplexeren Produkten, meist nicht möglich. An dieser Stelle bleibt es dem Entwickler überlassen, die für die Beeinflussung einer Produkteigenschaft relevantesten Teilsysteme zu identifizieren. Auch können mehrere technische Teilsysteme zur Beeinflussung einer Produkteigenschaft berücksichtigt werden. (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Alternative Merkmalsausprägungen generieren

Nach der Konkretisierung der ausgewählten Produkteigenschaften bis auf die Ebene der technischen Teilsysteme werden im letzten Schritt der entwickelten Methode alternative Lösungen für jedes einzelne technische Teilsystem generiert. Der so aufgespannte Lösungsraum wird im anschließenden Validierungsschritt wieder eingeschränkt. Im Sinne eines strukturierten Vorgehens werden für die Generierung alternativer Lösungen zunächst für jedes Teilsystem relevante Merkmale identifiziert, denen wiederum alternative qualitative oder quantitative Ausprägungen zugeordnet werden.

Die alternativen Ausprägungen sind dabei jeweils Ausdruck einer Prinzip- oder Gestaltvariation der technischen Teilsysteme in Bezug auf das jeweils betrachtete Merkmal. Die Kenntnis der Variationsart erlaubt in der Frühen Phase im Modell der PGE eine erste Abschätzung relevanter Parameter wie des technischen und ökonomischen Entwicklungsrisikos, des Innovationspotenzials, der Produzierbarkeit oder der zur Entwicklung eines technischen Systems notwendigen Ressourcen (vgl. Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.2.3). Im Sinne eines aktiven Risikomanagements ist es daher geboten, die Variationsanteile bei der Generierung alternativer Merkmalsausprägungen proaktiv zu steuern (Albers, Rapp et al., 2017; Albers et al., 2020). (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Angesichts des begrenzten menschlichen Aufnahmevermögens, das sich nach Miller (1956) auf sieben gleichzeitig verarbeitbare Informationen beschränkt, sollte sowohl die Anzahl der identifizierten Merkmale wie auch die der alternativen Ausprägungen für einen Validierungsdurchgang entsprechend beschränkt bleiben. Da in der späteren Testdurchführung die Probanden sowohl aufgefordert sind die Merk-

male wie auch die alternativen Ausprägungen jeweils eines Merkmals gegeneinander zu gewichten, bieten sich in beiden Fällen eine maximale Anzahl von sieben Merkmalen bzw. Ausprägungen pro Merkmal an, die jedoch keinesfalls zwingend ausgereizt werden muss. (Albers, Reinemann, Hirschter et al., 2019)

Die Konkretisierung der Produkteigenschaften bis auf die Ebene alternativer Merkmalsausprägungen ist Voraussetzung für die Abbildung des angestrebten Kunden- und Anwendernutzens in Form eines AR-Prototyps als konkretem Artefakt. Wie zuvor beschrieben, sind bereits bei diesem Schritt die Grenzen für die Anwendung der AR-Technologie in der Produktvalidierung in Anhängigkeit des verfügbaren AR-Systems zu antizipieren (vgl. Kapitel 5.2). Dabei ist insbesondere die Beschränkung auf die Validierung solcher Produktmerkmale zu beachten, die sich für den Anwender unmittelbar durch seine menschliche Sinneswahrnehmung erschließen lassen. Je nach Ausstattung des verfügbaren AR-Systems bleibt das Potenzial zur Erzielung einer hohen Wiedergabetreue für die in AR-Szenen virtuell adressierbaren Wiedergabedimensionen zudem häufig auf visuell erlebbare Produktmerkmale beschränkt. Davon unberührt bleibt die Möglichkeit zur Kombination virtueller Objekte mit physischen Modellen in einer AR-Szene, um auf diese Weise eine non-visuelle, multimodale Sinneswahrnehmung ausgewählter Produktmerkmale und deren Ausprägungen zu ermöglichen. Die dafür nötige Entscheidung zwischen einer virtuellen und physischen Abbildung von Produktmerkmalen in der AR-Szene wird im Rahmen der Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung in der zweiten Phase des Referenzprozesses unter Beachtung des verfügbaren AR-Systems getroffen. Gleichwohl ist diese Entscheidung bereits frühzeitig bei der Auswahl von Produktmerkmalen und deren alternativer Ausprägungen zu antizipieren. Die Berücksichtigung von Produktmerkmalen, die sich absehbar ausschließlich physisch abbilden lassen, ist dabei unter den Aspekten der Verfügbarkeit entsprechender physischer Modelle und des dafür erforderlichen Ressourceneinsatzes zu hinterfragen.

Geeignete Testfälle festlegen

Nach der Festlegung und Konkretisierung der Validierungsziele sind im letzten Prozessschritt der ersten Phase des entwickelten Referenzprozesses geeignete Testfälle für den im Rahmen der Validierungsaktivität durchzuführenden Test festzulegen. Die Festlegung der Testfälle erfolgt dabei in Abhängigkeit der definierten Validierungsziele. Dazu werden aus der Gesamtheit aller möglichen Anwendungsfälle eines Produkts diejenigen ausgewählt, die vor dem Hintergrund des definierten Validierungsziels sowohl als relevant wie auch als repräsentativ erscheinen. Im Beispiel der zu validierenden alternativen Positionen des Getränkehalters mit dem Validierungsziel der Präferenzmessung hinsichtlich der Ablagemöglichkeiten eines PKW bestünde ein geeigneter Testfall etwa in der Platzierung einer 0,5 l PET-Flasche im unterschiedlich positionierten Getränkehalter während der Autobahnfahrt

oder aber in der Begutachtung der Position des Getränkehalters durch einen potenziellen Autokäufer während einer Verkaufssituation. Anhand des Beispiels wird deutlich, dass die Testfallbeschreibung sich nicht allein auf das zu untersuchende System, in diesem Fall den Getränkehalter im PKW-Cockpit, beschränkt, sondern vielmehr auch Angaben zu den Wechselwirkungen mit den Connected Systems innerhalb der Validierungsumgebung macht. Als solches ist auch der Kunde oder Anwender „mit seinem vorausgedachten Verhalten Teil der Testfallbeschreibung“ (Reinemann, Albers et al., 2018, S. 315). Bei der Auswahl der zu berücksichtigenden Connected System im Rahmen der Konfiguration der Validierungsumgebung lässt sich daher auf die Testfallbeschreibung zurückgreifen. (Reinemann, Albers et al., 2018)

6.2.2 Validierungsumgebung konfigurieren

Ausgehend vom definierten Validierungsziel erfolgt in der zweiten Phase die Konfiguration einer für die Validierungsaktivität geeigneten AR-basierten Validierungsumgebung. Zu den Prozessschritten dieser Phase des Referenzprozesses gehören die Definition der Anforderungen an die Wiedergabetreue, das Festlegen des Umfangs der virtuellen Darstellung, das Durchführen einer Konsistenzprüfung, die Integration der Connected Systems sowie die Auswahl des AR-Interface.

Aus dem im Zuge der Konkretisierung des Validierungsziels aufgespannten Lösungsraum einschließlich der zu betrachtenden Teilsysteme folgen mittelbar die für den Aufbau der Validierungsumgebung benötigten Teilsystemmodelle des System-in-Development. Diese Kenntnis allein ist jedoch für den vollständigen Aufbau der Validierungsumgebung nicht hinreichend. Vielmehr ist darüber hinaus die Frage der Konfiguration der Validierungsumgebung sowie der für den Testfall zu berücksichtigenden Connected Systems zu klären. Die Konfiguration bezeichnet allgemein gesprochen die Applikation oder Parametrisierung einer Validierungsumgebung für einen spezifischen Test (vgl. Kapitel 2.3.3). Im speziellen Fall AR-basierter Validierungsumgebungen beinhaltet diese Parametrisierung insbesondere den Umfang der virtuellen Darstellung jedes Teilsystems, also die Festlegung welche Produktmerkmale des Teilsystems virtuell und welche physisch in der AR-Umgebung abgebildet werden sollen. Die für die zweite Phase des Referenzprozesses entwickelte Methode unterstützt diese Entscheidung mithilfe einer entsprechenden Entscheidungsheuristik. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Die Entscheidung über einen geeigneten Umfang virtueller Darstellung der Teilsysteme in einer AR-basierten Validierungsumgebung erfordert die Abwägung verschiedener entscheidungsrelevanter Parameter. Zu diesen Parametern gehören die

Verfügbarkeit virtueller bzw. physischer Teilsystemmodelle zum Validierungszeitpunkt sowie die Implikationen der gewählten Darstellungsart auf den Aufwand, der mit dem Aufbau des AR-Prototyps verbunden ist. Darüber hinaus ist zu klären, ob die gewünschten Validierungsergebnisse mit dem gewählten Umfang virtueller Darstellung in der benötigten Qualität erreicht werden können. In der entwickelten Methode wird die Wiedergabetreue eines AR-Prototyps als Entscheidungskriterium für dessen Eignung für eine bestimmte Validierungsaufgabe herangezogen (vgl. Kapitel 2.3.3.1). Zur differenzierten Bewertung der Wiedergabetreue wird auf die in Kapitel 5.2.1 eingeführten 18 Dimensionen der Wiedergabetreue AR-basierter Prototypen nach Reinemann, Fahl, Albers et al. (2019) entlang der Kategorien Erscheinung (visuell), Erscheinung (non-visuell), Funktionalität und Interaktivität zurückgegriffen (vgl. Tabelle 5.1). Um eine weitere Differenzierung zu ermöglichen, erfolgt die Bewertung der Wiedergabetreue nach der entwickelten Methode nicht auf der Ebene von Teilsystemen, sondern auf der Ebene einzelner Produktmerkmale von Teilsystemen. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Anforderungen an Wiedergabetreue definieren

Die Entscheidung über einen geeigneten Umfang virtueller Darstellung muss zwingend im Kontext der Anforderungen getroffen werden, die an die Wiedergabetreue des AR-Prototyps in den einzelnen Dimensionen gestellt werden und die wiederum vom festgelegten Validierungsziel abhängen. Die entwickelte Methode sieht dafür zwei aufeinanderfolgende Schritte vor: die Definition der Anforderungen an die Wiedergabetreue sowie das anschließende Festlegen des Umfangs der virtuellen Darstellung durch einen Abgleich von Anforderungs- und Referenzprofil. Im Zuge der Anforderungsdefinition werden zunächst die Anforderungen an die Wiedergabetreue der Produktmerkmale entlang der definierten Wiedergabedimensionen auf einer Skala von 0-5 bewertet. Ein Wert von 0 zeigt dabei an, dass die jeweilige Wiedergabedimension für das entsprechende Merkmal nicht relevant ist. Aus der vollständigen Bewertung der Anforderungen an die Wiedergabetreue für alle zu berücksichtigenden Produktmerkmale entlang aller Wiedergabedimensionen ergibt sich das Anforderungsprofil, das in Abbildung 6.9 schematisch dargestellt ist. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Wiedergabedimensionen		Produktmerkmale				
		Merkmal A	Merkmal B	Merkmal C	...	
Erscheinung (visuell)	Größe	Proportionen	5	0	0	<input type="checkbox"/>
		Räumliche Dimensionen	4	0	0	<input type="checkbox"/>
	Lage	Räumliche Orientierung	4	0	0	<input type="checkbox"/>
		Räumliche Positionierung	4	0	0	<input type="checkbox"/>
	Farbe	Farbwirkung	0	0	3	<input type="checkbox"/>
		Lichtwirkung	0	0	2	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interaktivität	Eingabeverhalten	0	4	0	<input type="checkbox"/>	
	Ausgabeverhalten	0	4	0	<input type="checkbox"/>	
Anforderungsprofil						

Anforderungen an die Wiedergabetreue einzelner Merkmale werden für alle relevanten Wiedergabedimensionen auf einer Skala von 0-5 bewertet:

1: *Überhaupt nicht ausgestaltet* 4: *Weitgehend ausgestaltet*
 2: *Eher nicht ausgestaltet* 5: *Vollständig ausgestaltet*
 3: *Eingermaßen ausgestaltet* 0: *Nicht relevant*

Abbildung 6.9: Vorgehen zur Bestimmung der Anforderungen an die Wiedergabetreue einzelner Produktmerkmale nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirscher (2019, S. 441)

Umfang virtueller Darstellung festlegen

Im Anschluss an die Anforderungsdefinition wird das erstellte Anforderungsprofil mit einem Referenzprofil abgeglichen. Letzteres enthält Angaben zur Wiedergabetreue eines AR-basierten Referenzprototyps entlang derselben Wiedergabedimensionen, die auch dem Anforderungsprofil zugrunde liegen. Für die Anwendung der entwickelten Methode in der Entwicklungspraxis muss ein solches Referenzprofil zunächst einmalig erstellt und die darin enthaltenen Angaben zur Wiedergabetreue empirisch ermittelt werden. Dies kann etwa im Zuge der initialen Ausstattung des Validierungssystems mit entsprechender AR-Technik geschehen. Existieren bereits geeignete Referenzprofile, sind diese entsprechend als Teil des Referenzsystems der neuen Produktgeneration zu hinterlegen, um auf sie an dieser Stelle zurückgreifen zu können.

Das auf diese Weise erstellte oder aus dem Referenzsystem entnommene Referenzprofil kann anschließend für den Abgleich mit den Anforderungsprofilen zu erstellender AR-Prototypen herangezogen werden. Nicht jedes Referenzprofil ist dabei jedoch für den sinnvollen Abgleich mit einem beliebigen Anforderungsprofil geeignet. Voraussetzung dafür ist eine weitgehende Übereinstimmung der adressierten Wiedergabedimensionen des zugrundeliegenden Referenzprototyps mit den Wiedergabedimensionen aus dem Anforderungsprofil. Weiterhin sollten die im Referenzprofil enthaltenen empirischen Informationen zur Wiedergabetreue des Referenzprototyps möglichst unter Einsatz desselben AR-Systems ermittelt worden sein, welches auch in der Validierungsumgebung für die vorliegende Validierungsaufgabe zur Verfügung steht. Auf diese Weise können Unterschiede in der Bewertungsgrundlage, die durch den Einfluss des AR-Systems auf die Wiedergabetreue entstehen, vermieden werden. Das in Abbildung 6.10 gezeigte Referenzprofil eignet sich vor diesem Hintergrund für den Abgleich mit den Anforderungsprofilen solcher AR-

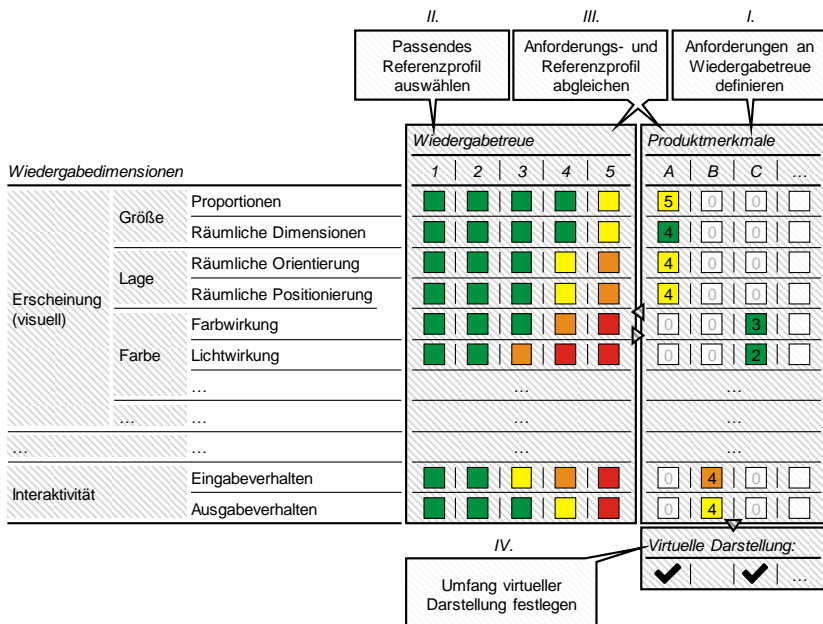


Abbildung 6.11: Vorgehen zur Bestimmung des Umfangs virtueller Darstellung durch den Abgleich von Anforderungs- und Referenzprofil nach Albers, Reine- mann, Fahl & Hirschter (2019, S. 442)

Prototypen, deren adressierte Wiedergabedimensionen mit denen des verwendeten AR-Modells eines Quadropters übereinstimmen (vgl. Abbildung 5.9). Weiterhin sollte das in der Validierungsumgebung verfügbare AR-System in den relevanten Wiedergabedimensionen mindestens die Wiedergabetreue der für die Befragung eingesetzten Microsoft® HoloLens™ ermöglichen.

Durch den Abgleich von Anforderungs- und Referenzprofil für jedes der betrachteten Produktmerkmale kann der empfohlene Umfang der virtuellen Darstellung bestimmt werden. Dies geschieht durch die Verwendung einer Entscheidungsheuristik, nach der nur diejenigen Produktmerkmale virtuell in der AR-Szene abgebildet werden sollten, deren vorgegebene Anforderung an die Wiedergabetreue in mehr als 50% aller im Referenzprofil dokumentierten Fälle erfüllt wurde. Abbildung 6.11 zeigt schematisch das methodische Vorgehen zur Bestimmung des Umfangs virtueller Darstellung einzelner Produktmerkmale durch den Abgleich von Anforderungs- und Referenzprofil. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Durch die Zuordnung der betrachteten Produktmerkmale zu ihren jeweiligen Teilsystemen lässt sich schließlich der Umfang der virtuellen Darstellung auf der Ebene der einzelnen Teilsystemmodelle der Validierungsumgebung bestimmen. Wird für alle zugehörigen Produktmerkmale eines Teilsystems eine virtuelle Darstellung empfohlen, ist das Teilsystem entsprechend durch ein rein virtuelles Teilsystemmodell in der Validierungsumgebung abzubilden. Dies gilt analog für die rein physische Darstellung. Teilsysteme, die durch gemischt physisch-virtuelle Modelle abzubilden sind, sind daran zu erkennen, dass sie sowohl Produktmerkmale aufweisen, für die eine virtuelle Darstellung empfohlen wird, wie auch solche, für die eine physische Darstellung empfohlen wird. Abbildung 6.12 zeigt schematisch das methodische

<i>Teilsysteme des System-in-Development</i>				
<i>Produktmerkmale</i>	<i>Teilsystem 1</i>	<i>Teilsystem 2</i>	<i>...</i>	<i>Virtuelle Darstellung</i>
Merkmal A	✘			✔
Merkmal B		✘		
Merkmal C		✘		✔
...				

Gemischt physisch-virtuelles Teilsystemmodell für Teilsystem 2

Abbildung 6.12: Vorgehen zur Aggregation des Umfangs virtueller Darstellung von der Ebene einzelner Produktmerkmale auf die Ebene von Teilsystemen nach Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter (2019, S. 443)

Vorgehen zur Aggregation des Umfangs virtueller Darstellung von der Ebene einzelner Produktmerkmale auf die Ebene von Teilsystemen. (Albers, Reinemann, Fahl & Hirschter, 2019)

Konsistenzprüfung durchführen

Für gemischt physisch-virtuelle Teilsystemmodelle ist im Anschluss an die Bestimmung des Umfangs der virtuellen Darstellung eine Konsistenzprüfung durchzuführen. Dabei ist zu hinterfragen, ob die dafür notwendige Verknüpfung virtueller und physischer Modelle in der AR-Szene grundsätzlich möglich ist, oder ob ihr ggf. technische Limitationen bis hin zu grundlegenden physikalische Gesetzmäßigkeiten entgegenstehen. Ein solcher Fall läge etwa vor, wenn ein virtuelles Modell eines Quaders mit einer physischen Textur versehen werden sollte. Der umgekehrte Fall eines physischen Quaders mit virtueller Textur wäre hingegen grundsätzlich darstellbar.

Connected Systems integrieren

Mithilfe der Informationen über den Umfang der virtuellen Darstellung der Teilsystemmodelle des System-in-Development lässt sich bereits ein Teil der Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung beschreiben (vgl. Abbildung 6.13, links). Für die vollständige Beschreibung der Validierungskonfiguration ist dagegen weiterhin die Integration der Connected Systems erforderlich. Als solche sind der Anwender, das Restprodukt sowie die für den Testfall relevanten Teile der Umwelt durch entsprechende Modelle in die Validierungsumgebung zu integrieren. Entsprechend der Modellierungsvorschriften des in Kapitel 6.1 vorgestellten Beschreibungsmodells für AR-basierte Validierungsumgebungen und deren Konfigurationen ist dabei zwingend der reale Anwender einzubinden. Umwelt- und Restsystemmodelle können sowohl physisch wie auch virtuell abgebildet werden.

AR-Interface auswählen

Die Auswahl eines AR-Interface als Koppelsystem zwischen den virtuellen und physischen Modellen der Validierungsumgebung ist der letzte Prozessschritt zur Vervollständigung der Konfiguration. Die Auswahl geeigneter AR-Systeme wird maßgeblich durch das zugrunde gelegte Referenzprofil bestimmt. Im Regelfall sollte in der Validierungsumgebung dasjenige AR-System als Koppelsystem zum Einsatz kommen, welches auch zur Ermittlung der im Referenzprofil enthaltenen empirischen Informationen zur Wiedergabetreue des Referenzprototyps herangezogen wurde. Steht dieses AR-System nicht zur Verfügung, ist die Auswahl so zu treffen, dass das verwendete AR-System der im zugrunde gelegten Referenzprofil postulierten Wiedergabetreue gerecht wird. Neben der erzielten Wiedergabetreue sind der mit dem Betrieb des AR-Systems verbundene zeitliche und finanzielle Aufwand sowie seine Praxistauglichkeit und Flexibilität in der Praxis etablierte Kriterien zur

Auswahl eines geeigneten AR-Systems. Die rechte Seite von Abbildung 6.13 zeigt schematisch die Modellierung einer vollständig konfigurierten AR-basierten Validierungsumgebung, die um die Connected Systems, das AR-Interface sowie die funktionalen Beziehungen zwischen den einzelnen Modellen der Validierungsumgebung ergänzt wurde.

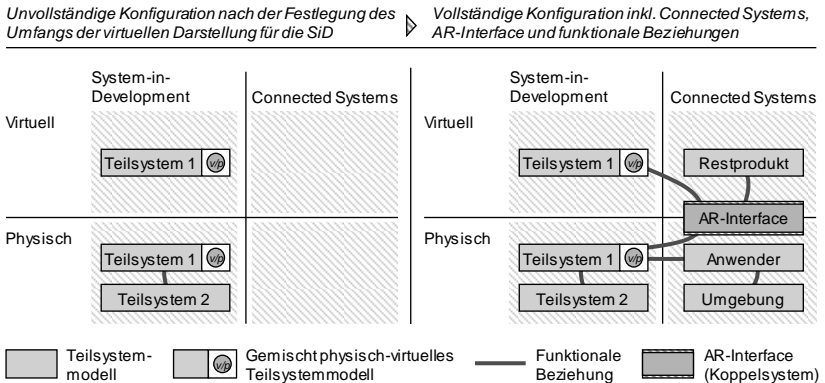


Abbildung 6.13: Vervollständigung der Validierungskonfiguration durch Integration der Connected Systems und Auswahl des AR-Interface

6.2.3 Validierungsumgebung aufbauen

Auf die Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung folgt in der dritten Phase des Referenzprozesses ihr Aufbau. Kern dessen ist die Entwicklung einer entsprechenden AR-Szene zur Darstellung mithilfe des ausgewählten AR-Systems. Das Vorgehen dazu umfasst als Prozessschritte die Definition der Geometrie der virtuell darzustellenden Teilsysteme, das Erstellen des Visualisierungsmodells, das Verknüpfen von virtuellen und physischen Modellen sowie das Implementieren von Funktionalität, Interaktivität und Verhalten. Vor Beginn des Aufbaus der Validierungsumgebung sollte grundsätzlich geprüft werden, ob über die physischen Teilsysteme des Referenzprodukts hinaus weitere Elemente des Referenzsystems durch Übernahme oder gezielte Variation für die Validierungsumgebung nutzbar gemacht werden können. Als solche kommen insbesondere virtuelle Teilsystemmodelle des Referenzprodukts oder von umgebenden Systemen infrage.

Zur operativen Unterstützung von Produktentwicklern beim Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen wurden im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Schmid (2019)³ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurde, zwei Leitfäden entwickelt, die konkrete Arbeitsabläufe zur Entwicklung von AR-Szenen im Kontext der Produktvalidierung mithilfe der beiden Software-Tools PTC® Vuforia™ Studio bzw. Unity beschreiben. Beide Software-Tools greifen für die Entwicklung von AR-Szenen auf die Vuforia™ Engine zurück, nehmen dabei jedoch unterschiedliche Anwendungsfälle in den Fokus. Während die Entwicklung mit Unity eine weitaus größere Flexibilität und eine potenziell höhere Darstellungsqualität ermöglicht, ist Verwendung von Vuforia™ Studio mit einem deutlich geringeren Aufwand verbunden und erfordert zudem keine Vorkenntnisse im Bereich der objektorientierten Programmierung und der Computergrafik. Darüber hinaus ist die Software Vuforia™ Studio auf die Integration in etablierte Arbeitsabläufe in der Produktentwicklung ausgerichtet, während Unity überwiegend als Entwicklungsumgebung für Computerspiele zum Einsatz kommt.

Trotz des unterschiedlichen Anwendungsfokus beider Software-Tools, liegt beiden Leitfäden dasselbe grundsätzliche Vorgehen zum Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen zugrunde. Dieses Vorgehen ist im Folgenden beschrieben. Die vier Prozessschritte orientieren sich dabei in Teilen an den von Katičić (2012) in Anlehnung an Kerttula, Salmela & Heikkinen (1997) und Oh, Yoon & Hawley (2004) beschriebenen Schritten zur Generierung virtueller Prototypen, die jedoch um AR-spezifische Aktivitäten ergänzt wurden. Ebenso fließen praktische Erfahrungen aus dem Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen in die Beschreibung des Vorgehens ein, die vom Autor dieser Arbeit in verschiedenen Industrie- und Forschungsprojekten im IPEK XR-Lab gesammelt wurden. Das Vorgehen ist weitgehend unabhängig vom verwendeten AR-System und hat sich in der praktischen Anwendung sowohl für Video-See-Through-Systems wie Tablets und Smartphones als auch für Optical-See-Through-Systems wie die Microsoft® HoloLens™ bewährt.

Geometrie definieren

Ausgangspunkt des Vorgehens ist die Definition der Geometrie der virtuell darzustellenden Teile des System-in-Development einschließlich aller virtueller Teilsysteme, deren Merkmale und alternativen Merkmalsausprägungen, wie sie in den ersten beiden Phasen des Referenzprozesses hergeleitet wurden. Neben den virtuellen Teilsystemmodellen des System-in-Development müssen zudem ggf.

³ Unveröffentlichte Bachelorarbeit

auch virtuelle Restsystemmodelle und die für den Testfall relevanten virtuellen Modelle der Umwelt in ihrer Geometrie modelliert werden. Weiterhin kann es erforderlich werden auch physische Teilsysteme der Validierungsumgebung als virtuelle Geometriemodelle abzubilden. Dies ist zum einen der Fall, wenn die physischen Teilsysteme als Model-Targets verwendet werden sollen. Zum anderen trifft dies auch dann zu, wenn virtuelle Modelle in der AR-Szene durch physische Modelle dieser Teilsysteme verdeckt werden sollen. Für eine korrekte Okklusion kann in diesem Fall die Geometrie der physischen Teilsysteme schon zum Zeitpunkt der Erstellung einer AR-Szene in Form von Phantomobjekten berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.4.3).

Wie beim Konstruieren technischer Produkte üblich, geschieht die Geometriedefinition in der Regel durch parametrische Modellierung mithilfe von CAD-Software. CAD-Modelle müssen für die Verwendung in AR-Szenen zunächst tesselliert, d.h. in Polygonnetz-Modelle transformiert werden, zumal die Shader, die für das Rendern von Computergrafiken zum Einsatz kommen, auf die Verwendung dieser Art von Modellen ausgelegt sind (vgl. Kapitel 2.4.4). Um angesichts der begrenzten Rechenleistung mobiler AR-Systeme die für die Echtzeitfähigkeit der AR-Szene geforderte Bildrate zu erreichen, ist die Anzahl der Polygone in der virtuellen Szene zu begrenzen. So empfiehlt etwa Microsoft® für die erste Generation der HoloLens™ eine Obergrenze von 100.000 Polygonen in einer Szene. Bei der Verwendung moderner Smartphones und Tablets kann dieser Wert hingegen deutlich überschritten werden. Um bei bereits vorhandenen komplexen CAD-Modellen, etwa von ganzen Maschinen und Anlagen, die Zahl der Polygone zu reduzieren, ist es empfehlenswert, das Modell bereits vor dem Tessellieren um kleine Bauteile wie Schrauben und Nieten zu bereinigen, die im Kontext der Validierungsaufgabe nicht von Bedeutung sind. Auch abgerundete Kanten und feine Gravuren können die Anzahl der Polygone stark erhöhen und sind daher ggf. zu entfernen. Falls erforderlich, ist nach dem Tessellieren eine weitere Komplexitätsreduktion des Polygonnetz-Modells möglich. Dieses kann dazu entweder durch manuelles Löschen von Modellteilen oder durch automatische Bereinigungsfunktionen von Software-Tools wie der 3D-Grafiksoftware Blender in seinem Detailgrad reduziert werden. Ist ein CAD-Modell noch nicht vorhanden, kann ein Modell unter Umständen auch direkt netzbasiert modelliert werden, um so den zusätzlichen Tessellierungsschritt entfallen zu lassen. Der Modellierungsprozess mit Polygonnetzen unterscheidet sich jedoch grundlegend von der Modellierung parametrischer Modelle mit CAD-Software und ist für präzise, technische Modelle weitgehend ungeeignet. Zudem ist die spätere Überführung des Polygonnetz-Modells in den CAD-Workflow des Produktentwicklungsprozesses nicht ohne weiteres möglich. Eine direkte netzbasierte Modellierung kommt damit vor allem für Modelle der Connected Systems, wie etwa der für den Testfall relevanten virtuellen Modelle der Umwelt infrage, zumal für diese oft eine

approximierte Darstellung ausreichend ist und sie im Laufe des Produktentwicklungsprozesses nicht als CAD-Modell vorliegen müssen. Insbesondere die Modellierung von virtuellen Umweltsystemen erfolgt zudem oft nicht in Form herkömmlicher geometrischer Modelle, sondern mithilfe von Partikelsystemen, wenn etwa Wetterbedingungen wie Nebel oder Regen in der virtuellen Szene dargestellt werden sollen.

Visualisierungsmodell erstellen

Als zweitem Prozessschritt zum Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen folgt auf die Geometriedefinition die Erstellung eines Visualisierungsmodells für jedes der erzeugten Polygonnetz-Modelle. Während der Detailgrad der in parametrischen CAD-Modellen enthaltenen Informationen zur Objektgeometrie in der Entwicklungspraxis häufig das für den Aufbau einer AR-Szene notwendige Maß übersteigt, gehen die für die Erstellung des Visualisierungsmodells erforderlichen Informationen aus ggf. bereits vorhandenen CAD-Modellen nur sehr eingeschränkt hervor. Zu diesen Informationen zählen insbesondere Oberflächen- und Materialeigenschaften wie Farbe, Glanz, Rauheit oder Transparenz. Diese Eigenschaften werden den Modellen der AR-Szene durch eine entsprechende Parametrisierung der Shader zugewiesen. Die Parametrisierung eines Shaders kann u.a. über die Zuweisung einer Textur zum Shader erfolgen, deren Farb- und Alphawerte vom Shader auf eine bestimmte Weise interpretiert werden. Auf diese Weise lassen sich nicht nur die Farbeigenschaften eines Modells manipulieren. So werden etwa die Farbwerte einer sogenannten Normal Map von einem entsprechenden Shader als xyz-Tripel des Oberflächen-Normalenvektors interpretiert, wodurch sich Unebenheiten in der Oberfläche oder feine Oberflächenstrukturen darstellen lassen, ohne dass sich dadurch die Zahl der Polygone erhöhen würde. Angesichts der begrenzten Rechenleistung mobiler AR-Systeme ist ein solches Vorgehen zur Darstellung feiner Strukturen einer tatsächlichen Modellierung im Polygonnetz-Modell in vielen Fällen vorzuziehen. Unity und Vuforia™ Studio stellen einen Standard-Shader für die Manipulation gängiger Oberflächeneigenschaften zur Verfügung. Darüber hinausgehende Anwendungen erfordern ggf. die Entwicklung eigener Shader. Ein spezieller Shader wird etwa für das Rendering von Phantomobjekten benötigt. Dieser bewirkt, dass das dem Shader zugeordnete Modell des Phantomobjekts selbst sowie auch dahinterliegende Objekte nicht gerendert werden.

Virtuelle und physische Modelle verknüpfen

Der dritte Prozessschritt für den Aufbau der Validierungsumgebung sieht die Verknüpfung der erstellten virtuellen Modelle mit den physischen Modellen der AR-basierten Validierungsumgebung vor. Dies geschieht grundsätzlich mithilfe von zu referenzierenden Merkmalen der physischen Umgebung, sog. Targets, die vom AR-

System im Videostream mithilfe des Tracking-Algorithmus in Echtzeit verfolgt werden (vgl. Kapitel 2.4.2). Die virtuellen Modelle werden anschließend relativ zu diesen Targets positioniert, orientiert und skaliert. Bei der Erstellung von AR-Szenen mit Unity können auch mehrere Targets innerhalb einer Szene verwendet und mit unterschiedlichen virtuellen Modellen verknüpft werden. Die Targets müssen als physische Objekte Teil der Validierungsumgebung sein. Gleichzeitig müssen die Informationen zu ihren Erkennungsmerkmalen je nach Art des Targets entweder bereits bei der Erstellung der AR-Szene oder zur Laufzeit der AR-Applikation bereitgestellt werden.

Die Vuforia™ Engine unterscheidet zwischen Image-Targets, Model-Targets und Spatial-Targets. Letztere bezeichnen beliebige Punkte in der realen Umgebung, die vom Anwender zur Laufzeit der AR-Applikation in der AR-Szene festgelegt werden und relativ zu denen die virtuellen Modelle angeordnet werden. Bei einem Image-Target handelt es sich hingegen um ein beliebiges Bild, welches bei der Erstellung der AR-Szene in einer Datenbank hinterlegt wird und meist in ausgedruckter Form Teil der Validierungsumgebung ist. Ein Model-Target ist wiederum ein dreidimensionaler Körper innerhalb der Validierungsumgebung. Er wird bei der Erstellung der AR-Szene ebenfalls als virtuelles Modell in einer Datenbank hinterlegt. Image und Model-Targets sind besonders geeignet, um virtuelle Teilsystemmodelle des System-in-Development mit physischen Teilsystemmodellen zu verknüpfen. In der praktischen Anwendung hat es sich dazu etwa bewährt, das physische Modell mit einem Image-Target zu bekleben oder es selbst als Model-Target zu verwenden. Letzteres kommt dann infrage, wenn zusätzlich ein virtuelles Modell des Teilsystems vorliegt, etwa, weil es sich um ein generativ gefertigtes Modell handelt.

Die Image- und Model-Targets sollten im Interesse einer hohen Erkennungsrate durch den Tracking-Algorithmus möglichst merkmals- und kontrastreich sein. Als Model-Targets eignen sich zudem nur statische, nicht verformbare Körper. Um eine eindeutige Erkennung durch den Tracking-Algorithmus zu gewährleisten, sollten außerdem symmetrische Körper vermieden werden. Da das Tracking-Verfahren der heute verfügbaren Smartphones und Tablets auf einer optischen Merkmalsdetektion beruht, ist zudem eine gute Ausleuchtung sowie eine reflexionsarme Oberfläche der Targets hilfreich. Auch bei der Verwendung von Model-Targets lassen sich in merkmalsreichen Umgebungen, etwa mit gemusterten Wänden oder Fußböden, bessere Ergebnisse beim Tracking erzielen. Während das Tracking mithilfe von Spatial-Targets eine höhere Flexibilität der Einsatzbereiche erlaubt, bietet die Verwendung von Image- und insbesondere von Model-Targets in der Praxis Vorteile bei der Positionsgenauigkeit wie auch bei der Stabilität des Trackings im Falle schneller und ruckartiger Bewegungen des Anwenders.

Funktionalität, Interaktivität und Verhalten implementieren

Als viertem und letztem Prozessschritt zum Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen werden die virtuellen Modelle der AR-Szene um Funktionalität, Interaktivität und Verhalten ergänzt. Das Verhalten eines virtuellen Modells umfasst neben dem gelenkten, zweckgerichteten Verhalten auch sein nicht zweckgerichtetes Verhalten, zu dem etwa die physisch korrekte Reaktion auf die Kollision mit einem anderen virtuellen oder physischen Modell innerhalb der AR-Szene gehört. Beim Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen ist die Darstellung des zweckgerichteten Verhaltens jedoch in der Regel vorrangig. Das zweckgerichtete Verhalten virtueller Modelle wird durch deren Funktionalität beschrieben. Diese kann dabei sowohl Funktionen des AR-Prototyps umfassen, denen der Anspruch zugrunde liegt, entsprechende inhärente Funktionen des späteren Produkts wiederzugeben, als auch sogenannte Meta-Funktionen, die keine Entsprechung unter den realen Produktfunktionen haben und vielmehr der Unterstützung der Validierungsaktivität in der AR-basierten Validierungsumgebung dienen (vgl. Kapitel 5.2.1). Zu diesen Meta-Funktionen zählt insbesondere die Möglichkeit zur Konfiguration des AR-Prototyps, die es dem Anwender oder einer anderen Person erlaubt, während der Testdurchführung zwischen den alternativen Merkmalsausprägungen der ausgewählten Produktmerkmale zu wechseln. Die Darstellung von Funktionen erfolgt in AR-Szenen in der Regel durch die Animation des betreffenden virtuellen Modells. Bei der Animation werden verschiedene Zustände eines virtuellen Modells mit einer Zeitleiste verknüpft. In den einzelnen Zuständen können jeweils beliebige Parameter wie Position, Rotation, Skalierung oder Material bis hin zur vollständigen Ein- und Ausblendung des Modells variiert werden. Beim Auslösen der Animation werden die verschiedenen Zustände in ihrer definierten zeitlichen Abfolge durchlaufen. Ausgelöst werden können Animationen dabei etwa durch eine festgelegte Interaktion mit dem Anwender. Die Interaktion kann je nach verwendetem AR-System durch Gesten, Sprachbefehle, das Betätigen von Schaltflächen auf dem Bildschirm eines Tablets oder Smartphones, das Berühren des virtuellen Modells selbst oder durch das teilweise Verdecken von speziellen Image-Targets, sog. Virtual Buttons, durch die Hand des Anwenders geschehen.

Nach dem vollständigen Aufbau der AR-Szene wird diese als AR-Applikation auf das ausgewählte AR-System übertragen. Mit Unity erstellte AR-Szenen sind als eigenständige Applikation auf gängigen AR-Systemen unter den Betriebssystemen Windows, Android und iOS lauffähig. Im Fall von AR-Szenen, die mit Vuforia™ Studio erstellt wurden, ist die zusätzliche Applikation Vuforia™ View erforderlich, mit Hilfe derer die AR-Szene ebenfalls auf gängigen AR-Systemen unter den drei genannten Betriebssystemen dargestellt werden kann.

6.2.4 Test durchführen

Sobald der Aufbau der AR-basierten Validierungsumgebung abgeschlossen wurde, kann die Durchführung des Kundentests zur Präferenzmessung erfolgen. Die entsprechende Phase des Referenzprozesses umfasst als vorbereitende Prozessschritte die Auswahl und Konditionierung der Testpersonen sowie anschließend die Erhebung und Dokumentation der Präferenzen im Rahmen der eigentlichen Testdurchführung.

Testpersonen auswählen

Kundentests sind durch die direkte Einbindung von Testkunden in die Validierungsumgebung gekennzeichnet (vgl. Kapitel 2.3.3). Die Auswahl der Testkunden hat einen entscheidenden Einfluss auf die ermittelten Präferenzen und damit auf die Validierungsergebnisse. Voraussetzung für aussagekräftige Validierungsergebnisse ist die Befragung einer Stichprobe von Testpersonen, die möglichst repräsentativ für die Kundenzielgruppe der zu entwickelnden Produktgeneration stehen. Bei der Bildung einer Zufallsstichprobe aus der Grundgesamtheit aller Kunden innerhalb der Zielgruppe sollte dafür ein ausreichend großer Stichprobenumfang gewählt werden (vgl. Gleichung (7) in Kapitel 4.2.2). Die Bildung einer Zufallsstichprobe scheitert jedoch in der Praxis häufig am fehlenden Zugang zur Grundgesamtheit. Um dennoch eine repräsentative Auswahl von Testpersonen zu treffen, bietet sich die Verwendung von Quotenstichproben an (vgl. Kapitel 4.2.2). Dazu ist die Zusammensetzung der Kundenzielgruppe zunächst anhand geeigneter Kontrollmerkmale, deren Ausprägungen und ihrer Verteilung zu beschreiben. Dies kann auf Basis der Ergebnisse der Kundensegmentierung erfolgen, welche im Zuge der Produktprofilbildung ausgehend vom Referenzsystem für die zu entwickelnde Produktgeneration betrieben wird. Gängige Ansätze zur Ermittlung der Kundenzielgruppe sind etwa bei Freter (2008) und bei Halfmann (2014) beschrieben. Katičić (2012) schlägt als geeignete Kontrollmerkmale zur Auswahl von Testkunden ihren Beruf und ihre Ausbildung sowie ihre Erfahrungen aus der Verwendung ähnlicher Produkte vor. Diese allgemeinen Kontrollmerkmale sind um weitere spezifische Merkmale für die zu entwickelnde Produktgeneration zu ergänzen. Die repräsentative Abbildung der Kundenzielgruppe durch die Zusammensetzung der Quotenstichprobe ist von entscheidender Bedeutung für die Vermeidung von systematischen Fehlern in den Befragungsergebnissen und sollte daher mit entsprechender Sorgfalt betrieben werden. Zur Bildung der Quotenstichprobe ist bereits im Vorfeld des Kundentests die Kenntnis über die Ausprägung der Kontrollmerkmale bei den Testpersonen erforderlich. Marktforschungsagenturen stellen dafür in der Praxis sogenannte Panels mit potenziellen Testpersonen zur Verfügung, die im Zuge ihrer Registrierung Angaben zu gängigen

Kontrollmerkmalen hinterlegen. Die Auswahl der Testpersonen sollte mit einem ausreichenden Vorlauf zur eigentlichen Testdurchführung erfolgen, zumal sie insbesondere dann, wenn nicht auf bestehende Panels zurückgegriffen wird, mit einem großen zeitlichen Aufwand verbunden sein kann. Um das Risiko einer Kompromittierung proprietären Wissens zu minimieren, das mit dem direkten Zugang von Kunden zu laufenden Entwicklungsprojekten verbunden ist, sollten außerdem entsprechende Geheimhaltungs- und Datenschutzvereinbarungen mit den ausgewählten Testpersonen abgeschlossen werden. Von der Berücksichtigung unternehmensinterner Mitarbeiter für den Kundentest sollte möglichst abgesehen werden, zumal das Risiko besteht, dass sie die Validierungsergebnisse „durch ihre Vertrautheit mit dem Produkt sowie aus opportunistischen Gründen [...] verfälschen“ (Katičić, 2012, S. 171).

Testpersonen konditionieren

Die Testdurchführung sollte für jede der ausgewählten Testpersonen separat erfolgen, um eine Verzerrung der Validierungsergebnisse durch gegenseitige Beeinflussung auszuschließen. Um weiteren systematischen Verzerrungen in der individuellen Wahrnehmung des AR-Prototyps durch die Testpersonen entgegenzuwirken, ist unmittelbar vor der Testdurchführung eine Konditionierung der Testpersonen durchzuführen. Ziel der Konditionierung ist es, die Wissensbasis der Testpersonen sowohl bezüglich der zu validierenden Produktgeneration wie auch bezüglich der Validierungsumgebung und insbesondere des verwendeten AR-Systems vor der Testdurchführung anzugleichen, um so die Vergleichbarkeit der Validierungsergebnisse zu erhöhen. Jeder Testperson wird dazu ausreichend Zeit gegeben, um sich mit dem AR-Prototyp vertraut zu machen, ohne an dieser Stelle jedoch bereits auf die zu bewertenden Merkmale und alternativen Merkmalsausprägungen einzugehen. Darüber hinaus wird die Testperson in alle für die Testdurchführung relevanten Funktionen des AR-Systems eingewiesen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf die für das AR-System spezifischen Interaktionsmöglichkeiten wie spezielle Gesten, Sprachbefehle oder virtuelle Schaltflächen einzugehen. Vor allem bei Testpersonen ohne Vorerfahrungen im Einsatz von AR-Systemen kann sich ohne eine solche Einführung eine systematische Verzerrung in der Bewertung des Prototyps durch einen Framing-Effekt einstellen (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Verzerrung kann dabei sowohl positiv gerichtet sein, wenn die initiale Begeisterung gegenüber der AR-Technik auf den Prototyp übertragen wird. Sie kann jedoch auch negativ gerichtet sein, wenn die Testperson die mangelnde Beherrschung der Interaktionsmöglichkeiten des AR-Systems, wie etwa die fehlende Kenntnis über die korrekte Ausführung von Gesten, als Mangel des Prototyps auslegt. Durch die Konditionierung der Testpersonen kann ein entsprechender Einfluss des AR-Systems auf die Bewer-

tungsergebnisse reduziert und so erreicht werden, dass das AR-System die Anforderungen an eine Modellierung als Koppelsystem im Sinne des IPEK-XiL-Ansatzes näherungsweise erfüllt (vgl. Kapitel 6.1).

Präferenzen erheben und dokumentieren

Im Anschluss an die Konditionierung der Testpersonen erfolgt im Rahmen der eigentlichen Testdurchführung die Erhebung und Dokumentation ihrer kognitiven Präferenzen für die alternativen Ausprägungen der ausgewählten Produktmerkmale. Der grundsätzliche Ablauf der Testdurchführung folgt dem eines Interviews (vgl. Kapitel 4.2.1). Dabei nimmt die Testperson die Rolle der interviewten Person ein. Daneben ist ein Interviewer erforderlich, der entsprechende Fragen und Erläuterungen an die Testperson richtet und damit den Verlauf des Tests lenkt. Bei der Formulierung der Interviewfragen durch den Interviewer sind die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Grundsätze zu beachten. Demnach sollten die Fragen insbesondere in einer möglichst neutralen Sprache formuliert sein und in keiner Weise gewünschte oder antizipierte Antworten implizieren. Dem Interviewer kommt zudem die Aufgabe zu, die Antworten der Testperson zu dokumentieren. Um den Interviewer zu entlasten, kann diese Aufgabe alternativ auch eine dritte Person übernehmen. Die Aufgabe der Testperson besteht in der Bewertung der alternativen Merkmalsausprägungen des AR-Prototyps in Bezug auf das definierte Validierungsziel. Die Bewertung erfolgt dabei stets im Kontext des definierten Testfalls. Testfall und Validierungsziel werden zu Beginn der Testdurchführung vom Interviewer beschrieben.

Zur kognitiven Präferenzmessung stehen grundsätzlich kompositionelle und dekompositionelle Ansätze zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.3.3.2). Um die Anzahl der zu bewertenden Alternativen und damit den Aufwand für die Testpersonen insbesondere bei komplexeren Produkten zu reduzieren, sieht das hier beschriebene methodische Vorgehen zur Testdurchführung die Verwendung eines kompositionellen Ansatzes in zwei Stufen vor. In der ersten Stufe erfolgt zunächst die Bewertung der alternativen Ausprägungen jeweils eines Merkmals isoliert von anderen Merkmalen und deren Ausprägungen. Der AR-Prototyp wird dazu nacheinander jeweils in einem Merkmal variiert. Um die spätere Auswertung der Bewertungsergebnisse mithilfe statistischer Methoden zu ermöglichen, werden der Testperson im Zuge der Präferenzmessung geschlossene Fragen mit vorgegebenen ordinalskalierten Antwortmöglichkeiten gestellt. Um den Eindruck einer Scheingenauigkeit zu vermeiden, wird die Verwendung einer dreistufigen Skala mit den Abstufungen -1, 0 und 1 vorgeschlagen. Dabei repräsentiert der Wert 1 die von der Testperson am meisten favorisierte Ausprägung und der Wert -1 entsprechend die am wenigsten favorisierte Ausprägung. Mehrfachnennungen und Enthaltungen sind möglich. In diesem Fall werden mehreren oder keiner der Ausprägungen die Werte 1 oder -1 zugewiesen. Allen weiteren Merkmalsausprägungen wird auf der Skala der Antwortmöglichkeiten

der Wert 0 zugewiesen. In der zweiten Stufe des kompositionellen Befragungsansatzes werden die Merkmale untereinander nach ihrer Relevanz bewertet. Dazu wird die Testperson aufgefordert dasjenige Merkmal mit dem aus ihrer Sicht höchsten bzw. niedrigsten Variationsbedarf ausgehend vom Referenzprodukt zu benennen. Die Bewertung erfolgt erneut entlang der beschriebenen dreistufigen Ordinalskala. Mehrfachnennungen und Enthaltungen sind ebenfalls erneut möglich. (Reinemann, Albers et al., 2018)

Die Ergebnisse aus der zweiten Bewertungsstufe sind im Zuge der späteren Interpretation der Testergebnisse entscheidend, um daraus zukünftige Entwicklungsschwerpunkte auf der Ebene einzelner Produktmerkmale abzuleiten. Die Ergebnisse der ersten Bewertungsstufe ermöglichen es wiederum die identifizierten Entwicklungsschwerpunkte zu konkretisieren (vgl. Kapitel 6.2.5). Die von jeder Testperson geäußerten Präferenzen sind während der Testdurchführung in geeigneter Form zu dokumentieren. Im Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekts wurde zu diesem Zweck ein Prototyp für eine Softwarelösung entwickelt, welche unter anderem die Dokumentation der Präferenzen während der Testdurchführung unterstützt (vgl. Abbildung 6.14).

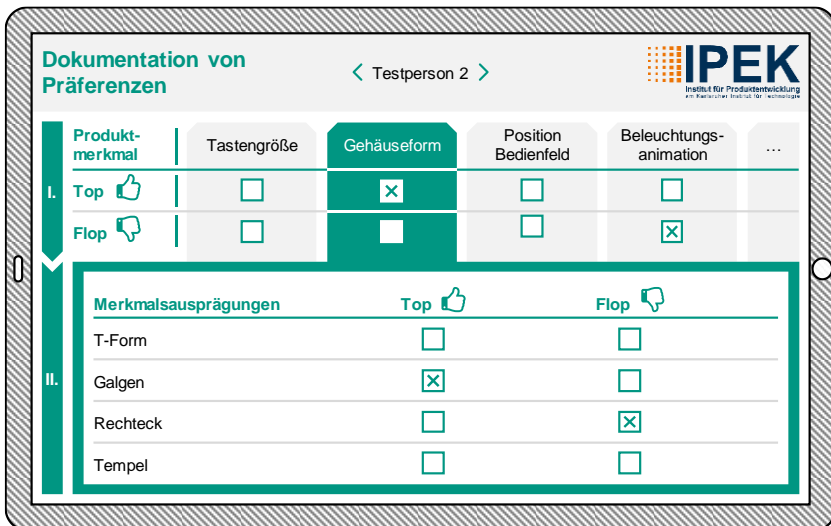


Abbildung 6.14: Dokumentation der Präferenzen im entwickelten Softwaretool

Im Anschluss an die Präferenzmessung entlang des zweistufigen kompositionellen Ansatzes erhält jede Testperson die Gelegenheit zur Äußerung von freiem Feedback zur Produktgeneration wie auch zur Testdurchführung, das vom Interviewer durch entsprechende offene Fragen eingefordert wird. Offene Fragen ermöglichen es der Testperson dabei ein breiteres Spektrum an Themen anzusprechen (Hollenberg, 2016). Aus dem freien Feedback lassen sich so ggf. Erkenntnisse zu Präferenzen der Testperson ableiten, die sich auf andere als die im Rahmen des Tests adressierten Produktmerkmale beziehen. Weiterhin kann freies Feedback zur Identifizierung zukünftiger Validierungsziele oder aber auch zur Verbesserung der Testdurchführung herangezogen werden. (Reinemann, Albers et al., 2018)

Das beschriebene Vorgehen zur Testdurchführung wird einschließlich der Konditionierung der Testpersonen nacheinander in gleicher Abfolge mit jeder Testperson durchgeführt. Um eine systematische Verzerrung der Ergebnisse der Präferenzmessung durch Reihenfolgeeffekte zu vermeiden, sollte die Reihenfolge in der die einzelnen Produktmerkmale und deren Ausprägungen den Testpersonen zur Bewertung vorgelegt werden in jedem Durchgang nach dem Zufallsprinzip variiert werden (Gierl & Höser, 2002).

6.2.5 Testergebnisse interpretieren

Im Anschluss an die Testdurchführung erfolgt in der fünften Phase die Interpretation der dokumentierten Testergebnisse. Die Phase des Referenzprozesses umfasst als Prozessschritte die Auswertung der Präferenzen und der Ableitung von Entwicklungsentscheidungen. Die Interpretation der Testergebnisse geschieht vor dem Hintergrund der zu validierenden lösungsoffenen Produkteigenschaften und dem damit in der ersten Phase des Referenzprozesses implizit festgelegten Validierungsziel.

Das Ziel der Interpretation der Testergebnisse ist es, diejenigen Produktmerkmale und deren Ausprägungen zu identifizieren, die ausweislich der erhobenen Präferenzen das zugehörige lösungsoffene Eigenschaftsziel aus Sicht der Testpersonen am besten erfüllen. Der durch die Generierung alternativer Lösungen im Zuge der Konkretisierung der ausgewählten Produkteigenschaften aufgespannte Lösungsraum kann anhand dieser Information wieder eingeschränkt und das Zielsystem entsprechend konkretisiert werden.

Präferenzen auswerten

Im Zuge der Auswertung der während der Testdurchführung erhobenen Präferenzen werden die Bewertungsergebnisse von der Ebene einzelner Testpersonen auf die Ebene der gesamten repräsentativen Stichprobe aggregiert. Dies geschieht

durch Bildung von Kennzahlen, welche anschließend als Grundlage für die Ableitung konkreter Entwicklungsentscheidungen dienen. Zuvor werden die erhobenen Daten zunächst bereinigt. Ziel der Datenbereinigung ist die Erhöhung der Datenqualität und damit insbesondere der Verlässlichkeit der Daten in Bezug auf die Abbildung der tatsächlichen Präferenzen der Testpersonen. Zu den etablierten Vorgehensweisen im Rahmen der Datenbereinigung zählt die Bereinigung der Datenbasis um nicht erklärbare Extremwerte, die stark von den restlichen Werten innerhalb der Stichprobe abweichen (Apel, 2009). Derartige Verzerrungen in den geäußerten Präferenzen können wie zuvor beschrieben durch Framing-Effekte hervorgerufen sein, die sich insbesondere bei Testpersonen ohne entsprechende Vorerfahrungen aus dem Einsatz der AR-Technik ergeben. In einem solchen Fall kann es sinnvoll sein, die Präferenzwerte dieser Testpersonen von der Auswertung auszunehmen, sofern der Eindruck besteht, dass der Framing-Effekt bei einzelnen Testpersonen durch ihre Konditionierung nicht ausreichend reduziert werden konnte. Jedoch kann hiervon abgesehen werden, sobald angenommen werden kann, dass die Verzerrung durch den Framing-Effekt für alle betrachteten Merkmale und alternativen Merkmalsausprägungen gleich groß ist. In diesem Fall führt die relative Bewertung dazu, dass sich die Effekte für einzelne Merkmale und Merkmalsausprägungen gegenseitig aufheben.

Zur Aggregation der Präferenzwerte wird anschließend für jedes bewertete Merkmal i sowie für jede Merkmalsausprägung j die Summe x_i bzw. x_{ij} aus den einzelnen Bewertungen aller Testpersonen gebildet. Vor dem Hintergrund der verwendeten dreistufigen Bewertungsskala mit den Abstufungen -1, 0 und 1 folgt für den möglichen Wertebereich der Summe bei n befragten Testpersonen jeweils:

$$-n \leq x_i = \sum_{k=1}^n x_{ik} \leq n \quad (8)$$

$$-n \leq x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ijk} \leq n \quad (9)$$

Die Summe der Bewertungen dient anschließend als Indikator für die Ableitung von Entwicklungsentscheidungen in Bezug auf die im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses zu priorisierenden Merkmale und Ausprägungen.

Entscheidungsentscheidungen ableiten

Zur Ableitung von Entwicklungsentscheidungen aus den Validierungsergebnissen wird zunächst die Merkmalsebene und anschließend die Ebene einzelner Merkmalsausprägungen betrachtet. Bei den Merkmalen lassen sich in Bezug auf die Summe ihrer Bewertungen drei Fälle unterscheiden (vgl. Tabelle 6.2). Eine positive Summe oberhalb eines geeigneten Schwellenwerts ist ein Indikator für ein aus Sicht

der befragten Testpersonen relevantes Merkmal mit entsprechendem Variationsbedarf ausgehend vom Referenzprodukt. Merkmale dieser Art sind im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses zu priorisieren und als Entwicklungsschwerpunkt zukünftiger Kurations- und Validierungszyklen zu betrachten. Dagegen impliziert eine negative Summe unterhalb eines gewissen Schwellenwerts eine besonders niedrige Relevanz aus Sicht der Testpersonen und einen entsprechend geringen Variationsbedarf. Für Merkmale dieser Art erscheint eine Übernahmevariation gerechtfertigt. Die Schwellenwerte für die Abgrenzung relevanter und irrelevanter Merkmale sind dabei fallspezifisch festzulegen. Als erste Näherung können jedoch die obere und untere Quartilsgrenze herangezogen werden. (Reinemann, Albers et al., 2018)

Tabelle 6.2: Mögliche Bewertungsergebnisse aus der Präferenzmessung auf der Ebene von Produktmerkmalen

<i>Interpretation</i>	<i>Summe aller Bewertungen eines Merkmals</i>			
	<i>Positiv</i>	<i>Nahe Null</i>		<i>Negativ</i>
	Relevantes Merkmal	Neutrales Merkmal	Kontroverses Merkmal	Irrelevantes Merkmal
<i>Implikation für den Entwicklungsprozess</i>	Merkmal priorisieren	Keine eindeutige Implikation	Ursachen für widersprüchliche Bewertung finden	Merkmal depriorisieren

Für Merkmale, deren Bewertungen in ihrer Summe zwischen den beiden Schwellenwerten liegen, lässt sich zunächst keine eindeutige Implikation ableiten. Dabei können wiederum zwei Fälle unterschieden werden. Eine neutrale Gesamtbewertung ergibt sich zum einen dann, wenn ein Merkmal von einem Großteil der Testpersonen in seiner Relevanz weder positiv noch negativ bewertet wurde. Einer neutralen Gesamtbewertung können jedoch auch widersprüchliche Bewertungen zugrunde liegen, die sich in ihrer Summe wiederum aufheben. In letzterem Fall ist es geboten die Ursachen für die widersprüchlichen Bewertungen zu finden. Dazu kann das freie Feedback der Testpersonen herangezogen oder eine Nachbefragung durchgeführt werden. Eine mögliche Ursache für widersprüchliche Bewertungen ist in der systematischen Verzerrung der Bewertungsergebnisse durch eine unzureichende Konditionierung der Testpersonen zu suchen. Sofern dies aber ausgeschlossen und die widersprüchlichen Bewertungen auf tatsächliche Präferenzunterschiede distinkter Teile der Stichprobe zurückgeführt werden können, ist in

zukünftigen Validierungszyklen der marktseitige Bedarf für die Bildung zweier Produktvarianten zu prüfen, von denen nur eine die Variation des betreffenden Merkmals vorsieht. (Reinemann, Albers et al., 2018)

Die Ableitung von Entwicklungsentscheidungen auf der Ebene der Merkmalsausprägungen geschieht weitgehend analog zur Ebene der Merkmale. Auch hier lässt sich anhand der Summe der Bewertungen einer Merkmalsausprägung grundsätzlich zwischen einer positiven, neutralen und negativen Bewertung unterscheiden (vgl. Tabelle 6.2). Durch den Vergleich der summierten Bewertungsergebnisse der einzelnen Ausprägungen je eines Merkmals ist jeweils die von den befragten Testpersonen favorisierte Ausprägung zu identifizieren. Dies erfolgt für diejenigen Merkmale, die zuvor als Entwicklungsschwerpunkt zukünftiger Kurations- und Validierungszyklen festgelegt wurden. Die Identifikation einer favorisierten Ausprägung ist dann eindeutig möglich, wenn im Feld der alternativen Ausprägungen eines Merkmals nur eine einzelne Ausprägung eine positive Summe oberhalb eines geeigneten Schwellenwerts aufweist. Haben hingegen mehrere Ausprägungen eine positive Bewertung in ähnlicher Höhe, kann der Lösungsraum auf Grundlage der Validierungsergebnisse zunächst nicht auf eine einzelne Merkmalsausprägung eingeschränkt werden. In diesem Fall ist es naheliegend, zunächst mehrere alternative Ausprägungen des betreffenden Merkmals im Lösungsraum zu behalten und in zukünftigen Validierungszyklen den marktseitigen Bedarf für die Bildung von Produktvarianten mit unterschiedlichen Merkmalsausprägungen zu prüfen. Weisen alle Ausprägungen eines Merkmals eine neutrale Bewertung auf, lassen sich ebenso wenig eindeutige Implikationen zur Einschränkung des Lösungsraums ableiten. In diesem Fall sollten jedoch analog zum Vorgehen auf der Merkmalsebene solche Fälle genauer betrachtet werden, in denen der neutralen Gesamtbewertung einer Ausprägung widersprüchliche Einzelbewertungen zugrunde liegen. (Reinemann, Albers et al., 2018)

Die Interpretation der Testergebnisse lässt sich teilweise automatisieren. So leitet die entwickelte Softwarelösung aus den erfassten Präferenzen automatisch Implikationen für die Priorisierung der Merkmale und Merkmalsausprägungen analog der vorgestellten Logik ab (vgl. Abbildung 6.15). Eine automatisierte Ableitung von Entwicklungsentscheidungen aus den aggregierten Bewertungen der Merkmale und Merkmalsausprägungen ist jedoch nur im Falle eindeutig positiver oder negativer Befragungsergebnisse möglich. Widersprüchliche Befragungsergebnisse oder solche, welche die Weiterverfolgung mehrerer Alternativen zulassen, erfordern zwingend eine individuelle Abwägung durch den Produktentwickler.

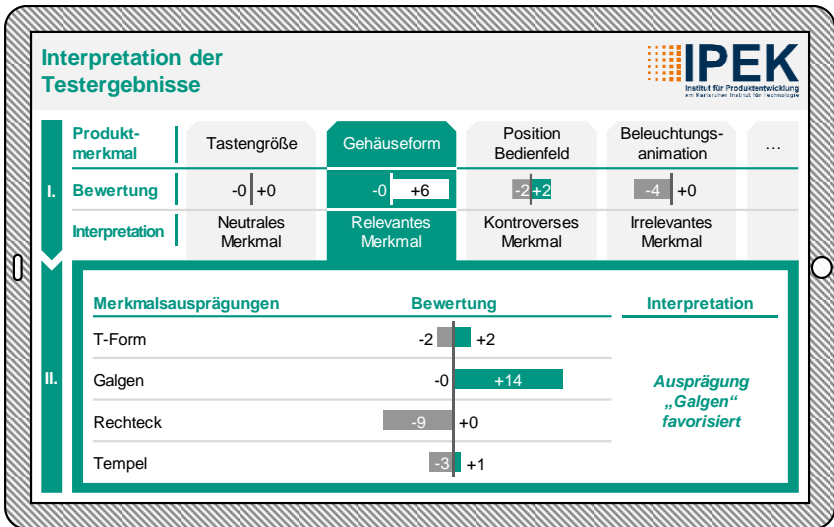


Abbildung 6.15: Automatisierte Interpretation der Testergebnisse im entwickelten Softwaretool

Im Zuge der Ableitung von Entwicklungsentscheidungen sind vom Produktentwickler zudem stets die Grenzen der Aussagekraft der generierten Testergebnisse zu berücksichtigen. Diese ergeben sich aus dem gewählten Vorgehen zur AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung zur Präferenzmessung. Dieses adressiert die Reduktion marktlicher Unsicherheiten, nicht jedoch die technische Umsetzbarkeit der betrachteten Merkmalsausprägungen. Ebenso wird die Frage der Wirtschaftlichkeit einer entwicklungstechnischen Umsetzung der marktseitig präferierten Lösungen nicht betrachtet. Beide Aspekte sind jedoch zwingend gesondert in die Entscheidungsfindung einzubringen. Aufgrund der ebenfalls hohen technologischen Unsicherheit in der Frühen Phase muss dies ggf. zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Gültigkeit der Validierungsergebnisse auch bei einer repräsentativ ausgewählten Stichprobe stets auf die zugrundeliegende Grundgesamtheit der Kunden innerhalb der definierten Zielgruppe beschränkt bleibt. Die Validierungsergebnisse können nicht uneingeschränkt auf andere Kundenzielgruppen mit abweichenden demographischen Merkmalen übertragen werden. Auch die Verwendung des zweistufigen kompositionellen Befragungsansatzes, der ohne die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwi-

schen den Bewertungen verschiedener Merkmale und ihrer Ausprägungen auskommt, schränkt die Gültigkeit der Validierungsergebnisse potenziell ein (vgl. Kapitel 2.3.3.2). Werden für die Präferenzen einzelner Merkmalsausprägungen starke Wechselwirkungen vermutet, sind diese ggf. in einer zusätzlichen Befragung nach einem dekompositionellen Verfahren zu überprüfen.

6.2.6 Nachbereiten und Lernen

Analog zur Abfolge allgemeiner Problemlösungsaktivitäten nach der SPALTEN-Methode erfolgt zum Abschluss jeder Anwendung des Referenzprozesses das Nachbereiten und Lernen. Ziel dieser Aktivität ist es, die Erfahrungen aus der Anwendung der Systematik und das dabei gewonnene Wissen zu erfassen und im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses für die Weiterentwicklung der Systematik nutzbar zu machen.

Die Erfassung des Erfahrungswissens erfolgt im Rahmen der Evaluation der Systematik für einen oder mehrere spezifische Anwendungsfälle. Als Träger relevanten Erfahrungswissens werden die Anwender der Systematik, d.h. Produktentwickler und Produktentwicklungsteams, in die Evaluation einbezogen. Sie werden dabei im Allgemeinen zur Zielerfüllung sowie zu Verbesserungspotenzialen der Systematik befragt. Je nach Anzahl der befragten Methodenanwender sowie den Anforderungen an die quantitative Auswertbarkeit, kann die Befragung sowohl in Form eines Interviews mit freien Antwortmöglichkeiten, wie auch entlang vorgegebener Bewertungskriterien durchgeführt werden. Ein beispielhaftes Vorgehen für die Evaluation der entwickelten Systematik anhand von drei Fallbeispielen ist in Kapitel 7 beschrieben. Als Kriterien für die Evaluation wurden dabei die in Kapitel 5.3 identifizierten Anforderungen an die Anwendbarkeit und den Erfolgsbeitrag der Systematik herangezogen.

Die im Rahmen der Evaluation identifizierten Verbesserungspotenziale werden im nächsten Schritt für die Weiterentwicklung der Systematik herangezogen. Als grundlegendes Prinzip dient dabei die Kodifizierung von Erfahrungswissen aus der Anwendung der Systematik, um auf diese Weise eine Weitergabe des Wissens an andere Methodenanwender zu ermöglichen. Möglichkeiten zur Weiterentwicklung bieten sich grundsätzlich durch die Erweiterung der Systematik um zusätzliche Elemente sowie die Veränderung bestehender Elemente der Systematik. Einen Ansatzpunkt für die Weiterentwicklung der entwickelten Systematik bietet die Übernahme von anwendungsfallspezifischen Anpassungen des SOLL- oder IST-Prozessmodells in das Referenzprozessmodell der Systematik. Auch die Übernahme von anwendungsfallspezifisch erhobenen Referenzprofilen für AR-basierte Prototypen stellt einen Ansatzpunkt für die Weiterentwicklung der Systematik im Sinne einer

kontinuierlichen Verbesserung dar. Konkrete Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung der Systematik, die sich aus den drei in Kapitel 7 untersuchten Fallbeispielen ergeben haben, sind im Ausblick dieser Arbeit in Kapitel 8.2 beschrieben.

6.3 Fazit

In Kapitel 6 wurde die im Rahmen der Präskriptiven Studie entwickelte Systematik zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE beschrieben. Damit wurde die Forschungsfrage FF4 adressiert:

FF4: Wie ist eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu gestalten?

Den modelltheoretischen und methodischen Rahmen für die Systematik bilden die Inhalte der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung. Die Systematik umfasst als ihre zwei zentralen Bestandteile ein Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen sowie ein Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen. Mit dem Beschreibungsmodell stellt die Systematik eine Modellsprache zur einheitlichen Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen zur Verfügung, die auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz aufbaut. Das Referenzprozessmodell wiederum bildet einen Referenzprozess ab, der Produktentwickler und Produktentwicklungsteams entlang des gesamten Vorgehens zur AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung in der Frühen Phase unterstützt. Das Vorgehen folgt in seiner grundsätzlichen Logik den einzelnen Aktivitäten der Problemlösung nach der SPALTEN-Methode. Es umfasst das Festlegen und Konkretisieren der Validierungsziele, das Konfigurieren und den Aufbau der Validierungsumgebung, die Durchführung des Tests und die abschließende Interpretation der Testergebnisse. Um eine kontinuierliche Verbesserung der Systematik zu ermöglichen, sieht der Referenzprozess im Anschluss an ihre Anwendung zudem ein Nachbereiten und Lernen vor. Das Referenzprozessmodell bildet den prozessualen Rahmen für verschiedene entwickelte Methoden und Leitfäden. Sie dienen der operativen Unterstützung der Prozessschritte in den einzelnen Phasen des Referenzprozesses.

7 Evaluation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Deskriptiven Studie II dargelegt. Die im Rahmen der Präskriptiven Studie entwickelte und in Kapitel 6 beschriebene Systematik wurde dafür in drei unterschiedlichen Fallstudien angewandt und evaluiert. Die Anwendung erfolgte dabei durch die jeweiligen Studienteilnehmer selbst. Als Kriterien für die Evaluation wurden die in Kapitel 5.3 identifizierten Anforderungen an die Anwendbarkeit und den Erfolgsbeitrag der Systematik herangezogen. Das Kapitel adressiert damit die Forschungsfrage FF5:

FF5: Welchen Beitrag kann die Systematik hinsichtlich der definierten Anforderungen leisten, um insbesondere bei der Reduktion der marktlichen Unsicherheit zu unterstützen?

Die zwei Fallstudien A und C fanden im Rahmen von studentischen Produktentwicklungsprojekten am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Stuttgart statt, die jeweils in Kooperation mit einem Industriepartner durchgeführt wurden. Die Betreuung und Auswertung von Fallstudie A erfolgte zum Teil im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Walker (2019)¹ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurde. Grundlage für Fallstudie B war ein Industrieprojekt am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Bei Fallstudie A handelt es sich um ein Live-Lab, bei Fallstudie B um eine Feld- und bei Fallstudie C um eine Laborstudie. Alle Fallstudien dauerten ca. sechs Wochen und fanden im Jahr 2018 (Fallstudie A und B) bzw. 2019 (Fallstudie C) statt. Die in den Fallstudien verwendeten AR-Interfaces wurden nach ihrer breiten Verfügbarkeit außerhalb spezialisierter Laborumgebungen ausgewählt. Dabei kamen die Microsoft® HoloLens™ sowie moderne Tablets und Smartphones verschiedener Hersteller zum Einsatz. Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Rahmenbedingungen der Fallstudien sowie den Umfang der durchgeführten Evaluation hinsichtlich der in Kapitel 5.3 identifizierten Anforderungen an die Anwendbarkeit und den Erfolgsbeitrag der Systematik. Für alle drei Fallstudien werden im Folgenden sowohl das Studiendesign wie auch die Evaluationsergebnisse beschrieben.

¹ Unveröffentlichte Masterarbeit

Tabelle 7.1: Übersicht über die durchgeführten Fallstudien zur Evaluation der entwickelten Systematik

	<i>Fallstudie A</i>	<i>Fallstudie B</i>	<i>Fallstudie C</i>
<i>Studientyp</i>	Live-Lab	Feldstudie	Laborstudie
<i>Projekthalt</i>	Entwicklung von Lösungen für die Förderung und den Transport von Georessourcen	Entwicklung einer Dunstabzugshaube	Entwicklung eines Lokalisierungssystems für die Blechfertigung
<i>Zeitraum</i>	2018 (ca. 6 Wo.)	2018 (ca. 6 Wo.)	2019 (ca. 6 Wo.)
<i>Partnerunternehmen</i>	thyssenkrupp Industrial Solutions	International tätiger Hersteller von Hausgeräten	TRUMPF
<i>AR-Interface</i>	Microsoft® HoloLens™ Tablet	Tablet	Tablet Smartphone
<i>Anwendungsevaluation</i>	Vollständig	-	Vollständig
<i>Erfolgs-evaluation</i>	Vollständig (qualitativ und quantitativ)	Teilweise (qualitativ)	Vollständig (qualitativ)

7.1 Fallstudie A: Entwicklung von Lösungen für die Förderung und den Transport von Georessourcen

Fallstudie A wurde im Rahmen eines studentischen Produktentwicklungsprojekts, dem Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung durchgeführt. Im Kontext der Produktentwicklungsforschung bezeichnet ein Live-Lab nach Albers, Walter, Wilmsen & Bursac (2018) eine Umgebung für die Untersuchung und Evaluation von Prozessen, Methoden oder Entwicklungswerkzeugen, die sich durch realistische und praxisnahe sowie gleichzeitig kontrollierbare Rahmenbedingungen auszeichnet. Live-Labs erlauben es damit die Vorteile von Laborstudien auf der einen Seite und Feldstudien auf der anderen Seite zu verbinden. Das Live-Lab IP wird als Lehrveranstaltung für Studierende der Studiengänge Maschinenbau, Mechatronik und Wirtschaftsingenieurwesen vom IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut

für Technologie (KIT) in jährlichem Turnus angeboten. Während der Dauer von fünf Monaten bearbeiten die teilnehmenden Studierenden in Teams ein reales Entwicklungsprojekt. Sie werden dabei von Mitarbeitern des IPEK betreut. Die dem Projekt zugrundeliegende Aufgabenstellung wird von einem Partnerunternehmen vorgegeben, welches in jedem Durchgang wechselt. Während alle Teams das Projekt mit der gleichen, lösungsoffenen Aufgabenstellung beginnen, differenzieren sich die von den einzelnen Teams entwickelten Lösungen im Projektverlauf immer stärker voneinander. Das Entwicklungsprojekt folgt einem Prozess aus fünf Phasen, der mit einer Analysephase beginnt und mit der Realisierung eines Prototyps oder Demonstrators endet (vgl. Abbildung 7.1). Zu Meilensteinen zum Ende jeder Phase präsentieren die Studierenden ihre Ergebnisse vor Mitarbeitern des Partnerunternehmens. (Albers, Bursac, Heimicke, Walter & Reiß, 2017; Albers, Walter et al., 2018)

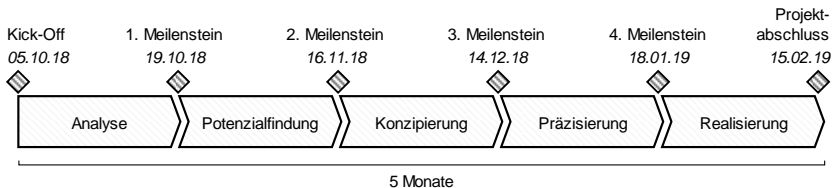


Abbildung 7.1: Ablauf des Live-Labs IP – Integrierte Produktentwicklung

Die Durchführung der Fallstudie zur Anwendung und Evaluation der Systematik fand im IP-Durchgang im Wintersemester 2018/2019 im Zeitraum von Oktober 2018 bis Februar 2019 statt. An dem Live-Lab nahmen insgesamt 41 Studierende teil, die auf sieben Teams aufgeteilt waren. 35 Teilnehmer waren Studierende im Studiengang Maschinenbau. Drei Teilnehmer waren jeweils im Studiengang Mechatronik und im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen eingeschrieben. Aufgrund ihres Studienhintergrunds verfügten alle teilnehmenden Studierenden über Erfahrungen mit der Anwendung von Methoden im Kontext der Produktentwicklung. Die zu evaluierende Systematik war jedoch keinem der Teilnehmer vor Beginn der Fallstudie bekannt.

Das Partnerunternehmen im IP-Durchgang im Wintersemester 2018/2019 war thysenkrupp Industrial Solutions. Die von den Studierenden zu bearbeitende Aufgabenstellung lautete wie folgt:

„From big-scale machines to smart organisms in the future-relevant supply of resources - Creating innovative solutions by utilizing the potential of Automation, Digitalization & Modularization“

Die weit gefasste Aufgabe der Studierenden war es demnach Lösungen zu entwickeln, um die von Großanlagen geprägte Förderung und den Transport von Georesourcen zukünftig intelligent, vernetzt und modular zu gestalten.

7.1.1 Studiendesign

Im Rahmen der Fallstudie im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung wurde die entwickelte Systematik eingesetzt, um die studentischen Entwicklungsteams bei der kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen zu unterstützen. Dabei wurden unterschiedliche Teile der Systematik zu verschiedenen Zeitpunkten während des Entwicklungsprojekts und durch verschiedene Entwicklungsteams angewandt. Die ersten beiden Phasen des entwickelten Referenzprozesses, die das methodische Vorgehen zur Festlegung und Konkretisierung der Validierungsziele sowie zur Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung beschreiben, wurden von allen sieben Entwicklungsteams durchlaufen. Dies erfolgte im Rahmen von zwei Workshops, an denen jeweils alle 41 Studierenden teilnahmen. Zu Beginn beider Workshops wurde den Studierenden in einer theoretischen Einführung zunächst der jeweilige Teil des Referenzprozesses vorgestellt. Dabei wurde auf das methodische Vorgehen entlang der einzelnen Prozessschritte eingegangen. Die Studierenden waren anschließend aufgefordert die Prozessschritte wie im Referenzprozess beschrieben jeweils innerhalb ihres Entwicklungsteams selbst durchzuführen. Zur Unterstützung wurden ihnen dazu die entsprechenden Templates zur Verfügung gestellt.

Der erste Workshop zur Festlegung und Konkretisierung der Validierungsziele fand zu Beginn der Potenzialfindungsphase statt. Ausgehend von den Ergebnissen der vorangegangenen Analysephase hatten die Studierenden im Vorfeld des Workshops bereits Produktprofile entwickelt und in Form von Eigenschaftsprofilen modelliert. Ausgehend von den Eigenschaftsprofilen wurden im Rahmen des Workshops von jedem Team entlang des im Referenzprozessmodell beschriebenen methodischen Vorgehens die im folgenden Kurations-Validierungs-Zyklus zu berücksichtigenden lösungsoffenen Produkteigenschaften ausgewählt und damit sogleich das Validierungsziel festgelegt. Die ausgewählten Produkteigenschaften wurden anschließend hinsichtlich der visuellen und non-visuellen Erscheinung, Funktionalität oder Interaktivität des späteren Produkts konkretisiert. Dazu wurden die Produkteigenschaften mit lösungsspezifischen Elementen der Funktions- und

Baustruktur des Referenzprodukts verknüpft und anschließend ein Lösungsraum alternativer Merkmalsausprägungen aufgespannt.

Der zweite Workshop wurde zu Beginn der Konzipierungsphase durchgeführt. Im Rahmen des Workshops wurde von jedem Team zunächst ein Anforderungsprofil für die im Zuge der Konkretisierung des Validierungsziels identifizierten Produktmerkmale erstellt. Durch den Abgleich mit einem vorgegebenen Referenzprofil eines AR-Prototyps wurde anschließend für jedes der betrachteten Produktmerkmale der empfohlene Umfang der virtuellen Darstellung bestimmt. Nach der Auswahl der zu berücksichtigenden Connected Systems sowie des AR-Interface wurde als Ergebnis des Workshops von jedem Team eine vollständig konfigurierte AR-basierte Validierungsumgebung mithilfe des als Teil der Systematik entwickelten Beschreibungsmodells modelliert.

Den Entwicklungsteams wurde im Anschluss an den zweiten Workshop freigestellt, ob sie den Referenzprozess weiterverfolgen und die von ihnen konfigurierte AR-basierte Validierungsumgebung aufbauen möchten, um darin einen Test zum definierten Validierungsziel durchzuführen. Drei der sieben Teams mit insgesamt 18 der 41 Studierenden haben sich für die Durchführung entschieden. Sie haben im weiteren Verlauf des Entwicklungsprojekts das im Referenzprozess beschriebene methodische Vorgehen zum Aufbau der Validierungsumgebung, zur Durchführung des Tests sowie zur Interpretation der Testergebnisse durchlaufen. Ihnen wurde dazu in individuellen, teamspezifischen Terminen das methodische Vorgehen entlang der einzelnen Prozessschritte der drei Phasen des Referenzprozesses vorgestellt. Außerdem wurden ihnen zur Unterstützung die entsprechenden Templates und Leitfäden zur Verfügung gestellt.

Die Testdurchführung in den aufgebauten AR-basierten Validierungsumgebungen erfolgte in allen drei Teams am dritten Meilenstein des Entwicklungsprojekts zum Ende der Konzipierungsphase. Die Rolle der Testpersonen wurde dabei von Mitarbeitern des Partnerunternehmens, sowie von Mitarbeitern des IPEK und von Studierenden anderer Teams eingenommen, die nicht aktiv an der Entwicklung des jeweiligen Produkts beteiligt waren. Die Interpretation der Testergebnisse wurde in den drei Teams unmittelbar im Anschluss an die Testdurchführung am Tag des Meilensteins durchgeführt.

Für die Evaluation der Anwendbarkeit und des Erfolgsbeitrags der Systematik im Rahmen der Fallstudie wurden regelmäßige Umfragen unter den teilnehmenden Studierenden durchgeführt. Die in Kapitel 5.3 identifizierten Anforderungen wurden dazu in einen Fragebogen mit Aussagen vom Likert-Typ überführt. Zur Bewertung der Zustimmung zur Erfüllung der einzelnen Anforderungen durch die Systematik

wurde eine vierstufige Ordinalskala verwendet. Die Anwendbarkeit der Systematik wurde differenziert für unterschiedliche Teile der Systematik evaluiert. Die Studierenden wurden dazu gebeten jeweils nach dem Durchlaufen einer Phase des Referenzprozesses einen entsprechenden separaten Fragebogen auszufüllen. Lediglich die Evaluation der Anwendbarkeit des methodischen Vorgehens der letzten beiden Phasen zur Testdurchführung und Interpretation der Testergebnisse erfolgte aufgrund der unmittelbaren zeitlichen Nähe in einem gemeinsamen Fragebogen. Der Erfolgsbeitrag der Systematik wurde im Anschluss an den dritten Meilenstein ebenfalls mithilfe eines Fragebogens durch die Studierenden evaluiert.

Zur Evaluation der Erfüllung der erstrangigen Anforderung E3 an die Unterstützung der Systematik bei der Reduktion der marktlichen Unsicherheit wurden zusätzlich weitere Daten herangezogen. So wurde der Grad der subjektiv empfundenen marktlichen Unsicherheit bzgl. Zielen und Anforderungen aus Kunden- und Anwendersicht in einer wöchentlichen Umfrage unter allen Studierenden ermittelt. Die Studierenden wurden dazu gebeten ihre individuelle marktliche Unsicherheit für das von ihnen entwickelte Produkt entlang einer Skala von 0% bis 100% zu verorten. Die individuell empfundene marktliche Unsicherheit wurde anschließend durch Mittelwertbildung auf die Teamebene aggregiert.

Da die Bewertung der marktlichen Unsicherheit durch die Studierenden selbst genauso wie die direkte Evaluation des Erfolgsbeitrags der Systematik durch die Studierenden grundsätzlich subjektiven Einflüssen unterliegt, wurde eine weitere

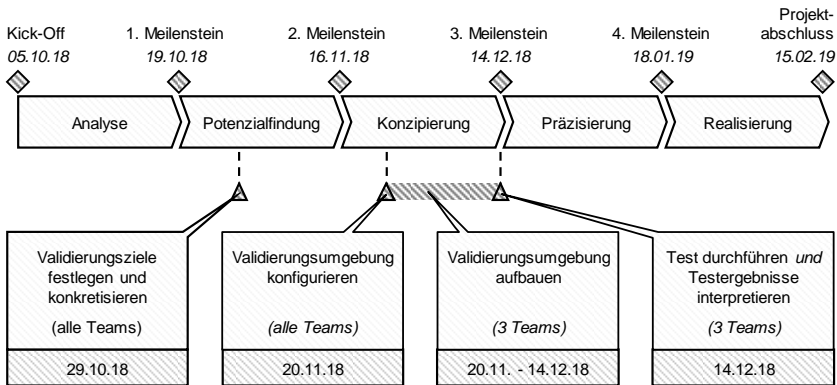


Abbildung 7.2: Anwendung der Systematik in Fallstudie A im Prozessmodell des Live-Labs IP – Integrierte Produktentwicklung

Proxy-Variable zur indirekten, jedoch objektiven Messung der marktlichen Unsicherheit gewählt. Als solche diente die Anzahl der im Projektverlauf dokumentierten Zielsystemelemente. Diese wurde wöchentlich separat für jedes Team anhand der jeweils aktuellen Version des Zielsystems ermittelt, welches von den Studierenden in tabellarischer Form erstellt und aktualisiert wurde. Ein Zielsystemelement entspricht dabei einer Tabellenzeile, in der ein für das zu entwickelnde Produkt relevantes Ziel, eine Anforderung oder eine Randbedingung beschrieben ist. Die Anzahl der Zielsystemelemente wie auch die empfundene marktliche Unsicherheit wurde sowohl für die drei Teams erhoben, die den Referenzprozess zur AR-gestützten Validierung vollständig durchlaufen haben, als auch für die vier Teams, die dies nicht getan haben. Die Auswertung der Daten erfolgte anschließend getrennt für die Test- und die Kontrollgruppe. Abbildung 7.2 gibt einen Überblick über die Anwendung von unterschiedlichen Teilen der Systematik im Verlauf des Live-Labs IP – Integrierte Produktentwicklung.

7.1.2 Studienergebnisse

Abbildung 7.3 zeigt die Evaluationsergebnisse zur Anwendbarkeit der Systematik, die im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung erhoben wurden. Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich eine hohe Zustimmung der befragten Studierenden zur Erfüllung der Anforderungen an die Anwendbarkeit des methodischen Vorgehens. Gleichwohl lassen sich jedoch Unterschiede zwischen den Zustimmungswerten für die einzelnen Phasen des Referenzprozesses erkennen. So liegt der Anteil der Befragten, die der Erfüllung einzelner Anforderungen an die Anwendbarkeit des methodischen Vorgehens zur Konfiguration AR-basierter Validierungsumgebungen voll und ganz oder eher zustimmen im Gegensatz zu den anderen Phasen für drei der untersuchten Anforderungen unterhalb von 70%. Dies betrifft die Zustimmung zur leichten Integration in bestehende Prozesse der Produktentwicklung (A5), zur Übertragung auf unterschiedliche Produkte und Industrien (A6) sowie zur einfachen Anwendbarkeit für den Produktentwickler (A2). Die Zustimmung zur Erfüllung von Anforderung A5 fällt für diese Phase mit 50% unter allen Anforderungen und Phasen des Referenzprozesses am niedrigsten aus und weist damit auf einen entsprechenden Verbesserungsbedarf der Systematik hin. Die Erfüllung der erstrangigen Anforderung A1 an ein angemessenes Verhältnis von Aufwand und Nutzen erreicht hingegen für alle Phasen des Referenzprozesses eine Zustimmung oberhalb von 70%.

Abbildung 7.4 zeigt die Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik, die im Anschluss an den dritten Meilenstein von den drei Teams erhoben wurden, die den Referenzprozess zur AR-gestützten Validierung vollständig durchlaufen ha-

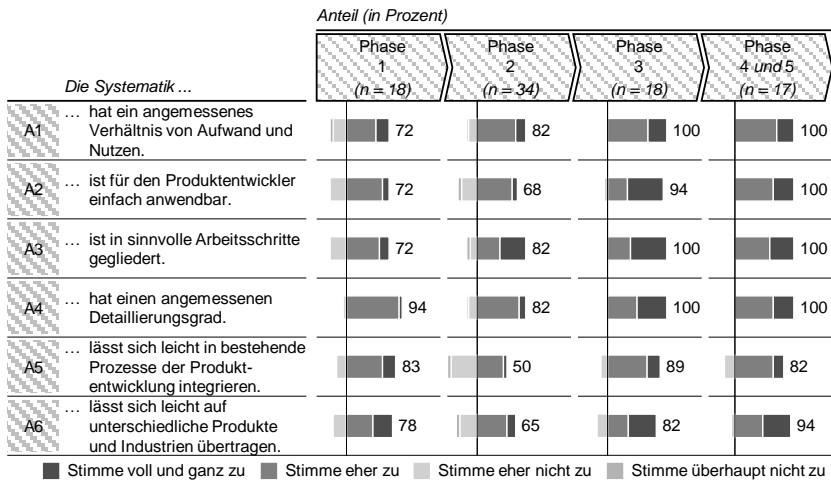


Abbildung 7.3: Evaluationsergebnisse zur Anwendbarkeit der Systematik in Fallstudie A

ben. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Anwendung der entwickelten Systematik im Entwicklungsprojekt aus Sicht der befragten Studierenden den zielgerichteten Einsatz der AR-Technik zur Produktvalidierung sicherstellen konnte. 89% der Studierenden stimmen der entsprechenden Aussage voll und ganz oder eher zu. Vergleichsweise hohe Zustimmungswerte von jeweils 79% zeigen zudem, dass die Systematik die Akzeptanz früher Validierungsaktivitäten in AR-basierten Validierungsergebnissen sowie das Vertrauen in die erzielten Validierungsergebnisse erhöhen konnte. Die erstrangige Anforderung E3 an die frühzeitige Reduktion der marktlichen Unsicherheit erreicht hingegen mit 53% eine verhältnismäßig niedrige Zustimmung in der direkten Befragung der Studierenden.

Dem Ergebnis aus der direkten Bewertung der Anforderung E3 durch die Studierenden steht die Auswertung der wöchentlich erfragten marktlichen Unsicherheit sowie die Anzahl der im Projektverlauf dokumentierten Zielsystemelemente gegenüber. Der Verlauf beider Größen lässt auf einen Beitrag zur Reduktion der marktlichen Unsicherheit durch die Anwendung der Systematik schließen. Abbildung 7.5 zeigt die indexierte marktliche Unsicherheit im Projektverlauf getrennt für die Test- und Kontrollgruppe. Die Testgruppe bilden dabei die drei Teams aus insgesamt 18 Studierenden, die den Referenzprozess zur AR-gestützten Validierung vollständig

Fallstudie A: Entwicklung von Lösungen für die Förderung und den Transport von ...

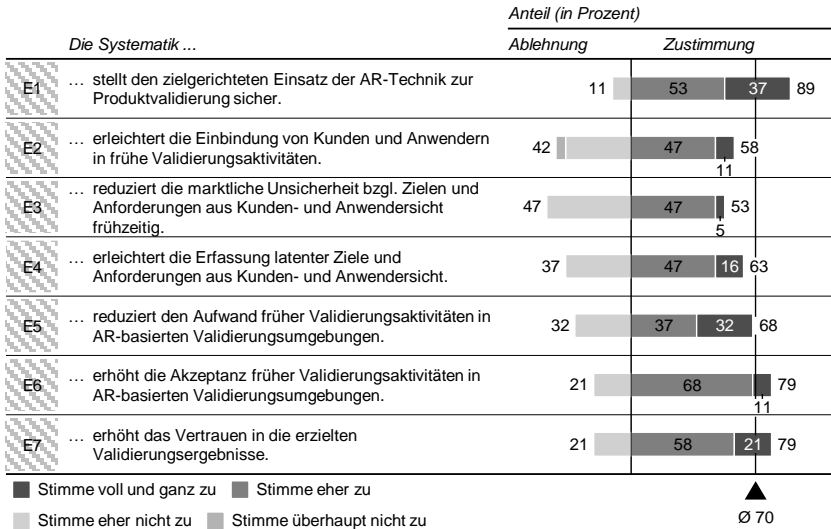


Abbildung 7.4: Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik in Fallstudie A (n = 17)

durchlaufen haben. Die vier Teams der Kontrollgruppe mit insgesamt 23 Studierenden haben hingegen keine AR-basierte Validierungsumgebung aufgebaut. Die Kalenderwochen 52 und 1 sind in der Abbildung nicht enthalten, da aufgrund einer Projektpause in diesem Zeitraum keine Daten zur empfundenen marktlichen Unsicherheit erhoben wurden.

Sowohl für die Test- wie auch für die Kontrollgruppe ist die empfundene marktliche Unsicherheit als indexierte Größe in Bezug auf das jeweilige Niveau zum Zeitpunkt des dritten Meilensteins in der Kalenderwoche 50 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte in den Teams der Testgruppe die Testdurchführung in den aufgebauten AR-basierten Validierungsumgebungen. Die Entwicklung der marktlichen Unsicherheit in der Testgruppe, die unmittelbar nach der Testdurchführung zu beobachten ist, steht folglich unter dem unmittelbaren Eindruck der dabei erzielten Validierungsergebnisse. Die Abbildung zeigt, dass die empfundene marktliche Unsicherheit der Testgruppe im Zeitraum von der Testdurchführung bis zur nächsten Erhebung der Unsicherheit in der Kalenderwoche 51 um 29 Prozentpunkte sinkt, während die marktliche Unsicherheit der Kontrollgruppe im selben Zeitraum steigt. Letzteres wurde von drei der vier Teams der Kontrollgruppe in einer nachträglichen Befragung

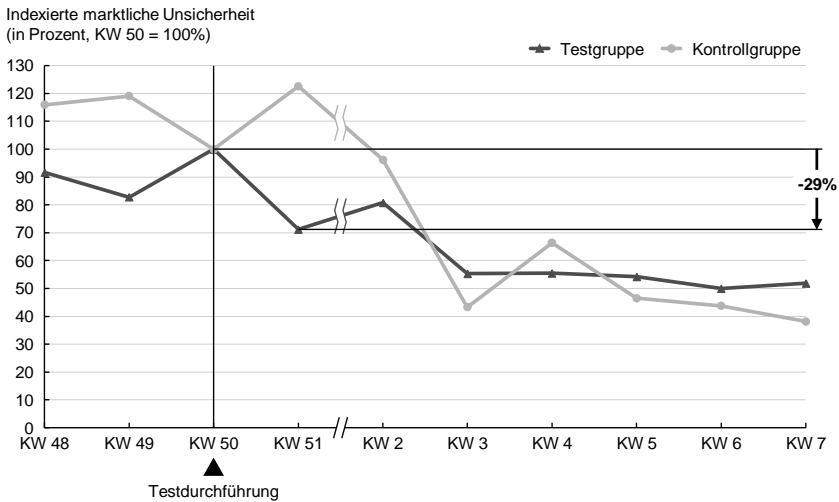


Abbildung 7.5: Marktliche Unsicherheit im Projektverlauf in Fallstudie A

mit widersprüchlichen Informationen zu relevanten Kundenanforderungen begründet, die sie während des Meilensteins von Mitarbeitern des Partnerunternehmens bekommen hätten. In der Testgruppe machte ein Team eine gleichlautende Aussage. Die beiden anderen Teams der Testgruppe gaben in der Befragung hingegen an, die Validierungsergebnisse aus dem AR-gestützten Test seien eindeutig gewesen und hätten maßgeblich zur Reduktion der marktlichen Unsicherheit in dem betreffenden Zeitraum beigetragen. Im weiteren Projektverlauf gleicht sich die empfundene marktliche Unsicherheit der Testgruppe wieder derjenigen der Kontrollgruppe an.

Die erhobenen Daten deuten demnach auf einen kurzfristigen Beitrag zur Reduktion der marktlichen Unsicherheit durch die Anwendung der Systematik durch die Testgruppe in der Fallstudie hin. Ein Rückschluss auf einen entsprechenden langfristigen Effekt lassen sie jedoch nicht zu. Dabei ist zu bedenken, dass die zu späteren Beobachtungszeitpunkten ermittelte Unsicherheit immer weniger unter dem Eindruck der Testdurchführung am dritten Meilenstein steht, zumal auch in späteren Phasen des Entwicklungsprojekts weitere Validierungsaktivitäten durchgeführt wurden.

Anders als die Entwicklung der empfundenen marktlichen Unsicherheit deutet der Verlauf der Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente auch auf einen langfristigen

Beitrag zur Reduktion der marktlichen Unsicherheit durch die Anwendung der Systematik hin (vgl. Abbildung 7.6). Die Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente wurde als objektiv messbare Proxy-Variable für die marktliche Unsicherheit ebenfalls wöchentlich während der gesamten Projektlaufzeit für die Teams der Test- und der Kontrollgruppe erhoben. Bei der Auswertung wurde zudem zwischen Zielsystemelementen mit und ohne direktem Bezug zum zentralen Nutzenversprechen des Produkts, dem sogenannten Unique Selling Point (USP), differenziert. Die Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente ist wie zuvor die marktliche Unsicherheit als indexierte Größe in Bezug auf das Niveau zum Zeitpunkt des dritten Meilensteins in der Kalenderwoche 50 dargestellt.

Während sich die relative Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente in der Zeit vor dem dritten Meilenstein für Test- und Kontrollgruppe annähernd gleich entwickelt, zeigt diese bei der Testgruppe in den Wochen nach der Testdurchführung eine deutlich höhere Dynamik im Vergleich zur Kontrollgruppe. Dieser Effekt hält zudem bis zur Kalenderwoche 3 an. Erst ab diesem Zeitpunkt gleicht sich der wöchentliche prozentuale Zuwachs in der relativen Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente von Test- und Kontrollgruppe wieder an. Die Differenz zwischen Test- und Kontrollgruppe bleibt hingegen bis zum Ende des Entwicklungsprojekts bestehen. Während

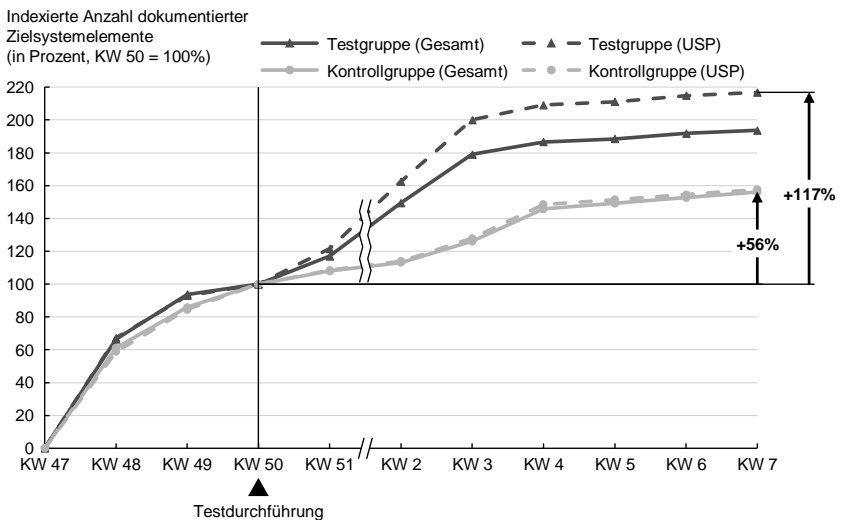


Abbildung 7.6: Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente im Projektverlauf in Fallstudie A

sich die Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente bezogen auf den Zeitpunkt des dritten Meilensteins in der Testgruppe in etwa verdoppelt, steigt diese in der Kontrollgruppe lediglich um weniger als 60%. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass die Anzahl der dokumentierten Zielsystemelemente mit direktem Bezug zum zentralen Nutzenversprechen des Produkts in der Testgruppe nach der Testdurchführung relativ stärker wächst als es bei der Gesamtzahl dokumentierten Zielsystemelemente der Fall ist. In der Kontrollgruppe ist hingegen kein Unterschied in den wöchentlichen Wachstumsraten dieser beiden Größen auszumachen.

Die erhobenen Daten deuten demnach darauf hin, dass durch die methodisch unterstützte Validierung in AR-basierten Validierungsumgebungen durch die Testgruppe in der Fallstudie mehr neue Ziele und Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt und insbesondere solche mit direktem Bezug zum zentralen Nutzenversprechen identifiziert werden konnten. Diese Beobachtung lässt wiederum auf einen entsprechenden Beitrag zur Reduktion der marktlichen Unsicherheit durch die Anwendung der Systematik schließen.

7.2 Fallstudie B: Entwicklung einer Dunstabzugshaube

Fallstudie B wurde im Rahmen des Entwicklungsprojekts einer neuen Produktgeneration einer Dunstabzugshaube in Kooperation mit einem international tätigen Hersteller von Hausgeräten am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Der Projektpartner hatte das Entwicklungsprojekt im Jahr 2017 initiiert. Die Markteinführung der Produktgeneration war nach etwa vierjähriger Entwicklungszeit für das Jahr 2020 geplant. Die Entwicklung der neuen Produktgeneration G_2 erfolgte ausgehend von der Vorgängergeneration G_1 . Diese stellte demnach ein zentrales Element des Referenzsystems dar. Auch wesentliche Teile des Zielsystems der Produktgeneration waren relativ zur Vorgängergeneration formuliert. Bei dem zu entwickelnden Produkt handelte es sich um eine sogenannte Tischhaube, eine Dunstabzugshaube, die sich mithilfe eines entsprechenden Mechanismus in der Kochplatte versenken lässt.

7.2.1 Studiendesign

Die Fallstudie wurde im Jahr 2018 über einen Zeitraum von etwa sechs Wochen durchgeführt (vgl. Abbildung 7.7). Dabei wurde die entwickelte Systematik eingesetzt, um den Projektpartner bei der kundenintegrierten Validierung einer Entwicklungsgeneration der Tischhaube zu unterstützen. Im Rahmen der Fallstudie wurde

der gesamte Referenzprozess durchlaufen. Die ersten drei Phasen des Referenzprozesses zur Festlegung und Konkretisierung der Validierungsziele sowie zur Konfiguration und zum Aufbau der AR-basierten Validierungsumgebung wurden vom Autor dieser Arbeit selbst in enger Abstimmung mit den Projektmitarbeitern des Partnerunternehmens durchgeführt. Als solche waren acht Mitarbeiter aus den Bereichen Produktentwicklung und Produktmanagement in die Fallstudie involviert. Im Rahmen einer Vorbefragung zu Beginn der Fallstudie gaben alle acht Mitarbeiter an, bisher noch keine Erfahrungen mit dem Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung gemacht zu haben.

Die Testdurchführung erfolgte im Rahmen eines Workshops am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), an dem alle Mitarbeiter des Partnerunternehmens teilnahmen. Die Testpersonen wurden aus dem Panel einer Marktforschungsagentur rekrutiert und dabei so ausgewählt, dass sie repräsentativ für die Kundenzielgruppe der zu entwickelnden Produktgeneration stehen. Die Interpretation der Testergebnisse wurde unmittelbar im Anschluss an die Testdurchführung von allen anwesenden Projektmitarbeitern gemeinsam durchgeführt. Abbildung 7.7 gibt einen Überblick über die Anwendung der Systematik im Entwicklungsprojekt und stellt dieses in den Kontext der Absatzphase der Vorgängergeneration G_1 .

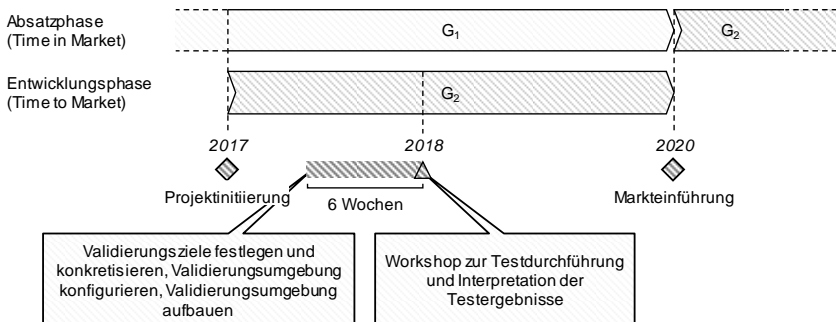


Abbildung 7.7: Anwendung der Systematik in Fallstudie B im Modell der PGE

Zumal der Autor dieser Arbeit selbst aktiv in die Anwendung der Systematik in der Fallstudie einbezogen war, wurde von den Projektmitarbeitern des Partnerunternehmens lediglich der Erfolgsbeitrag der Systematik evaluiert. Zu diesem Zweck wur-

den ausgewählte Anforderungen an die Systematik in einen Fragebogen mit Aussagen vom Likert-Typ überführt, der zum Ende der Fallstudie von den acht Projektmitarbeitern ausgefüllt wurde. Zur Bewertung der Zustimmung zur Erfüllung der einzelnen Anforderungen wurde eine vierstufige Ordinalskala verwendet.

7.2.2 Studienergebnisse

Ausgehend vom Produktprofil der Produktgeneration in seiner Form als Eigenschaftsprofil wurde im Rahmen der Fallstudie zunächst das Validierungsziel festgelegt und konkretisiert. Entlang des methodischen Vorgehens der ersten Phase des Referenzprozesses wurden dazu die im Kurations-Validierungs-Zyklus zu berücksichtigenden Produkteigenschaften anhand ihrer Kundenrelevanz, Wettbewerbspositionierung und Soll-Veränderung zur Vorgängergeneration ausgewählt. Anschließend wurde der technische Lösungsraum für die zu validierenden

Produkt-eigenschaften	Kundenrelevanz	Soll-Veränderung	Auswahl	Produktfunktion	Teilsystem	Variationsart			
						Produktmerkmal	Alternative	Ausprägungen	
Bedienungs-freundlichkeit	2	BC	+	<input checked="" type="checkbox"/>	-	Bedienfeld	Position	GV	Haube Kochfeld
							Tastengröße	GV	Klein Mittel Groß
Beleuchtungs-wirkung	3	BC	++	<input checked="" type="checkbox"/>	Kochfeld beleuchten Betriebszustand anzeigen	Beleuchtungs-system	Beleuchtungs-animation	PV	Statisch Animiert
...				<input type="checkbox"/>					
<i>Kundenrelevanz:</i>				<i>Wettbewerbspositionierung:</i>			<i>Soll-Veränderung:</i>		
1	Basisanforderung	BIC	Alleiniger Bester (Best in Class)			+++	Besser als Referenzprodukt		
2	Leistungsanforderung	TOP	Bester (nicht alleinig)			-/-	Schlechter als Referenzprodukt		
3	Begeisterungsanforderung	IBC	In der Gruppe der Besten, aber nicht bester (In Best Class)			o	Genauso gut wie Referenzprodukt		
		n/a	Keine Wettbewerbspositionierung						

Abbildung 7.8: Auszugsweise Darstellung des befüllten Schemas zur Auswahl und Konkretisierung von Produkteigenschaften für die AR-gestützte Validierung in Fallstudie B

Produkteigenschaften bis zu einem Grad konkretisiert, der die Abbildung des angestrebten Kunden- und Anbieternutzens in Form eines AR-Prototyps als konkretem Artefakt erlaubt. Abbildung 7.8 zeigt auszugsweise das befüllte Schema zur Auswahl und Konkretisierung von Produkteigenschaften für die AR-gestützte Validierung in der Fallstudie.

Als zu validierende Produkteigenschaften wurden unter anderem die *Bedienungsfreundlichkeit* und die *Beleuchtungswirkung* der Produktgeneration ausgewählt. Beide Eigenschaften haben eine hohe Bedeutung für die Wettbewerbsdifferenzierung. Die Beleuchtungswirkung wurde zudem als Begeisterungsmerkmal mit besonders hoher Kundenrelevanz eingeschätzt. Weiterhin wurde aus der Auswertung von Reklamationsdaten und Kundenrezensionen der Bedarf für eine positive Soll-Veränderung von Bedienungsfreundlichkeit und Beleuchtungswirkung im Vergleich zur vorangegangenen Produktgeneration abgeleitet.

Im Zuge der Konkretisierung wurden relevante Produktfunktionen und technische Teilsysteme zur Beeinflussung von Bedienungsfreundlichkeit und Beleuchtungswirkung identifiziert. Ferner wurden für jede Produkteigenschaft alternative Lösungen generiert, um im Rahmen der Validierung eine vergleichende Bewertung im Sinne einer komparativen Präferenzmessung zu ermöglichen. So wurde zur Beeinflussung der Beleuchtungswirkung etwa eine Variation des Produktmerkmals *Beleuchtungsanimation* vorgesehen. Im Gegensatz zu einer statischen Beleuchtung wie bei der Vorgängergeneration erlaubt es eine animierte Beleuchtung neben der Produktfunktion *Kochfeld beleuchten* gleichzeitig auch die Funktion *Betriebszustand anzeigen* zu adressieren.

Im weiteren Verlauf der Fallstudie wurde entlang des methodischen Vorgehens des Referenzprozesses eine geeignete AR-basierte Validierungsumgebung konfiguriert und aufgebaut. Abbildung 7.9 zeigt die konfigurierte AR-basierte Validierungsumgebung zur Validierung der Bedienungsfreundlichkeit und der Beleuchtungswirkung der Tischhaube. Die zu berücksichtigenden Connected Systems wurden dabei unter Beachtung des Testfalls ausgewählt. Als solcher wurde eine bestimmte Befehlsfolge zur Bedienung der Tischhaube durch den Anwender während des Erhitzens eines wassergefüllten Topfs auf der Kochplatte festgelegt. Bis auf das Bedienfeld, das Kochfeld, die Umgebung, und den Anwender selbst, sind alle Teilsystemmodelle virtuell in die Validierungsumgebung eingebunden. Das Bedienfeld wurde als gemischt physisch-virtuelles Teilsystemmodell eingebunden. Dabei wurde zur Wiedergabe des haptischen Tasteindrucks ein flexibel platzierbarer physischer Prototyp des Bedienfelds verwendet, der mit einer virtuellen Textur zur Wiedergabe des optischen Eindrucks des Bedienfelds überblendet wurde. Die Entscheidung über den

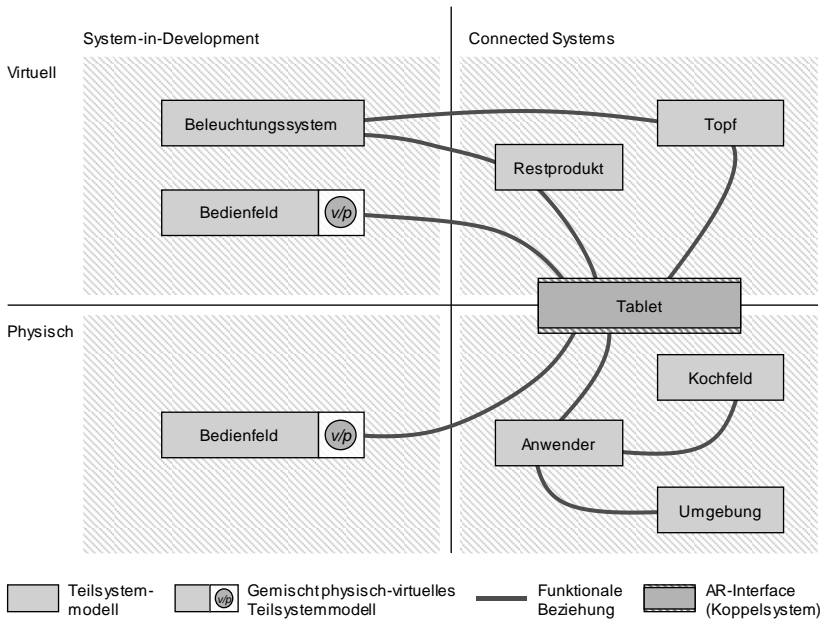


Abbildung 7.9: Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung in Fallstudie B

geeigneten Umfang virtueller Darstellung der Teilsystemmodelle wurde unter Abwägung der Anforderungen an die Wiedergabetreue und der Verfügbarkeit der physischen und virtuellen Teilsystemmodelle getroffen. Die frühere Verfügbarkeit virtueller Stimuli für den Kundentest im Vergleich zu einem vollständig physischen Prototyp ermöglichte in der Fallstudie nach Einschätzung der Projektmitarbeiter des Partnerunternehmens einen um etwa ein Jahr vorgezogenen Validierungszeitpunkt und so einen deutlich früheren Erkenntnisgewinn in Bezug auf die zu validierenden Produkteigenschaften. Die auf Grundlage der Testergebnisse getroffenen Entwicklungsentscheidungen konnten so zu einem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess der Produktgeneration getroffen werden, der durch weitreichendere Möglichkeiten zur Einflussnahme auf Produkt- und Prozesseigenschaften sowie durch tendenziell niedrigere Änderungskosten gekennzeichnet ist (vgl. Kapitel 2.2.3).

Auch die Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik, die im Anschluss an den Workshop zur Testdurchführung von den acht Projektmitarbeitern des Partnerunternehmens erhoben wurden, lassen einen ähnlichen Schluss zu (vgl.

Abbildung 7.10). Demnach stimmen 75% der Befragten der Aussage voll und ganz oder eher zu, wonach durch den Einsatz der Systematik die marktliche Unsicherheit frühzeitig reduziert werden konnte (E3). Ebenfalls 75% der Befragten sind der Meinung, dass die Systematik das Vertrauen in die erzielten Validierungsergebnisse erhöht (E7). Dies erhöht nach Aussage der Projektmitarbeiter die Bereitschaft, die auf Grundlage der Testergebnisse getroffenen Entwicklungsentscheidungen kurzfristig umzusetzen und sie dafür ggf. gegenüber anderen internen Stakeholdern durchzusetzen.

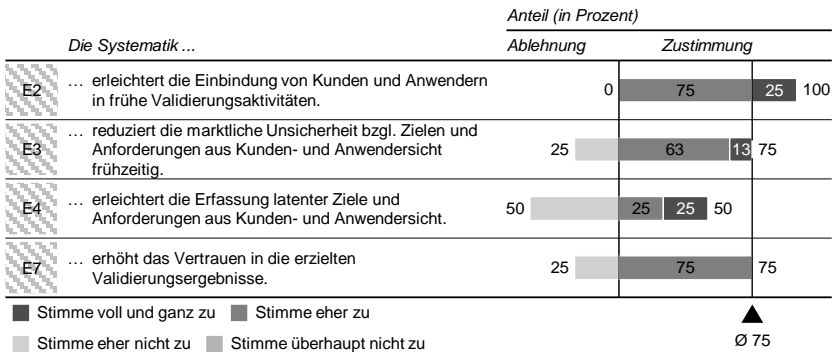


Abbildung 7.10: Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik in Fallstudie B (n = 8)

7.3 Fallstudie C: Entwicklung eines Lokalisierungssystems für die Blechfertigung

Fallstudie C wurde im Rahmen eines studentischen Produktentwicklungsprojekts an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Stuttgart durchgeführt. Das Projekt fand in Kooperation mit dem Unternehmen TRUMPF sowie dem IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) statt. Im Rahmen des Projekts bearbeiteten drei Studierende über einen Zeitraum von sechs Wochen Teile eines realen Entwicklungsprojekts. Sie wurden dabei vom Autor dieser Arbeit, von Mitarbeitern des Partnerunternehmens sowie von Mitarbeitern der DHBW Stuttgart betreut. Die dem Projekt zugrundeliegende Aufgabenstellung wurde vom Partnerunternehmen vorgegeben. Sie bestand in der Entwicklung einer neuen Produktgeneration eines Lokalisierungssystems für Bauteile in der Blechfertigung. Als Referenzprodukt diente den Studierenden dabei die aktuell im

Markt befindliche Produktgeneration des Lokalisierungssystems. Sie besteht aus mobilen Markern, die einzelnen Bauteilen oder Bauteilstapeln beigelegt werden können und deren Position innerhalb der Fertigungshalle kontinuierlich und in Echtzeit vom System erfasst werden kann. Dies geschieht mithilfe von zentralen Sendebzw. Empfangseinheiten, die stationär in der Halle angebracht werden. Die Visualisierung der Positionsdaten erfolgt über eine entsprechende Software, welche ebenfalls Teil des Lokalisierungssystems ist.

7.3.1 Studiendesign

Die Fallstudie wurde im Jahr 2019 über einen Zeitraum von sechs Wochen durchgeführt. Im Zuge der Fallstudie wurde ein einzelner Kurations-Validierungs-Zyklus zur Entwicklung und Validierung einer Entwicklungsgeneration der neuen Produktgeneration des Lokalisierungssystems durchlaufen. Dabei wurde von den drei Studierenden die entwickelte Systematik entlang aller Phasen des Referenzprozesses eigenständig angewandt. Zu Beginn der Fallstudie wurde den Studierenden in einer theoretischen Einführung zunächst das gesamte methodische Vorgehen entlang der einzelnen Phasen des Referenzprozesses vorgestellt. Außerdem wurden ihnen zur Unterstützung die entsprechenden Templates und Leitfäden zur Verfügung gestellt. Den Studierenden lagen zudem ausführliche Informationen zur aktuell im Markt befindlichen Produktgeneration vor. Weiterhin wurden ihnen die Ergebnisse einer Analyse zu möglichen zukünftigen Entwicklungen in der Blechfertigung zur Verfügung gestellt, die zuvor mithilfe der Methode der Szenariotechnik erstellt wurde.

Die Testdurchführung erfolgte dezentral zu verschiedenen Zeitpunkten und an verschiedenen Orten. Die aufgebaute AR-Szene wurde dazu in Form einer auf gängigen Smartphone und Tablets lauffähigen AR-Applikation zusammen mit einem Fragebogen an die Testpersonen verschickt. Der Fragebogen enthielt entsprechende Anweisungen zum Durchlaufen des Testfalls mithilfe der AR-Applikation. Zudem bot er den Testpersonen die Möglichkeit ihre Präferenzen für die alternativen Ausprägungen der betrachteten Produktmerkmale zu dokumentieren. Die Rolle der Testpersonen wurde dabei von Mitarbeitern des Partnerunternehmens sowie ausgewählten Studierenden der DHBW Stuttgart eingenommen, die über relevantes Wissen zu den logistischen Abläufen in der Blechfertigung verfügen. Die Interpretation der Testergebnisse wurde im Nachgang zur Testdurchführung von den drei Studierenden anhand der in den Fragebögen dokumentierten Präferenzen sowie einer Nachbefragung der Testpersonen durchgeführt.

Am Ende der Fallstudie wurden die Anwendbarkeit und der Erfolgsbeitrag der Systematik durch die drei Studierenden evaluiert. Zu diesem Zweck wurden die in Kapitel 5.3 identifizierten Anforderungen an die Systematik in einen Fragebogen mit Aussagen vom Likert-Typ überführt, der von den Studierenden ausgefüllt wurde. Zur Bewertung der Zustimmung zur Erfüllung der einzelnen Anforderungen wurde eine vierstufige Ordinalskala verwendet.

7.3.2 Studienergebnisse

Zu Beginn der Fallstudie wurden von den Studierenden zunächst die Validierungsziele festgelegt und konkretisiert. Ausgangspunkt dafür bildete das Produktprofil des Referenzprodukts in seiner Modellierung als Eigenschaftsprofil. Die dort definierten lösungsoffenen, kundenerlebbaren Produkteigenschaften wurden von den Studierenden um zukünftig relevante Produkteigenschaften ergänzt und anschließend entlang des im Referenzprozessmodell beschriebenen methodischen Vorgehens hinsichtlich ihrer Kundenrelevanz, Wettbewerbspositionierung und Soll-Veränderung zum Referenzprodukt bewertet. Die Bewertung erfolgte in Abstimmung mit Mitarbeitern des Partnerunternehmens. Für die Festlegung der Soll-Veränderung wurden zudem die Ergebnisse der Szenarioanalyse herangezogen. Die Ableitung der Soll-Veränderung jeder Produkteigenschaft aus den Szenarien zur zukünftigen Entwicklung der Blechfertigung erfolgte mithilfe der Systematik zur generationsübergreifenden Produktentwicklung nach Albers, Dumitrescu et al. (2018) und Marthaler et al. (2019). Anhand der Bewertungen wurden die im Kurations-Validierungs-Zyklus zu berücksichtigenden Produkteigenschaften ausgewählt. Der technische Lösungsraum für diese Produkteigenschaften wurde anschließend bis zu einem Grad konkretisiert, der die Abbildung des angestrebten Kunden- und Anbieternutzens in Form eines AR-Prototyps erlaubt. Abbildung 7.11 zeigt auszugsweise das befüllte Schema zur Auswahl und Konkretisierung von Produkteigenschaften für die AR-gestützte Validierung in der Fallstudie.

Als zu validierende Produkteigenschaften wurden die *Automatisierung* und die *Eindeutige Zuordnung* ausgewählt. Die *Automatisierung* des Lokalisierungssystems beschreibt dabei dessen Fähigkeit zu einem Betriebsverhalten, welches ohne manuelle Eingriffe, etwa zur Platzierung der Marker, auskommt. Die *eindeutige Zuordnung* beschreibt die Fähigkeit des Lokalisierungssystems zur eindeutigen und wechselsungsfreien Zuordnung von Markern zu einzelnen Bauteilen, die damit als solche und nicht etwa bloß als Teil eines Bauteilstapels lokalisierbar werden. Beide Eigenschaften haben eine hohe oder sehr hohe Bedeutung für die Wettbewerbsdifferenzierung und die Kundenzufriedenheit. Weiterhin wurde für beide Eigenschaften aus der Szenarioanalyse der Bedarf für eine positive Soll-Veränderung im Vergleich

Produkt-eigenschaften	Wettb.-positionierung		Soll-Veränderung		Auswahl	Produktfunktion	Teilsystem	Produktmerkmal	Variationsart	Alternative Ausprägungen	
	Kundenrelevanz										
Automatisierung	2	TOP	++	<input checked="" type="checkbox"/>		Selbstständig fortbewegen	Fortbewegungssystem	-	PV	„Räder“ „Käfer“ „Propeller“	
Eindeutige Zuordnung	3	TOP	++	<input checked="" type="checkbox"/>		An Bauteil haften	Sicherungs- und Befestigungssystem	-	PV	„Saugnapf“ „Karabiner“ „Magnet“ „Klemme“	
Lebensdauer	2	IBC	o	<input type="checkbox"/>							
Reichweite	2	IBC	o	<input type="checkbox"/>							
...				<input type="checkbox"/>							
Kundenrelevanz:					Wettbewerbspositionierung:			Soll-Veränderung:			
1	Basisanforderung		BIC	Alleiniger Bester (Best in Class)			+++	Besser als Referenzprodukt			
2	Leistungsanforderung		TOP	Bester (nicht alleinig)			+/-	Schlechter als Referenzprodukt			
3	Begeisterungsanforderung		IBC	In der Gruppe der Besten, aber nicht bester (In Best Class)			o	Genauso gut wie Referenzprodukt			
			n/a	Keine Wettbewerbspositionierung							

Abbildung 7.11: Auszugsweise Darstellung des befüllten Schemas zur Auswahl und Konkretisierung von Produkteigenschaften für die AR-gestützte Validierung in Fallstudie C

zum Referenzprodukt abgeleitet. Dem zugrunde liegt eine steigende Relevanz automatisierter Abläufe sowie individualisierter Produkte in kleineren Losgrößen, die aus den untersuchten Szenarien für die zukünftige Entwicklung der Blechfertigung hervorging.

Im Zuge der Konkretisierung wurden relevante technische Teilsysteme zur Beeinflussung von Automatisierung und Eindeutiger Zuordnung identifiziert. Ferner wurden für jede Produkteigenschaft alternative Lösungen generiert, um im Rahmen der Validierung eine vergleichende Bewertung im Sinne einer komparativen Präferenzmessung zu ermöglichen. So wurde zur Beeinflussung der Automatisierung des Lokalisierungssystems eine Variation des *Fortbewegungssystems* und zur Beeinflussung der Eindeutigen Zuordnung eine Variation des *Sicherungs- und Befestigungssystems* jeweils einzelner Marker vorgesehen.

Im weiteren Verlauf der Fallstudie wurde entlang des methodischen Vorgehens des Referenzprozesses eine geeignete AR-basierte Validierungsumgebung konfiguriert

und aufgebaut. Abbildung 7.12 zeigt die konfigurierte AR-basierte Validierungsumgebung zur Validierung der Automatisierung und der Eindeutigen Zuordnung des Lokalisierungssystems. Bis auf die Umgebung und den Anwender selbst, sind alle Teilsystemmodelle virtuell in die Validierungsumgebung eingebunden. Die Entscheidung über den geeigneten Umfang virtueller Darstellung der Teilsystemmodelle wurde vor dem Hintergrund der geplanten dezentralen Testdurchführung getroffen. Dabei sollte die Darstellung der AR-Szene mithilfe eines Smartphones oder Tablets eigenverantwortlich durch die Testpersonen an einem selbst gewählten Ort erfolgen. Die Verfügbarkeit spezieller physischer Teilsystemmodelle zur Laufzeit der AR-Applikation während der Testdurchführung konnte demnach nicht vorausgesetzt werden. Die Erreichung einer bestimmten Wiedergabetreue durch den AR-Prototyp wurde in der Fallstudie bei der Konfiguration der Validierungsumgebung daher vor der Verfügbarkeit als Entscheidungskriterium zurückgestellt.

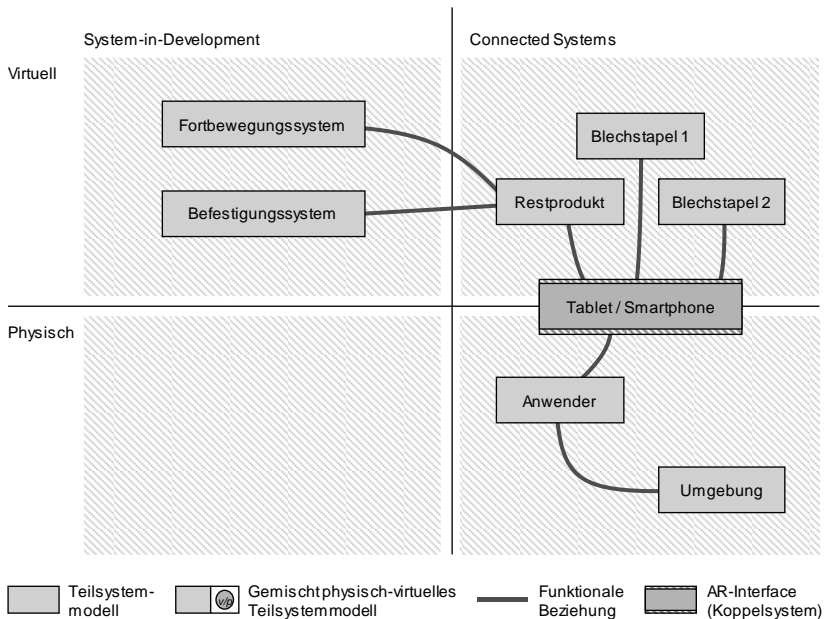


Abbildung 7.12: Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung in Fallstudie C

Abbildung 7.13 zeigt die Evaluationsergebnisse zur Anwendbarkeit der Systematik, die am Ende der Fallstudie von den drei Studierenden erhoben wurden. Die Ergebnisse zeigen eine weitgehende Zustimmung der befragten Studierenden zur Erfüllung der Anforderungen an die Anwendbarkeit des methodischen Vorgehens. Gleiches gilt für die Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik (vgl. Abbildung 7.14). Hier lassen sich gleichwohl jedoch Unterschiede zwischen den Zustimmungswerten für die Erfüllung der einzelnen Anforderungen erkennen. So stimmt eine der befragten Personen der Aussage eher nicht zu, wonach die Systematik das Vertrauen in die erzielten Validierungsergebnisse erhöht (E7). Sie begründet dies in einer nachträglichen Befragung mit der aus ihrer Sicht fehlenden methodischen Unterstützung bei der Beurteilung der grundsätzlichen Eignung des Einsatzes von AR-Prototypen für die vorliegende Validierungsaufgabe im Vergleich zu anderen Prototypen und Validierungsansätzen. Eine besonders hohe Zustimmung erzielt hingegen die Aussage, wonach die Systematik die Einbindung von Kunden und Anwendern in frühe Validierungsaktivitäten erleichtert (E2). Alle drei Studierenden stimmen dieser Aussage voll und ganz zu. Sie begründen dies unter anderem mit der Möglichkeit zu einer dezentralen Testdurchführung durch den Einsatz entsprechend konfigurierter AR-basierter Validierungsumgebungen, was den direkten Zugang zu geeigneten Testpersonen erleichtert hat. Die Anforderung E5 wurde von keiner der drei Personen bewertet, zumal ihnen nach eigener Aussage

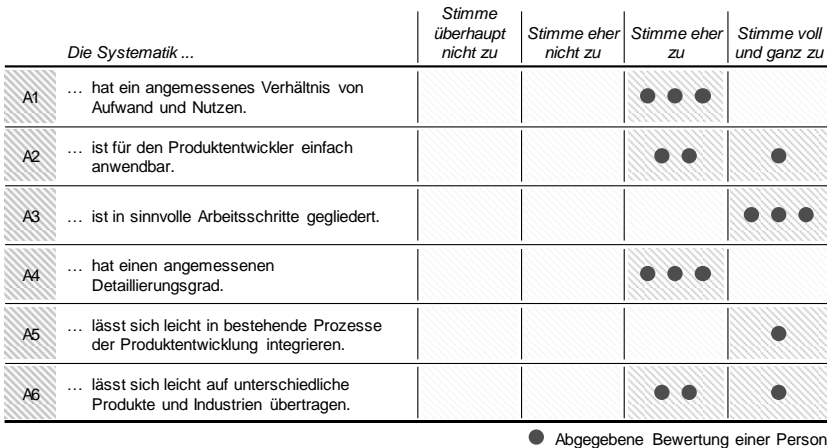


Abbildung 7.13: Evaluationsergebnisse zur Anwendbarkeit der Systematik in Fallstudie C (n = 3)

eine Referenz für die Beurteilung des relativen Aufwands bei der Durchführung von Validierungsaktivitäten in AR-basierten Validierungsumgebungen fehlte.

Die Systematik ...		Stimme überhaupt nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme voll und ganz zu
E1	... stellt den zielgerichteten Einsatz der AR-Technik zur Produktvalidierung sicher.			● ● ●	
E2	... erleichtert die Einbindung von Kunden und Anwendern in frühe Validierungsaktivitäten.				● ● ●
E3	... reduziert die marktliche Unsicherheit bzgl. Zielen und Anforderungen aus Kunden- und Anwendersicht frühzeitig.			● ● ●	
E4	... erleichtert die Erfassung latenter Ziele und Anforderungen aus Kunden- und Anwendersicht.			● ● ●	
E5	... reduziert den Aufwand früher Validierungsaktivitäten in AR-basierten Validierungsumgebungen.				
E6	... erhöht die Akzeptanz früher Validierungsaktivitäten in AR-basierten Validierungsumgebungen.			● ● ●	
E7	... erhöht das Vertrauen in die erzielten Validierungsergebnisse.		●	● ●	

● Abgegebene Bewertung einer Person

Abbildung 7.14: Evaluationsergebnisse zum Erfolgsbeitrag der Systematik in Fallstudie C (n = 3)

7.4 Fazit

In Kapitel 7 wurden die Ergebnisse der Deskriptiven Studie II beschrieben. In der Deskriptiven Studie II wurde die entwickelte Systematik in drei unterschiedlichen Fallstudien angewandt und in Bezug auf ihre Anwendbarkeit und ihren Erfolgsbeitrag evaluiert. Damit wurde die Forschungsfrage FF5 adressiert:

FF5: Welchen Beitrag kann die Systematik hinsichtlich der definierten Anforderungen leisten, um insbesondere bei der Reduktion der marktlichen Unsicherheit zu unterstützen?

Den drei deskriptiven Fallstudien lagen unterschiedliche Entwicklungssituationen und Validierungsaufgaben zugrunde. Sie fanden im Rahmen von studentischen Pro-

duktentwicklungsprojekten (Fallstudien A und C) sowie eines vom Autor dieser Arbeit begleiteten Industrieprojekts (Fallstudie B) statt. In jedem der Entwicklungsprojekte wurden reale Entwicklungsaufgaben aus der industriellen Entwicklungspraxis der jeweils beteiligten Unternehmen bearbeitet. Mit einem Unternehmen aus der Großanlagentechnik, einem Hersteller von Hausgeräten und einem Hersteller von Werkzeugmaschinen als beteiligte Unternehmen fanden die drei Fallstudien in unterschiedlichen Industrien statt. Die Größe der einzelnen Entwicklungsteams variierte in den Fallstudien von drei (Fallstudie C) bis acht (Fallstudie B) aktiv beteiligten Personen. In Fallstudie A arbeiteten parallel sieben Entwicklungsteams mit je fünf bis sechs Personen an der Entwicklungsaufgabe.

Die entwickelte Systematik wurde in allen drei Fallstudien von den Studienteilnehmern zur methodischen Unterstützung bei der kundenintegrierten Validierung einer Entwicklungsgeneration in einer AR-basierten Validierungsumgebung eingesetzt. In Fallstudie B und C wurde dazu der gesamte Referenzprozess entlang aller fünf Phasen durchlaufen. In Fallstudie A wurde der Referenzprozess von drei der sieben Teams vollständig durchlaufen. Die übrigen vier Teams konnten dadurch als Kontrollgruppe herangezogen werden. Neben dem Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen wurde auch das auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes entwickelte Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen in allen Fallstudien zur Modellierung der konfigurierten AR-basierten Validierungsumgebung eingesetzt. Die Studienteilnehmer wurden bei der Anwendung der Systematik durch den Autor dieser Arbeit unterstützt. In Fallstudie A und C erfolgte dies in Form einer theoretischen Einführung und der Bereitstellung der entsprechenden Templates und Leitfäden. In Fallstudie B war der Autor dieser Arbeit selbst aktiv in die Anwendung der Systematik einbezogen.

Die Anwendung der Systematik erfolgte in allen Fallstudien jeweils für einen Krea-tions-Validierungs-Zyklus innerhalb des zugrundeliegenden Entwicklungsprojekts. Die Rahmenbedingungen in der jeweils begleiteten Phase des Entwicklungsprojekts entsprachen in weiten Teilen den Charakteristika der Frühen Phase von Produktentstehungsprozessen. Sie waren insbesondere durch einen hohen Grad an Unsicherheit sowie lösungsoffene Informationen gekennzeichnet. Im Sinne des konkretisierten Verständnisses der Frühen Phase im Modell der PGE waren zudem Informationen aus dem jeweils zugrundeliegenden Referenzsystem von großer Bedeutung. Sie stellten einen wesentlichen Teil der vorhandenen Wissensbasis der Entwicklungsteams. Hierzu zählten sowohl die verwendeten lösungsoffenen Eigenschaftsstrukturen aus dem Referenzzielsystem wie auch lösungsspezifische Elemente des Referenzobjektsystems.

Die Evaluation der Anwendbarkeit der Systematik erfolgte in den Fallstudien A und C durch die Studienteilnehmer selbst entlang der in Kapitel 5.3 identifizierten Anforderungen mithilfe eines Fragebogens. In Fallstudie B wurde aufgrund der aktiven Rolle des Autors dieser Arbeit in der Anwendung der Systematik auf eine Evaluation der Anwendbarkeit verzichtet. Die Evaluationsergebnisse zeigen in beiden Fallstudien grundsätzlich eine hohe Zustimmung der befragten Studienteilnehmer zur Erfüllung der Anforderungen an die Anwendbarkeit der Systematik. Die erstrangige Anforderung A1 an ein angemessenes Verhältnis von Aufwand und Nutzen der Systematik sieht eine große Mehrheit der Teilnehmer von Fallstudie A sowie alle Teilnehmer von Fallstudie C eher oder voll und ganz erfüllt. In Fallstudie A wurde die Anwendbarkeit der Systematik differenziert für unterschiedliche Teile der Systematik evaluiert. Dabei zeigt sich, dass das methodische Vorgehen zur Konfiguration AR-basierter Validierungsumgebungen unter allen Phasen des Referenzprozesses die geringste mittlere Zustimmung zur Erfüllung der Anforderungen an die Anwendbarkeit erfährt. Die Zustimmung zur leichten Integration in bestehende Prozesse der Produktentwicklung fällt für diese Phase mit 50% unter allen Anforderungen und Phasen des Referenzprozesses am niedrigsten aus und weist damit auf einen entsprechenden Verbesserungsbedarf der Systematik hin.

Für die Evaluation des Erfolgsbeitrags der Systematik entlang der entsprechenden Anforderungen wurde in allen Fallstudien ebenfalls eine fragebogengestützte Umfrage unter den Studienteilnehmern durchgeführt. Zur Evaluation der Erfüllung der erstrangigen Anforderung E3 an die Unterstützung der Systematik bei der Reduktion der marktlichen Unsicherheit wurden in Fallstudie A zusätzlich weitere Daten herangezogen, die zudem getrennt für die Test- und die Kontrollgruppe ausgewertet wurden. Die Ergebnisse der direkten Evaluation des Erfolgsbeitrags der Systematik durch die Studienteilnehmer zeigen eine weitgehende Zustimmung zur Erfüllung der Mehrzahl der Anforderungen. Die durchschnittliche Zustimmung liegt in Fallstudie A bei 70% und in Fallstudie B bei 75% aller Befragten. Es lassen sich in allen Fallstudien jedoch gleichwohl Unterschiede zwischen den Zustimmungswerten für die Erfüllung der einzelnen Anforderungen erkennen. Die Zustimmung zur Anforderung E4 an die erleichterte Erfassung latenter Ziele und Anforderungen aus Kunden- und Anwendersicht ist sowohl in Fallstudie A als auch in Fallstudie B unterdurchschnittlich hoch. Dies weist auf Defizite bei der immersiven und nutzerzentrierten Gestaltung der AR-Szene hin. Das dadurch erzeugte Präsenzepfinden befähigt die Testpersonen dazu implizites Wissen in die Beurteilung des Produkts einzubeziehen und zu explizieren. Die Erfüllung der Anforderung E2 an die erleichterte Einbindung von Kunden und Anwendern in frühe Validierungsaktivitäten erfährt in Fallstudie A ebenfalls eine nur unterdurchschnittlich hohe Zustimmung. In Fallstudie C hat dagegen die dezentrale Testdurchführung den direkten Zugang zu geeigneten Testpersonen

erleichtert, was sich in einer vollständigen Zustimmung zur Erfüllung der Anforderung E2 niederschlägt. Dafür wurden in Fallstudie C Einschränkungen bei der Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung in Kauf genommen, da die Verfügbarkeit spezieller physischer Teilsystemmodelle zur Laufzeit der AR-Applikation während der dezentralen Testdurchführung nicht vorausgesetzt werden konnte.

Die erstrangige Anforderung E3 an die frühzeitige Reduktion der marktlichen Unsicherheit erreicht in der direkten Befragung in Fallstudie B eine durchschnittlich hohe und in Fallstudie C eine unterdurchschnittlich hohe Zustimmung. In der Auswertung der wöchentlich erfragten marktlichen Unsicherheit sowie der Anzahl der im Projektverlauf dokumentierten Zielsystemelemente in Fallstudie A finden sich hingegen deutliche Hinweise auf einen Beitrag zur Reduktion der marktlichen Unsicherheit durch die Anwendung der Systematik. Die Untersuchung zeigt, dass die empfundene marktliche Unsicherheit der Testgruppe nach der AR-gestützten Testdurchführung sinkt, während die marktliche Unsicherheit der Kontrollgruppe im selben Zeitraum steigt. Zudem steigt die relative Anzahl dokumentierter Zielsystemelemente nach der Testdurchführung bei der Testgruppe deutlich stärker an als bei der Kontrollgruppe. Dies gilt zudem in besonderem Maße für Zielsystemelemente mit direktem Bezug zum zentralen Nutzenversprechen des Produkts.

Zusammenfassend zeigte sich in der Anwendung und Evaluation der entwickelten Systematik in den drei Fallstudien, dass ein methodisches Vorgehen die Nutzung der unterschiedlichen Potenziale aus der Anwendung der AR-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Frühen Phase ermöglicht. Dies gilt insbesondere für die Reduktion der für die Frühe Phase charakteristischen marktlichen Unsicherheit. Damit konnte die dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungshypothese für die drei Fallstudien bestätigt werden.

Gleichzeitig wurden in den drei durchgeführten Fallstudien die zuvor diskutierten Grenzen der Anwendung der AR-Technologie in der kundenintegrierten Produktvalidierung deutlich. So blieben alle drei Fallstudien auf die Validierung von Produktmerkmalen interaktiver Produkte beschränkt, die sich für den Anwender unmittelbar durch seine menschliche Sinneswahrnehmung erschließen lassen. Der Anwender war dafür jeweils zwingend aktiv und physisch in die AR-basierte Validierungsumgebungen eingebunden. Die in den Fallstudien verwendeten AR-Interfaces wurden nach ihrer breiten Verfügbarkeit außerhalb spezialisierter Laborumgebungen ausgewählt. Ihr Fokus lag, wie bei gängigen AR-Systemen üblich, auf der Generierung visueller illusorischer Stimuli. Es ließen sich daher in allen Fallstudien jeweils nur visuell erlebbare Produktmerkmale mit einer entsprechenden Wiedergabetreue virtuell in der AR-Szene abbilden.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich die Inhalte der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung, die den modelltheoretischen und methodischen Rahmen für die Systematik bilden, auf den Kontext der AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung übertragen lassen und dabei den zielgerichteten Einsatz der AR-Technologie unterstützen. So bildet die lösungsoffene Modellierung des mit einem Produkt angestrebten Nutzens im Produktprofil einen geeigneten Ausgangspunkt für die frühzeitige Festlegung von Validierungszielen für die AR-gestützte Validierung. Das Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation unterstützt zudem die notwendige Konkretisierung der zu validierenden Produkteigenschaften bis zu einem Grad, der die Abbildung des angestrebten Kunden- und Anbieternutzens in Form eines AR-Prototyps erlaubt. Der IPEK-XiL-Ansatz bildet die Basis des entwickelten Beschreibungsmodells. Dieses stellt eine geeignete Modellsprache zur einheitlichen Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen zur Verfügung und unterstützt so den Dialog sowie die Transparenz innerhalb des Entwicklungsteams während der Konfiguration und des Aufbaus AR-basierter Validierungsumgebungen. Das Modell der PGE bildet die Basis für die gezielte methodische Unterstützung bei der AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung in der Frühen Phase. Die Anwendung der Systematik in den Fallstudien hat gezeigt, dass sich mit Hilfe der AR-Technologie Referenzprodukte im Sinne des Modells der PGE gezielt um virtuelle Komponenten zu einem gemischt physisch-virtuellen Prototypen ergänzen oder aber bestehende physische Komponenten eines Referenzprodukts durch virtuelle Komponenten ersetzen lassen. Die Nutzung bestehenden Wissens im Sinne einer bewussten Produktgenerationsentwicklung unterstützt so einen zielgerichteten Einsatz der AR-Technologie zur Produktvalidierung in der Frühen Phase. Dies zeigt sich ebenso an der Verwendung lösungsoffener Eigenschaftsstrukturen aus dem Referenzielsystem und lösungsspezifischer Elemente des Referenzobjektsystems bei der Festlegung und Konkretisierung von Validierungszielen für die AR-gestützte Validierung in der Frühen Phase.

Zumal in allen Fallstudien reale Entwicklungsaufgaben aus der industriellen Entwicklungspraxis unter praxisnahen Bedingungen bearbeitet wurden, kann die Übertragbarkeit der Evaluationsergebnisse und damit deren externe Validität mit Einschränkungen angenommen werden. Einschränkungen der Übertragbarkeit auf die Entwicklungspraxis ergeben sich aus den teils idealisierten Bedingungen für die Anwendung der Systematik in den Fallstudien. So wurden alle Studienteilnehmer bei der Anwendung der Systematik durch eine theoretische Einführung zum methodischen Vorgehen unterstützt. Weiterhin verfügten sie im IPEK XR-Lab über die erforderlichen Hardware- und Softwareressourcen. Auch die in den Fallstudien vorhandenen individuellen Kompetenzen der Studienteilnehmer für den Aufbau der AR-Szenen können in der Entwicklungspraxis nicht zwangsläufig vorausgesetzt werden, zumal sie sich nicht zwingend mit dem Kompetenzprofil eines Konstrukteurs

oder Produktentwicklers decken. In allen Fallstudien war zudem die Anwendung der Systematik zur AR-gestützten, kundenintegrierten Validierung von vornherein im Entwicklungsprozess vorgesehen. Herausforderungen bei der Integration des Referenzprozesses in bestehende Prozesse der Produktentwicklung, die sich etwa aus einer fehlenden Managementunterstützung ergeben können, wurden damit nicht betrachtet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse dieser Arbeit und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Abschließend wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten gegeben, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit stehen.

8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde eine Systematik zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE entwickelt, beschrieben und evaluiert. Zur Klärung des Forschungsgegenstands wurde zunächst ein Überblick über den relevanten Stand der Forschung gegeben und daraus der dieser Arbeit zugrundeliegende Forschungsbedarf abgeleitet.

Anhand der Literatur wurde die Augmented-Reality-Technologie als eine Technologie charakterisiert, die geeignet ist, den besonderen Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten zu begegnen. Der Produktvalidierung kommt als zentraler wissensgenerierender Aktivität in der Produktentwicklung eine besondere Rolle bei der Reduktion von technologischer und marktlicher Unsicherheit zu. Die besondere Bedeutung einer frühzeitigen Validierung ergibt sich dabei aus ihrer Hebelwirkung auf nachgelagerte Prozesse und den geringeren Aufwand zur Fehlerkorrektur in frühen Entwicklungsphasen. Gerade Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses sind jedoch mit besonderen Schwierigkeiten für die Produktentwickler verbunden, die sich aus den charakteristischen Besonderheiten dieser Phase ergeben. Der hohe Grad an Unsicherheit erschwert die Eingrenzung und Priorisierung von Validierungsaktivitäten in dieser Phase. Zudem liegt in der Frühen Phase naturgemäß noch kein vollständiges Produkt vor, weshalb auf verkürzte Produktmodelle zurückgegriffen werden muss, die ggf. nicht alle relevanten Eigenschaften und Merkmale des zu entwickelnden Produkts mit der nötigen Wiedergabetreue abbilden. Die oft geringe Verfügbarkeit zeitlicher und finanzieller Ressourcen steht zudem der Herstellung wiedergabetreuer Prototypen oder der Durchführung zeitaufwändiger Tests unter Einbindung aller relevanten Stakeholder entgegen.

Der Anwendung der AR-Technologie im Rahmen der kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte wird in der Literatur ein besonderes Potenzial zugesprochen. Dies gründet sich auf der Möglichkeit zur Kombination physischer und virtueller Objekte in einer immersiven Umgebung. AR-basierte Prototypen ermöglichen so ein potenziell realistisches Produkterlebnis, auch wenn das zu untersuchende System nicht oder nur in Teilen real vorliegt und die technische Lösung weitgehend unbekannt ist. Ihr Einsatz im Rahmen von Kundentests erlaubt damit einen vorgezogenen Erkenntnisgewinn und eine Reduktion der für die Frühe Phase charakteristischen hohen marktlichen Unsicherheit. Entwicklungsentscheidungen können so im Sinne des Frontloadings in die Frühe Phase verlagert werden. Neben dem indirekten Kosteneffekt infolge der Vermeidung später Änderungen im Produktentwicklungsprozess wird zudem eine direkte Kostenreduktion durch den teilweisen Ersatz potenziell teurerer physischer Prototypen durch teilvirtuelle AR-Prototypen in der Literatur diskutiert.

Der Nutzung der Potenziale aus der Anwendung der AR-Technologie in der Produktvalidierung stehen in der Entwicklungspraxis fehlendes Erfahrungswissen entgegen. Anwendungen der AR-Technologie befinden sich in der heutigen Entwicklungspraxis vielfach noch im Versuchsstadium. Neben der erst verhältnismäßig kurzen Verfügbarkeit günstiger, kompakter und gleichzeitig leistungsfähiger AR-Systeme wurden Hürden bei der Integration der AR-Technologie in etablierte, CAD-basierte Arbeitsabläufe in der Produktentwicklung als Herausforderung für einen produktiven Einsatz in der Entwicklungspraxis identifiziert. Vor diesem Hintergrund wurde die folgende Forschungshypothese formuliert, die dem Forschungsziel dieser Arbeit zugrunde liegt:

Forschungshypothese

Ein methodisches Vorgehen ermöglicht die Nutzung von Potenzialen aus der Anwendung der Augmented-Reality-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung und damit insbesondere die Reduktion der für diese Phase charakteristischen hohen marktlichen Unsicherheit.

Zur Operationalisierung des Forschungsziels wurden ausgehend vom identifizierten Forschungsbedarf fünf Forschungsfragen formuliert und im Rahmen dieser Arbeit beantwortet:

Forschungsfragen

FF1: Wie wird die AR-Technologie in der Entwicklungspraxis zur Produktvalidierung in der Frühen Phase eingesetzt?

- | | |
|------|---|
| FF2: | Welche Potenziale hat der Einsatz der AR-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der Entwicklungspraxis? |
| FF3: | Welche Anforderungen sind an eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu stellen? |
| FF4: | Wie ist eine Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE zu gestalten? |
| FF5: | Welchen Beitrag kann die Systematik hinsichtlich der definierten Anforderungen leisten, um insbesondere bei der Reduktion der marktlichen Unsicherheit zu unterstützen? |

Das wissenschaftliche Vorgehen zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen, das in dieser Arbeit gewählt wurde, ist angelehnt an die Forschungsmethodik *Design Research Methodology* (DRM). Im Rahmen der Deskriptiven Studie I wurde zunächst das Verständnis für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase anhand der Ergebnisse aus drei empirischen Studien weiter vertieft. Die Ergebnisse einer durchgeführten Fragebogenstudie bestätigen das Potenzial aus der Anwendung der AR-Technologie in der Entwicklungspraxis. Die Umfrageteilnehmer aus der Automobilbranche und anderen Industrien sehen im Einsatz der AR-Technologie mehrheitlich das Potenzial, den Herausforderungen früher Validierungsaktivitäten effektiv zu begegnen. Gleichzeitig sind sie mehrheitlich der Meinung, dass der Einsatz der AR-Technik zur Produktvalidierung in der Praxis oft nicht zielgerichtet erfolgt und eine unterstützende Methode helfen würde, die Potenziale der AR-Technik in der Produktvalidierung besser zu nutzen. Die Umfrageergebnisse bekräftigen damit den formulierten Forschungsbedarf. In einer experimentellen, fragebogengestützten Untersuchung konnte zudem das Verständnis für die Potenziale der AR-Technologie in der Validierung interaktiver Produkte vertieft werden. Dafür wurde in der Untersuchung die Wiedergabetreue eines AR-Prototyps entlang verschiedener Dimensionen mit der Wiedergabetreue alternativer Produktmodelle verglichen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen für das AR-Modell eine mitunter deutlich höhere Wiedergabetreue für die untersuchten Dimensionen in den Bereichen Erscheinung, Funktionalität und Interaktivität. Insbesondere die höhere Wiedergabetreue in Dimensionen, die sich auf die Wechselwirkung des Modells mit seiner physischen Umgebung beziehen, begünstigt eine realistischere Wahrnehmung eines Produkts im Kontext seiner realen Umgebung. Die Identifizierung von Anforderungen an die Unterstützungsleistung, die Anwendbarkeit und den Erfolgsbeitrag der entwickelten Systematik war Gegenstand einer dritten empirischen Studie. Hierzu wurde eine zweistufige Delphi-Befragung unter Experten durchgeführt.

Ausgehend von den identifizierten Anforderungen wurde im Rahmen der Präskriptiven Studie eine Systematik zur kundenintegrierten Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE entwickelt. Zu den zwei zentralen Bestandteilen der Systematik zählen ein Beschreibungsmodell für AR-basierte Validierungsumgebungen sowie ein Referenzprozessmodell für die Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen. Der Aufbau des Referenzprozessmodells gliedert sich in fünf Phasen, die wiederum jeweils einzelne Prozessschritte umfassen. Das Prozessmodell bildet den prozessualen Rahmen für verschiedene entwickelte Methoden und Leitfäden. Sie dienen der operativen Unterstützung der Prozessschritte. Das im Prozessmodell entlang der einzelnen Prozessschritte beschriebene Vorgehen für die AR-gestützte Produktvalidierung lässt sich im iPeM verschiedenen Basis- und Kern-Aktivitäten auf den zwei Layern Produkt G_n und Validierungssystem zuordnen. Bei dem entwickelten Prozessmodell handelt es sich im Sinne der Abstraktionsgrade im Phasenmodell des iPeM um ein Referenzprozessmodell, also um eine auf Basis von Erfahrungswerten erstellte Vorlage des Projektverlaufs für die AR-gestützte Produktvalidierung. Das Beschreibungsmodell als Teil der entwickelten Systematik zielt auf die Bereitstellung einer Modellsprache zur Beschreibung AR-basierter Validierungsumgebungen und damit eines spezifischen Teils des Validierungssystems ab.

Den modelltheoretischen und methodischen Rahmen für die Systematik bilden die im Stand der Forschung eingeführten Inhalte der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Inhalte der KaSPro auf den Kontext der AR-gestützten, kundenintegrierten Produktvalidierung übertragen lassen und dabei den zielgerichteten Einsatz der AR-Technologie unterstützen. Der Systematik liegt ein Verständnis der Produktentwicklung im Sinne des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers zugrunde. Weiterhin basieren zentrale Bestandteile der Systematik auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz, dem Produktprofil sowie dem Produktmodell zur Strukturierung der Produktspezifikation.

Die entwickelte Systematik wurde im Rahmen der Deskriptiven Studie II in drei unterschiedlichen Fallstudien angewandt und in Bezug auf ihre Anwendbarkeit und ihren Erfolgsbeitrag evaluiert. Den drei Fallstudien lagen unterschiedliche Entwicklungssituationen und Validierungsaufgaben zugrunde. Sie fanden im Rahmen von studentischen Produktentwicklungsprojekten sowie eines vom Autor dieser Arbeit begleiteten Industrieprojekts statt. In jedem der Entwicklungsprojekte wurden reale Entwicklungsaufgaben aus der industriellen Entwicklungspraxis der jeweils beteiligten Unternehmen bearbeitet und dabei der gesamte Referenzprozess zur AR-gestützten Validierung durchlaufen. In den drei Fallstudien konnte gezeigt werden, dass ein methodisches Vorgehen die Nutzung der unterschiedlichen Potenziale aus der Anwendung der AR-Technologie zur Validierung interaktiver Produkte in der

Frühen Phase ermöglicht. Dies gilt insbesondere für die Reduktion der für die Frühe Phase charakteristischen marktlichen Unsicherheit. Damit konnte die dieser Arbeit zugrundeliegende Forschungshypothese für die drei Fallstudien bestätigt werden.

Zumal in allen Fallstudien reale Entwicklungsaufgaben aus der industriellen Entwicklungspraxis unter praxisnahen Bedingungen bearbeitet wurden, kann die Übertragbarkeit der Evaluationsergebnisse und damit deren externe Validität mit Einschränkungen angenommen werden. Die Einschränkungen der Übertragbarkeit auf die Entwicklungspraxis ergeben sich aus den teils idealisierten Bedingungen für die Anwendung der Systematik in den Fallstudien.

8.2 Ausblick

Die Ergebnisse und Erkenntnisse der vorliegenden Forschungsarbeit bieten Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsarbeiten. Dabei lassen sich nach ihrem Bezug zur entwickelten Systematik solche Forschungsarbeiten unterscheiden, die den direkten Transfer der Forschungsergebnisse, die Weiterentwicklung der Systematik oder weiterführende Arbeiten im Kontext des betrachteten Forschungsgegenstands betreffen (vgl. Abbildung 8.1).

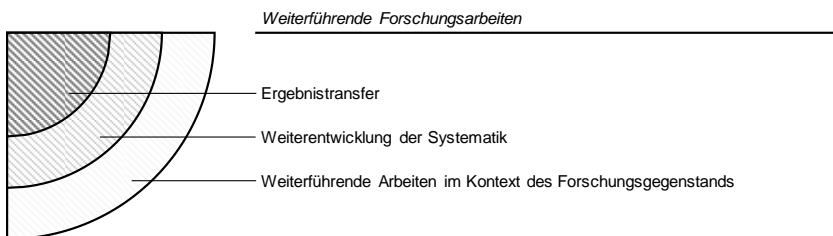


Abbildung 8.1: Unterscheidung weiterführender Forschungsarbeiten nach ihrem Bezug zur entwickelten Systematik

Ergebnistransfer

Die beschriebene Systematik als zentralem Ergebnis dieser Forschungsarbeit wurde grundsätzlich ohne einen Fokus auf bestimmte Branchen entwickelt. Auch den drei deskriptiven Fallstudien zur Anwendung und Evaluation der Systematik im Rahmen der Deskriptiven Studie II lagen unterschiedliche Entwicklungssituationen

und Validierungsaufgaben aus verschiedenen Branchen zugrunde. Dennoch kann kein uneingeschränkter Anspruch auf die Repräsentativität der dort gewonnenen Evaluationsergebnisse erhoben werden, zumal die Fallstudien unter teils idealisierten Bedingungen durchgeführt wurden. Um die Generalisierbarkeit der Evaluationsergebnisse zu verbessern und weitere Potenziale für die Weiterentwicklung der Systematik zu identifizieren, sollte die Übertragbarkeit der Systematik auf andere Anwendungsfälle in weiteren Studien überprüft werden.

Bei der Auswahl geeigneter weiterführender Fallstudien sind branchenunabhängig gewisse Anforderungen an die Rahmenbedingungen zu stellen, die die Anwendbarkeit der Systematik beschränken. So ist die Anwendung der AR-Technologie im Kontext der Präferenzmessung mit direkter Kundenintegration auf interaktive Produkte beschränkt, die in direkter Interaktion mit einem menschlichen Anwender stehen. Dieselbe Einschränkung gilt auch für den Anwendungsbereich der entwickelten Systematik. Die Validierung von Produkten, die ausschließlich mit anderen technischen Produkten interagieren, stellt folglich keinen geeigneten Anwendungsfall der Systematik dar.

Weiterentwicklung der Systematik

Aus den Erkenntnissen der Deskriptiven Studie II ergeben sich Ansatzpunkte für die Verbesserung und Weiterentwicklung der entwickelten Systematik. Ein solcher Ansatzpunkt besteht in der Entwicklung einer durchgängigen Toolunterstützung für die Prozessschritte der einzelnen Phasen des Referenzprozesses. Auf diese Weise ließe sich ein selbstständiger und standortübergreifender Einsatz der Systematik durch Produktentwickler und Produktentwicklungsteams ermöglichen. Zudem ließen sich Automatisierungspotenziale etwa beim Abgleich von Anforderungs- und Referenzprofil im Rahmen der Konfiguration der AR-basierten Validierungsumgebung nutzen. Voraussetzung dafür wäre zudem die empirische Erhebung einer Reihe von Referenzprofilen für eine repräsentative Auswahl AR-basierter Referenzprototypen, um diese in einem entsprechenden Softwaretool zu hinterlegen.

Einen weiteren Anknüpfungspunkt für weiterführende Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung der Systematik folgt aus dem in Fallstudie C identifizierten Potenzial der dezentralen Testdurchführung in AR-basierten Validierungsumgebungen. Die eigenverantwortliche Testdurchführung durch die Testpersonen an einem selbst gewählten Ort und zu einem selbstgewählten Zeitpunkt erleichtert demnach den direkten Zugang zu geeigneten Testpersonen. Zudem erlaubt sie es die Anzahl der involvierten Testpersonen mit geringem Aufwand zu skalieren und so die Aussagekraft der Validierungsergebnisse zu erhöhen. Die Fallstudie hat gezeigt, dass mit einer dezentralen Testdurchführung bestimmte Anforderungen an die Kon-

figuration der AR-basierten Validierungsumgebung einhergehen, zumal die Verfügbarkeit spezieller physischer Teilsystemmodelle zur Laufzeit der AR-Applikation während der Testdurchführung nicht vorausgesetzt werden kann. Die Vorteile einer dezentralen Testdurchführung sind daher mit den Anforderungen an die Wiedergabebetreue des AR-Prototyps abzuwägen. Diese Abwägungsentscheidung bietet das Potenzial für weitere methodische Unterstützung durch eine entsprechend erweiterte Systematik.

Neben der dezentralen Testdurchführung in zeit- und ortsversetzt existierenden Instanzen derselben Validierungsumgebung bieten zudem standortverteilte AR-basierte Validierungsumgebungen einen Anknüpfungspunkt für weiterführende Forschungsarbeiten. Standortverteilte Validierungsumgebungen erlauben es durch die Vernetzung verschiedener Teile der Validierungsumgebung die Standortrestriktionen durch ortsgebundene physische Teilsystemmodelle zu umgehen. Dies konnte etwa bereits mit dem Aufbau des standortverteilten Labornetzwerks XiL-BW-e gezeigt werden (Albers, Dietmayer et al., 2017). Der Einsatz von AR-Systemen als Koppelsysteme in standortverteilten Validierungsumgebungen könnte etwa dazu dienen, virtuelle Instanzen ortsfremder physischer Teilsystemmodelle in Echtzeit in die Validierungsumgebung einzubinden. Ein solches Vorgehen könnte einen Beitrag zu einem realistischeren Systemverhalten des AR-Prototyps leisten, zumal dieses nicht auf vordefinierten Systemreaktionen, sondern auf in Echtzeit erfassten und übertragenen Sensordaten des physischen Teilsystemmodells beruhen würde. Die Berücksichtigung standortverteilter AR-basierter Validierungsumgebungen bietet damit einen weiteren Ansatzpunkt für die Weiterentwicklung der Systematik.

Während standortverteilte Entwicklungsaktivitäten angesichts zunehmend global aufgestellter Unternehmen in der Entwicklungspraxis an Bedeutung gewinnen, zeigen erste Studien, dass nicht alle Entwicklungsaktivitäten gleichermaßen zur standortverteilten Durchführung geeignet sind (Dühr, Hirsch, Albers & Bursac, 2020). Die Grenzen der standortverteilten Anwendung einer entsprechend erweiterten Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in AR-Umgebungen sollte vor diesem Hintergrund ebenso Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

Weiterführende Arbeiten im Kontext des Forschungsgegenstands

Neben dem Einsatz bei Kundentests zur Präferenzmessung, auf den die in dieser Arbeit entwickelte Systematik fokussiert, existieren weitere Anwendungsbereiche der AR-Technologie in der Produktentwicklung. Ihre Erforschung und methodische Unterstützung bietet Ansatzpunkte für weiterführende Arbeiten im Kontext des Forschungsgegenstands dieser Arbeit. Zu den Anwendungsbereichen der AR-Technologie in der Produktentwicklung außerhalb der Produktvalidierung zählt die Unterstützung der Kreation. Denkbar ist dabei zum Beispiel eine Gestaltsynthese durch

Kombination und Modifikation realer und virtueller Objekte in AR-Szenen als Alternative oder Ergänzung zur etablierten CAD-basierten Konstruktion in der Produktentwicklung. Auch der Einsatz AR-gestützter Kreativitätsmethoden zählt zu den möglichen Anwendungen der AR-Technik im Rahmen der Kreation mit entsprechendem Potenzial für eine methodische Unterstützung.

Weitere Anknüpfungspunkte für Forschungsarbeiten zur Anwendung der AR-Technologie in der Produktentwicklung bietet die Erforschung der sich daraus ergebenden Implikationen auf etablierte Prozesse, Organisationsstrukturen und Ressourcen in der Produktentwicklung. Erste Ergebnisse dazu wurden bereits im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Etri & Sänger (2020)¹ am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erzielt, die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurde.

Zu den zu untersuchenden Implikationen zählt die Anforderung an die Verfügbarkeit entsprechender Hardware- und Softwareressourcen für den Aufbau AR-basierter Validierungsumgebungen sowie die Integration dieser Ressourcen und der damit generierten zusätzlichen digitalen Produktdaten in die vorhandene Softwareinfrastruktur, insbesondere in die verwendeten CAD- und PDM-Systeme. In diesem Zusammenhang besteht zudem Bedarf für die Entwicklung einer informationstechnischen Schnittstelle zwischen parametrischen CAD-Modellen und tessellierten Polygonnetz-Modellen, die deren wechselseitige Verknüpfung und den kontinuierlichen Abgleich der in beiden Modellen enthaltenen Produktinformationen ermöglicht.

Die im Rahmen der Deskriptiven Studie II durchgeführten Fallstudien haben zudem gezeigt, dass mit dem Aufbau von AR-Szenen besondere Anforderungen an die Kompetenzen der beteiligten Personen verbunden sind, die nicht zwingend vom Kompetenzprofil eines Konstrukteurs oder Produktentwicklers abgedeckt sind. Vielmehr sind Kompetenzen aus dem Bereich der Informationstechnik erforderlich, die je nach Unternehmensstruktur potenziell in Organisationseinheiten außerhalb der Entwicklungsorganisation verortet oder noch gar nicht vorhanden sind. Daraus ergeben sich Implikationen für die abteilungsübergreifende Zusammenarbeit bis hin zur Notwendigkeit einer Neuausrichtung der Organisationsstruktur oder der Personalgewinnungsstrategie, die sich zukünftig näher erforschen ließen. Auch folgt daraus der Bedarf, relevante Anwendungen der AR-Technologie künftig verstärkt in der Ingenieurausbildung zu berücksichtigen, um entsprechende Kompetenzen zu vermitteln. Am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Tech-

¹ Unveröffentlichte Masterarbeit

nologie (KIT) erfolgt dies unter anderem bereits durch die Digitalisierung einer bestehenden Sammlung von Maschinenelementen in Form einer AR-Applikation sowie mit der Öffnung des IPEK XR-Labs für Studierende.

Darüber hinaus bietet die Erforschung der operativen Implikationen einer Anwendung der AR-Technologie auf den Prozess und die Aktivitäten der Produktentwicklung weiteres Potenzial. Die durchgeführten Fallstudien haben gezeigt, dass die frühe Verfügbarkeit virtueller Stimuli einen vorgezogenen Erkenntnisgewinn und damit eine Verlagerung von Entwicklungsentscheidungen in die Frühe Phase ermöglicht. Um dieses Potenzial zu nutzen, muss jedoch neben der Verfügbarkeit der zum Aufbau virtueller Produktmodelle benötigten Informationen eine entsprechende Entscheidungsfähigkeit in der Frühen Phase gegeben sein. Die geänderten Anforderungen an die Informationsverfügbarkeit und die Entscheidungsfähigkeit in der Frühen Phase müssen entsprechend im Produktentwicklungsprozess abgebildet werden. Einen Beitrag dazu kann etwa die Einführung agiler Entwicklungsansätze leisten. Die Erforschung des Einsatzes der AR-Technologie im Kontext agiler Entwicklungsprozesse bietet einen weiteren Ansatzpunkt für weiterführende Arbeiten im Kontext des Forschungsgegenstands dieser Arbeit. Erste Erkenntnisse zum Einsatz der AR-Technologie zur kundenintegrierten Validierung in agilen Entwicklungsprozessen wurden bereits in einem Forschungsprojekt am IPEK – Institut für Produktentwicklung im Zusammenhang mit der Entwicklung des ASD – Agile Systems Design Ansatzes gesammelt (Albers, Hirschter et al., 2019; Reinemann, Hirschter, Fahl, Hünemeyer & Albers, 2019). Weitere Erkenntnisse wurden zudem bereits im Zuge der Anwendung der entwickelten Systematik im agilen Entwicklungsprozess eines Start-Up-Unternehmens am Beispiel der Entwicklung eines Mahlzeitscanners gesammelt, die im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Kothiya (2020)² am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erfolgte, die vom Autor dieser Arbeit Co-betreut wurde.

Weiteres Potenzial besteht in der Erforschung des Einsatzes spezieller Koppelsysteme zur Simulation haptischer Sinnesreize in AR-basierten Validierungsumgebungen. Heutige konventionelle AR-Systeme bleiben in ihrem Funktionsumfang in der Regel auf die Simulation visueller und auditiver Reize beschränkt. Haptische Sinnesreize werden in AR-basierten Validierungsumgebungen, wie in dieser Arbeit geschildert, durch die gezielte Kombination virtueller Modelle mit physischen Prototypen oder Referenzprodukten erzeugt. Durch den Einsatz haptischer Feedbacksysteme wie Force-Feedback-Systemen oder berührungssensitiven Robotern lassen sich hingegen auch haptische Stimuli simulativ abbilden. Produkteigenschaften wie etwa Gewicht, Trägheit oder Vibrationen werden auf diese Weise

² Unveröffentlichte Masterarbeit

für die Validierung zugänglich, ohne dass hierfür der Einsatz physischer Produktmodelle erforderlich wäre. Die Erforschung des gemeinsamen Einsatzes der VR- / AR-Technologie und Ansätzen der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) in einer Validierungsumgebung für handgehaltene Geräte ist Gegenstand des unter Beteiligung des IPEK – Institut für Produktentwicklung beantragten Forschungsprojekts *KIT Research and Innovation Lab for Human Machine Systems*.

Literaturverzeichnis

- Agarwal, M. K. & Green, P. E. (1991). Adaptive conjoint analysis versus self-explicated models. Some empirical results. *International Journal of Research in Marketing*, 8 (2), 141–146. doi:10.1016/0167-8116(91)90021-X
- Akcali, B. Y. & Sismanoglu, E. (2015). Innovation and the Effect of Research and Development (R&D) Expenditure on Growth in Some Developing and Developed Countries. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 768–775. doi:10.1016/j.sbspro.2015.06.474
- Albers, A. (1991). Das Zweimassenschwungrad der dritten Generation zur Optimierung der Komforteigenschaften von PKW-Antriebssträngen. In *Beiträge zum Antriebstechnischen Kolloquium* (S. 245–268). Aachen.
- Albers, A. (1994). Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. *VDI Berichte* (1120), 73–106.
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE)* (S. 343–356). Ancona, Italien.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Carl Hanser.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S., Reiß, N. & Bursac, N. (2017). Agile product engineering through continuous validation in PGE. *Product Generation Engineering*. *Design Science*, 3 (5), 19. doi:10.1017/dsj.2017.5
- Albers, A. & Braun, A. (2011a). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 15 (1/2/3), 6. doi:10.1504/IJPD.2011.043659
- Albers, A. & Braun, A. (2011b). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 3–30). München: Hanser.

- Albers, A., Braun, A. & Muschik, S. (2010). Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes. In P. J. Clarkson, P. Heisig & S. Vajna (Hrsg.), *Modelling and Management of Engineering Processes* (S. 15–26). London: Springer. doi:10.1007/978-1-84996-199-8_2
- Albers, A., Burkardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 1–12). Melbourne, Australien.
- Albers, A., Bursac, N., Heimicke, J., Walter, B. & Reiß, N. (2017). 20 years of co-creation using case based learning. An integrated approach for teaching innovation and research in Product Generation Engineering. In *Proceedings of the 20th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)* (S. 1014–1025). Budapest, Ungarn.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81 (1), 13–31. doi:10.1007/s10010-016-0210-0
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung. Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In *Beiträge zum 3. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)* (S. 1–10). Stuttgart.
- Albers, A., Dietmayer, K., Bargende, M., Behrendt, M., Yan, S., Buchholz, M., Zaiser, S., Rößler, A. et al. (2017). XiL-BW-e. Laboratory Network Baden-Württemberg for Electric Mobility. In *Proceedings of the 30th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition* (S. 1–12). Stuttgart.
- Albers, A., Dumitrescu, R., Marthaler, F., Albers, A., Kühfuss, D., Strauch, M., Siebe, A. & Bursac, N. (2018). PGE – Produktgenerationsentwicklung und Zukunftsvorausschau. Eine systematische Betrachtung zur Ermittlung der Zusammenhänge. In *Beiträge zum 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung (SVT)* (S. 27–51). Berlin.
- Albers, A. & Düser, T. (2008, 24. September). *Integrierte Validierungsumgebung für energieeffiziente Fahrerassistenzsysteme am Rollenprüfstand*. Konferenzvortrag. IPG Technology Conference, Ettlingen. doi:10.5445/IR/1000011736

- Albers, A. & Düser, T. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In *Proceedings of the 33rd FISITA World Automotive Congress* (S. 1–10). Budapest, Ungarn.
- Albers, A. & Düser, T. (2011). Validierung im Produktentstehungsprozess. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 133–141). München: Hanser.
- Albers, A., Ebel, B. & Lohmeyer, Q. (2012). Systems of objectives in complex product development. In *Proceedings of TMCE 2012* (S. 267–278). Karlsruhe.
- Albers, A., Fischer, J., Klingler, S. & Behrendt, M. (2014, 27.-28. Mai). *Durchgängige Validierung und Verifizierung am Beispiel der akustischen Eigenschaften eines Elektrofahrzeugs*. Konferenzvortrag. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug (GSVF), Graz, Österreich.
- Albers, A. & Gausemeier, J. (2012). Von der fachdisziplinenorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung. In R. Anderl, M. Eigner, U. Sandler & R. Stark (Hrsg.), *Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung* (S. 17–29). Heidelberg: Springer.
doi:10.1007/978-3-642-29372-6_3
- Albers, A., Haug, F., Heitger, N., Arslan, M., Rapp, S. & Bursac, N. (2016). Produktgenerationsentwicklung. Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automobilen Produktentwicklung. In *Beiträge zum 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung (SVT)* (S. 1–15). Berlin.
- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T., Richter, T., Reiß, N., Maier, A. & Bursac, N. (2018). Managing Systems of Objectives in the agile Development of Mechatronic Systems by ASD - Agile Systems Design. In *Proceedings of the 2018 NordDesign Conference* (S. 1–11). Linköping, Schweden.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Degner, N. & Dühr, K. (2019). The Product Developer in the Centre of Product Development. A Systematic Literature Review on Describing Factors. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 1843–1852). Delft, Niederlande.
doi:10.1017/dsi.2019.190

- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiß, N., Breitschuh, J., Richter, T., Bursac, N. & Marthaler, F. (2019). *Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD - Agile Systems Design* (KIT Scientific Working Papers Nr. 113). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). doi:10.5445/IR/1000091847
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiß, N., Heitger, N., Ott, S. & Bursac, N. (2018). Product Profiles. Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In *Proceedings of the 28th CIRP Design Conference* (S. 253–258). Nantes, Frankreich.
- Albers, A., Heitger, N., Haug, F., Fahl, J., Hirschter, T. & Bursac, N. (2018). Supporting Potential Innovation in the Early Phase of PGE – Product Generation Engineering. Structuring the Development of the Initial System of Objectives. In *Proceedings of the 2018 R&D Management Conference* (S. 1–13). Mailand, Italien.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Reinemann, J., Spadinger, M., Hünemeyer, S. & Heimicke, J. (2019). Identification of Indicators for the Selection of Agile, Sequential and Hybrid Approaches in Product Development. In *Proceedings of the 29th CIRP Design Conference* (S. 838–847). Póvoa de Varzim, Portugal. doi:10.1016/j.procir.2019.04.229
- Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. In *Proceedings of the 13th International Design Conference (DESIGN)* (S. 81–90). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A. & Lohmeyer, Q. (2012). Advanced Systems Engineering. Towards a Model-Based and Human-Centered Methodology. In *Proceedings of TMCE 2012* (S. 407–416). Karlsruhe.
- Albers, A., Lohmeyer, Q. & Ebel, B. (2011). Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 256–265). Kopenhagen, Dänemark.
- Albers, A., Mandel, C., Yan, S. & Behrendt, M. (2018). System of Systems Approach for the Description and Characterization of Validation Environments. In *Proceedings of the 15th International Design Conference (DESIGN)* (S. 2799–2810). Dubrovnik, Kroatien.

- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M., Holzer, H., Bohne, W. & Ars, H. (2014). Darstellung und Bewertung von Hybridantrieben mit einem Hybrid-Erlebnis-Prototypen. In *VPC.plus 2014. Beiträge zur 16. MTZ-Fachtagung* (S. 207–223). Hahnau.
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung. Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *VDI Konstruktion* (6), 74–81.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme. *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung*, 54 (7/8), 55–60.
- Albers, A., Muschik, S. & Ebel, B. (2010). Einflüsse auf Entscheidungsprozesse in frühen Aktivitäten der Produktentstehung. In *Beiträge zum 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung (SVT)* (S. 276–282). Berlin.
- Albers, A., Pinner, T., Yan, S., Hettel, R. & Behrendt, M. (2016). Koppelsystems. Obligatory Elements within Validation Setups. In *Proceedings of the 14th International Design Conference (DESIGN)* (S. 109–118). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017). Die „Frühe Phase“ der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In *Beiträge zum 4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)* (S. 1–10). Stuttgart.
- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschler, T., Revfi, S., Schulz, M., Stürmlinger, T. & Spadinger, M. (2020). Proposing a generalized description of variations in different types of systems by the model of PGE - Product Generation Engineering. In *Proceedings of the 16th International Design Conference (DESIGN)* (S. 2235–2244). Cavtat, Kroatien. doi:10.1017/dsd.2020.315
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. et al. (2019). The Reference System in the Model of PGE. Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 1693–1702). Delft, Niederlande. doi:10.1017/dsi.2019.175
- Albers, A., Reinemann, J., Fahl, J. & Hirschler, T. (2019). Augmented Reality for Product Validation. Supporting the Configuration of AR-Based Validation Environments. In *Proceedings of 21st HCI International Conference. Part II* (S. 429–448). Orlando, FL, USA.

- Albers, A., Reinemann, J., Hirschter, T., Fahl, J. & Heitger, N. (2019). Validation-Driven Design in the Early Phase of Product Development. In *Proceedings of the 29th CIRP Design Conference* (S. 630–637). Póvoa de Varzim, Portugal. doi:10.1016/j.procir.2019.04.211
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In *Proceedings of the 2016 NordDesign Conference* (S. 411–420). Trondheim, Norwegen.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. In *Proceedings of the 26th CIRP Design Conference* (S. 100–105). Stockholm, Schweden. doi:10.1016/j.procir.2016.04.168
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Urbanec, J. & Lüdcke, R. (2014). Situation-appropriate method selection in product development process. Empirical study of method application. In *Proceedings of the 2014 NordDesign Conference* (S. 550–559). Espoo, Finnland. doi:10.13140/2.1.3924.8164
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2018). Extended Target Weighing Approach. Estimation of Technological Uncertainties of Concept Ideas in Product Development Processes. In *Proceedings of the 2nd CO2 Reduction for Transportation Systems Conference* (S. 367–376). Turin, Italien. doi:10.4271/2018-37-0028
- Albers, A., Walter, B., Wilmsen, M. & Bursac, N. (2018). Live-Labs as Real-World Validation Environments for Design Methods. In *Proceedings of the 15th International Design Conference (DESIGN)* (S. 13–24). Dubrovnik, Kroatien. doi:10.21278/idc.2018.0303
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C²-A). Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An anthology of theories and models of design. Philosophy, approaches and empirical explorations* (S. 151–171). London: Springer.
- Albrecht, J. (2000). *Präferenzstrukturmessung. Ein empirischer Vergleich der Conjoint-Analyse mit einer kompositionellen Methode*. Dissertation. Universität Hohenheim, Hohenheim.
- Alink, T. (2010). *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 48). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Alt, T. (2003). *Augmented Reality in der Produktion*. München: Utz.
- Anderson, T. W. & Finn, J. D. (1996). *The New Statistical Analysis of Data*. New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4612-4000-6
- Andreasen, M. M. (1980). *Syntesemetoder på systemgrundlag. Bidrag til en konstruktionsteori*. Dissertation. Universität Lund, Lund.
- Apel, D. (2009). *Datenqualität erfolgreich steuern. Praxislösungen für Business-Intelligence-Projekte*. München: Hanser.
- Apple Inc. (2019). *ARKit. Understanding World Tracking*, Apple Inc. Zugriff am 30.10.2019. Verfügbar unter https://developer.apple.com/documentation/arkit/understanding_world_tracking
- Arnoscht, J. (2011). *Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- Ashby, W. R. (1974). *Einführung in die Kybernetik*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Atteslander, P. (2010). *Methoden der empirischen Sozialforschung (ESV basics, 13. Aufl.)*. Berlin: Erich Schmidt Verl.
- Auricht, M., Beckmann-Dobrev, B. & Stark, R. (2012). Frühzeitige multimodale Absicherung virtueller Prototypen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 107 (5), 327–331.
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6 (4), 355–385. doi:10.1162/pres.1997.6.4.355
- Backhaus, K., Erichson, B., Weiber, R. & Plinke, W. (2011). *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung* (13. Aufl.). Berlin: Springer.
- Bamodu, O. & Ye, X. M. (2013). Virtual Reality and Virtual Reality System Components. *Advanced Materials Research*, 765-767, 1169–1172. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.765-767.1169
- Bartholdt, M. (2018). *Kunden- und kostenorientierte Zuverlässigkeitszielermittlung*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Batra, D., Xia, W., VanderMeer, D. & Dutta, K. (2010). Balancing Agile and Structured Development Approaches to Successfully Manage Large Distributed Software Projects. A Case Study from the Cruise Line Industry. *Communications of the Association for Information Systems*, 27 (1), 21. doi:10.17705/1CAIS.02721
- Bauer, H. H., Hammerschmidt, M. & Stokburger, G. (2006). *Marketing Performance. Messen - Analysieren - Optimieren* (1. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-0664-9
- Bauer, M. (2000). *Kundenzufriedenheit in industriellen Geschäftsbeziehungen. Kritische Ereignisse, nichtlineare Zufriedenheitsbildung und Zufriedenheitsdynamik*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverl. doi:10.1007/978-3-322-81380-0
- Beer, S. (1962). *Kybernetik und Management*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Beer, S. (1979). *The heart of enterprise* (The managerial cybernetics of organization). Chichester: Wiley.
- Bender, B. (2004). *Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung*. Dissertation. TU Berlin, Berlin.
- Bergbauer, A. K. & Grunwald, B. (1999). *Die Unternehmensqualität messen – den europäischen Qualitätspreis gewinnen. E.F.Q.M. – Selbstbewertung in der Praxis* (Kontakt & Studium, Bd. 572, 2. Aufl.). Renningen-Malmsheim: expert.
- Bertalanffy, L. von. (1949). General System Theory. *Biologia Generalis*, 19 (1), 114–129.
- Bertalanffy, L. von. (1968). *General System Theory. Foundations, development, applications*. New York: Braziller.
- Birkhofer, H. & Jänsch, J. (2003). Interaction between individuals. Summary of Discussion. In U. Lindemann (Hrsg.), *Human Behaviour in Design* (S. 195–202). Berlin: Springer.
- Birkhofer, H. & Wäldele, M. (2009). The Concept of Product Properties and its Value for Research and Practice in Design. In *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 227–238). Palo Alto, CA, USA.

- Blees, C. (2011). *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. Dissertation. TU Hamburg, Hamburg.
- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer. doi:10.1007/978-1-84882-587-1
- Bliss, C. (2000). *Management von Komplexität. Ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion* (Unternehmensführung und Marketing, Bd. 35). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Böcker, F. & Helm, R. (2003). *Marketing* (Grundwissen der Ökonomik, Bd. 919, 7. Aufl.). Stuttgart: Lucius & Lucius.
- Bordegoni, M. (2011). Exploitation of Designers and Customers' Skills and Creativity in Product Design and Engineering. In S. Fukuda (Ed.), *Emotional Engineering. Service Development* (vol. 20, pp. 63–85). London: Springer. doi:10.1007/978-1-84996-423-4_4
- Bordegoni, M., Cugini, U., Caruso, G. & Polistina, S. (2009). Mixed prototyping for product assessment. A reference framework. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 3 (3), 177–187. doi:10.1007/s12008-009-0073-9
- Bossel, H. (2004). *Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt: Books on Demand.
- Braun, A. (2014). *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung. Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 72). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Breitschuh, J., Albers, A., Seyb, P., Hohler, S., Benz, J., Reiß, N. & Bursac, N. (2018). Scaling agile practices on different time scopes for complex problem solving. In *Proceedings of the 2018 NordDesign Conference*. Linköping, Schweden.
- Breunig, S. (2017). *Produktarchitekturgestaltung mechatronischer Baukastensysteme*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- Broh, R. A. (1982). *Managing quality for higher profits*. New York: McGraw-Hill.

- Broll, W. (2013). Augmentierte Realität. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (S. 241–294). Berlin Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-28903-3_8
- Broll, W. (2019). Augmentierte Realität. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (2. Aufl., S. 315–356). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-58861-1_8
- Broll, W., Weidner, F., Schwandt, T., Weber, K. & Dörner, R. (2019). Authoring von VR/AR-Anwendungen. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (2. Aufl., S. 393–423). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-58861-1_10
- Burdea, G. & Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology*. Hoboken: Wiley.
- Bursac, N. (2016). *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 93). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Camburn, B. A., Dunlap, B. U., Kuhr, R., Viswanathan, V. K., Linsey, J. S., Jensen, D. D., Crawford, R. H., Otto, K. et al. (2013). Methods for prototyping strategies in conceptual phases of design. Framework and experimental assessment. In *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (I-DETC-CIE)* (S. 1–10). Portland, OR, USA. doi:10.1115/DETC2013-13072
- Caudell, T. P. & Mizell, D. W. (1992). Augmented reality: an application of head-up display technology to manual manufacturing processes. In *Proceedings of the 25th Hawaii International Conference on System Sciences* (659-669). Kauai, HI, USA. doi:10.1109/HICSS.1992.183317
- Christie, E. J., Jensen, D. D., Buckley, R. T., Menefee, D. A., Ziegler, K. K., Wood, K. L. & Crawford, R. H. (2012). Prototyping strategies. Literature review and identification of critical variables. In *Proceedings of the 119th ASEE Annual Conference and Exposition* (25.1091.1-25.1091.22). San Antonio, TX, USA.
- Clark, K. B. & Fujimoto, T. (1991). *Product development performance. Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston: HBS Press.

- Conforto, E. C., Salum, F., Amaral, D. C., da Silva, S. L. & Almeida, L. F. M. de. (2014). Can Agile Project Management be Adopted by Industries Other than Software Development? *Project Management Journal*, 45 (3), 21–34. doi:10.1002/pmj.21410
- Cooper, R. G. (1994). Third-Generation New Product Processes. *Journal of Product Innovation Management*, 11 (1), 3–14. doi:10.1111/1540-5885.1110003
- Cooper, R. G. & Kleinschmidt, E. J. (1993). Screening new products for potential winners. *Long Range Planning*, 26 (6), 74–81. doi:10.1016/0024-6301(93)90208-W
- Daenzer, W. F. & Huber, F. (1994). *Systems Engineering. Methodik und Praxis* (8. Aufl.). Zürich: Verl. Industrielle Organisation.
- Day, G. S. (1990). *Market driven strategy. Processes for creating value*. New York: Free Press.
- Diefenbach, S., Chien, W.-C., Lenz, E. & Hassenzahl, M. (2013). Prototypen auf dem Prüfstand. Bedeutsamkeit der Repräsentationsform im Rahmen der Konzeptevaluation. *i-com*, 12 (1), 53–63. doi:10.1524/icom.2013.0008
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1987). DIN-Fachbericht 12. *Einteilungsschema für technische Systeme*. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2002). DIN 199-1. *Technische Produktdokumentation*. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2011). DIN EN ISO 9241-210. *Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2013). DIN 2330. *Begriffe und Benennungen. Allgemeine Grundsätze*. Berlin: Beuth.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2015). DIN EN ISO 9000. *Qualitätsmanagementsysteme. Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth.
- Dinno, A. (2015). Nonparametric Pairwise Multiple Comparisons in Independent Groups using Dunn's Test. *The Stata Journal: Promoting communications on statistics and Stata*, 15 (1), 292–300. doi:10.1177/1536867X1501500117

- Disselkamp, M. (2012). *Innovationsmanagement. Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen* (2. Aufl.). Wiesbaden: Springer. doi:10.1007/978-3-8349-4472-6
- Dix, A. (2004). *Human-computer interaction* (3rd ed.). Harlow: Pearson Prentice-Hall.
- Dodge, Y. (2008). *The concise encyclopedia of statistics* (Springer reference). New York: Springer.
- Dörner, R., Broll, W., Jung, B. & Göbel, M. (2019). Einführung in Virtual und Augmented Reality. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (2. Aufl., S. 1–42). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-58861-1_1
- Dörner, R. & Steinicke, F. (2019). Wahrnehmungsaspekte von VR. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (2. Aufl., S. 43–78). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-58861-1_2
- Dühr, K., Hirsch, M., Albers, A. & Bursac, N. (2020). A methodology to identify and address improvement potentials in communication processes of distributed product development. An initial approach. In *Proceedings of the 16th International Design Conference (DESIGN)* (S. 541–550). Cavtat, Kroatien. doi:10.1017/dsd.2020.35
- Düser, T. (2010). *X-in-the-Loop. Ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 47). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Earl, C., Johnson, J. & Eckert, C. M. (2005). Complexity. In J. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design process improvement* (S. 174–197). London: Springer. doi:10.1007/978-1-84628-061-0_8
- Ebel, B. (2015). *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 85). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Eckert, C., Alink, T., Ruckpaul, A. & Albers, A. (2011). Different notions of function: results from an experiment on the analysis of an existing product. *Journal of Engineering Design*, 22 (11-12), 811–837. doi:10.1080/09544828.2011.603297

- Eckert, C. M., Alink, T. & Albers, A. (2010). Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction. In *Proceedings of the 11th International Design Conference (DESIGN)* (S. 673–682). Dubrovnik, Kroatien.
- Eckert, J. & Schaaf, R. (2009). Verfahren zur Präferenzmessung. Eine Übersicht und Beurteilung existierender und möglicher neuer Self-Explicated-Verfahren. *Journal für Betriebswirtschaft*, 59 (1), 31–56. doi:10.1007/s11301-009-0046-x
- Eggert, J. (2010). Modellierung mechanischer Systeme und ihrer Dynamik. In G. Bandow & H. H. Holzmüller (Hrsg.), „Das ist gar kein Modell!“. *Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften* (Gabler Research, 1. Aufl., S. 55–79). Wiesbaden: Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-8484-5_3
- Ehrlenspiel, K. (2009). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (4. Aufl.). München: Hanser.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5. Aufl.). München: Hanser.
- Eigner, M. (2014). Überblick Disziplin-spezifische und -übergreifende Vorgehensmodelle. In M. Eigner, D. Roubanov & R. Zafirov (Hrsg.), *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung* (Bd. 1, S. 15–52). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-662-43816-9_2
- Fäth, H. (1998). *Qualität und Qualitätskosten im Rahmen eines TQM-Konzepts. Analyse und Verbesserung der Qualitätskostenbetrachtung in einem Industriebetrieb*. Haar: VDD.
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Göpfert, J. & Tretow, G. (2013). Technische Systeme. In J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8. Aufl., S. 237–279). Berlin: Springer.
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Nagarajah, A., Pahl, G., Beitz, W. & Wartzack, S. (2013). Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8. Aufl., S. 291–409). Berlin: Springer.
- Firchau, N. L. (2003). *Variantenoptimierende Produktgestaltung*. Dissertation. TU Braunschweig, Braunschweig.

- Frank, U., Giese, H., Klein, F., Oberschelp, O., Schmidt, A., Schulz, B., Vöcking, H. & Witting, K. (2009). *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus. Definitionen und Konzepte* (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 234, 1. Aufl.). Paderborn: HNI.
- Franke, H.-J. & Firchau, N. L. (1998). *Zusammenfassender Zwischenbericht des Kalenderjahres 1998 für das BMBF-Projekt „Methoden und Werkzeuge der Kostenreduktion variantenreicher Produktspektren in der Einzel- und Kleinserienfertigung – EVAPRO“*. Braunschweig: Institut für Konstruktionslehre, Maschinen und Feinwerkelemente, TU Braunschweig.
- Freter, H. (2008). *Markt- und Kundensegmentierung. Kundenorientierte Markterfassung und -bearbeitung* (Kohlhammer Edition Marketing, 2. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer.
- Freudenmann, T. (2014). *Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel – Ansatz (C&C²-Ansatz)* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 78). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Friedman, M. (1937). The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32 (200), 675–701. doi:10.1080/01621459.1937.10503522
- Galbraith, J. (1973). *Designing complex organizations*. Boston: Addison-Wesley.
- Gängl-Ehrenwerth, C., Faullant, R. & Schwarz, E. J. (2013). Kundenintegration in den Neuproduktentwicklungsprozess. In D. E. Krause (Hrsg.), *Kreativität, Innovation, Entrepreneurship* (Bd. 11, S. 371–384). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-658-02551-9_19
- Gartner Inc. (2017). *Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017*, Gartner Inc. Zugriff am 21.10.2019. Verfügbar unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/>
- Gartner Inc. (2018). *5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018*, Gartner Inc. Zugriff am 21.10.2019. Verfügbar unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>

- Gartner Inc. (2019). *5 Trends Appear on the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2019*, Gartner Inc. Zugriff am 21.10.2019. Verfügbar unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>
- Gartzen, T. (2012). *Diskrete Migration als Anlaufstrategie für Montagesysteme*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- Garvin, D. A. (1984). What does Product Quality Really Mean? *Sloan Management Review*, 26 (1), 25–43.
- Gaubinger, K., Werani, T. & Rabl, M. (2009). *Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement. Grundlagen und Fallstudien aus B-to-B-Märkten*. Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-8780-8
- Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Echterfeld, J., Pfänder, T., Steffen, D. & Thielemann, F. (2018). *Innovationen für die Märkte von morgen. Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen*. München: Hanser. doi:10.3139/9783446429727
- Gausemeier, J., Radkowski, R., Oehlschlaeger, H. & Krebs, J. (2005). Development of a Mobile Augmented Reality Test Platform for the Analysis and Evaluation of Automotive Ergonomics. In *Proceedings of the 4th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (S. 1–12). Wien, Österreich.
- Gebhardt, A. (2003). *Rapid prototyping*. München: Hanser. doi:10.3139/9783446402690
- Geier, M., Jäger, S., Stier, C. & Albers, A. (2012). Combined real and virtual domain product validation using top-down strategies. In *Proceedings of the ASME 2012 Verification and Validation Symposium (V&V)* (S. 1–10). Las Vegas, NV, USA.
- Gierl, H. & Höser, H. (2002). Der Reihenfolgeeffekt auf Präferenzen. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 54 (1), 3–18. doi:10.1007/BF03372672
- Gloger, B. (2016). *Scrum. Produkte zuverlässig und schnell entwickeln* (5. Aufl.). München: Hanser.

- Google LLC. (2019). *ARCore. Fundamental Concepts*, Google LLC. Zugriff am 30.10.2019. Verfügbar unter <https://developers.google.com/ar/discover/concepts>
- Göpfert, J. (1998). *Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Dissertation. LMU München, München.
- Gottschalk, S. F. (2006). *Dedicated Flexibility*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- Grabowski, H. & Geiger, K. (1997). *Neue Wege zur Produktentwicklung* (Raabe-Innovationen). Stuttgart: Raabe.
- Green, P. E., Krieger, A. M. & Agarwal, M. K. (1993). A cross validation test of four models for quantifying multiattribute preferences. *Marketing Letters*, 4 (4), 369–380. doi:10.1007/BF00994355
- Gregory, P., Barroca, L., Taylor, K., Salah, D. & Sharp, H. (2015). Agile Challenges in Practice: A Thematic Analysis. In C. Lassenius, T. Dingsøyr & M. Paasiivaara (Hrsg.), *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming* (Lecture Notes in Business Information Processing, Bd. 212, S. 64–80). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-18612-2_6
- Greiffenberg, S. (2003). Methodenbewertung mittels Quality Function Deployment. In *Beiträge zur Tagung Modellierung betrieblicher Informationssysteme (MoBI/S)* (S. 131–153). Bamberg.
- Grimm, P., Broll, W., Herold, R., Reiners, D. & Cruz-Neira, C. (2019). VR/AR-Ausgabegeräte. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (2. Aufl., S. 163–217). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-58861-1_5
- Gruner, K. E. & Homburg, C. (1999). Innovationserfolg durch Kundeneinbindung. Eine empirische Untersuchung. *Innovation und Investition*, 69 (1), 119–142.
- Gutiérrez Alonso, M. A., Vexo, F. & Thalmann, D. (2008). *Stepping into virtual reality*. New York: Springer.
- Haberfellner, R., Weck, O. L. de, Fricke, E. & Vössner, S. (2012). *Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung* (12. Aufl.). Zürich: Orell Füssli.

- Häder, M. (2019). *Empirische Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer. doi:10.1007/978-3-658-26986-9
- Hahs-Vaughn, D. L. & Lomax, R. G. (2020). *An introduction to statistical concepts* (4. Aufl.). New York: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Hales, C. & Gooch, S. (2004). *Managing Engineering Design* (2. Aufl.). New York: Springer. doi:10.1007/978-0-85729-394-7
- Halfmann, M. (2014). *Zielgruppen im Konsumentenmarketing. Segmentierungsansätze - Trends - Umsetzung*. Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-658-00625-9
- Hall, A. D. & Fagen, R. E. (1956). Definition of System. *General Systems: Yearbook of the Society for General Systems Research*, 1 (1), 18–28.
- Hassenzahl, M. (2006). Interaktive Produkte wahrnehmen, erleben, bewerten und gestalten. In M. Eibl, H. Reiterer, P. F. Stephan & F. Thissen (Hrsg.), *Knowledge Media Design. Theorie, Methodik, Praxis* (2. Aufl., S. 147–167). München: Oldenbourg. doi:10.1524/9783486593433.147
- Hassenzahl, M., Burmester, M. & Koller, F. (2003). AttrakDiff. Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In G. Szwillus & J. Ziegler (Hrsg.), *Mensch & Computer* (Berichte des German Chapter of the ACM, Bd. 57, S. 187–196). Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-322-80058-9_19
- Heimicke, J., Reiß, N., Albers, A., Walter, B., Breitschuh, J., Knoche, S. & Bursac, N. (2018). Agile Innovative Impulses in Product Generation Engineering. Creativity by Intentional Forgetting. In *Proceedings of the 5th International Conference on Design Creativity (ICDC)* (S. 183–190). Bath, UK.
- Heiser, P. (2018). *Meilensteine der qualitativen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer. doi:10.1007/978-3-658-18557-2
- Heismann, R. & Maul, L. (2012). Mit systematischem Innovationsmanagement zum Erfolg. In S. Ili (Hrsg.), *Innovation Excellence. Wie Unternehmen ihre Innovationsfähigkeit systematisch steigern* (S. 39–62). Düsseldorf: Symposium Publishing.

- Heiss, S. (2009). *Kundenwissen für Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie. Fallstudie und Modellentwicklung zum Wissen von und über Kunden*. Dissertation. Universität Augsburg, Augsburg.
- Heitger, N. (2019). *Methodische Unterstützung der initialen Zielsystembildung im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Automobilentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 120). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Helm, R. (2001). *Planung und Vermarktung von Innovationen. Die Präferenz von Konsumenten für verschiedene Innovationsumfänge unter Berücksichtigung des optimalen Simulationsniveaus und marktbezogener Einflussfaktoren* (Betriebswirtschaftliche Abhandlungen). Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Henderson, R. M. & Clark, K. B. (1990). Architectural Innovation. The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly*, 35 (1), 9–30. doi:10.2307/2393549
- Highsmith, J. (2010). *Agile project management. Creating innovative products* (The Agile software development series, 2nd ed.). Upper Saddle River: Addison-Wesley.
- Hirschter, T., Heitger, N., Haug, F., Fahl, J., Mandel, C., Marthaler, F., Walter, B. & Albers, A. (2018). Zukunftsorientierte PGE – Produktgenerationsentwicklung. Ein Ansatz zur systematischen Überführung von Szenarien in Produktprofile in der Frühen Phase der PGE. In *Beiträge zum 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung (SVT)* (S. 309–329). Berlin.
- Hollenberg, S. (2016). *Fragebögen*. Wiesbaden: Springer. doi:10.1007/978-3-658-12967-5
- Hölzing, J. A. (2008). *Die Kano-Theorie der Kundenzufriedenheitsmessung. Eine theoretische und empirische Überprüfung* (Gabler Edition Wissenschaft, 1. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-9864-4
- Homburg, C. (2017). *Marketingmanagement. Strategie - Instrumente - Umsetzung - Unternehmensführung* (6. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-658-13656-7
- Hubka, V. (1984). *Theorie Technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre* (2. Aufl.). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-662-10446-0

- IDG Research Services. (2019). *Studie Virtual Reality / Augmented Reality 2019*. Zugriff am 20.03.2020. Verfügbar unter <https://www.ptc.com/de/resources/augmented-reality/report/ar-vr-studie>
- Irlitti, A. & Itzstein, S. von. (2013). Validating constraint driven design techniques in spatial augmented reality. In *Proceedings of the 14th Australasian User Interface Conference (AUIC)* (S. 63–72). Adelaide, Australien.
- Israel, J. H., Bähr, B. & Exner, K. (2016). Perspectives on Future Prototyping. Results from an Expert Discussion. In C. Gengnagel, E. Nagy & R. Stark (Hrsg.), *Rethink! Prototyping* (S. 11–22). Cham: Springer.
- Jensen, L. S., Özkil, A. G. & Mortensen, N. H. (2016). Prototypes In Engineering Design. Definitions And Strategies. In *Proceedings of the 14th International Design Conference (DESIGN)* (S. 821–830). Dubrovnik, Kroatien.
- Jeschke, S., Jakobs, E.-M. & Dröge, A. (Hrsg.). (2013). *Exploring uncertainty. Ungewissheit und Unsicherheit im interdisziplinären Diskurs*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Jetter, A. (2005). *Produktplanung im Fuzzy Front End. Handlungsunterstützungssystem auf der Basis von Fuzzy Cognitive Maps*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- Johne, F. A. & Snelson, P. A. (1988). Success factors in product innovation. A selective review of the literature. *Journal of Product Innovation Management*, 5 (2), 114–128.
- Jung, B. & Vitzthum, A. (2019). Virtuelle Welten. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (2. Aufl., S. 79–115). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-58861-1_3
- Kano, N., Seraku, N., Takahashi, F. & Tsuji, S. (1984). Attractive Quality and Must-be Quality. *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, 14 (2), 147–156.
- Katičić, J. (2012). *Methodik für Erfassung und Bewertung von emotionalem Kundenfeedback für variantenreiche virtuelle Produkte in immersiver Umgebung*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Kerttula, M., Salmela, M. & Heikkinen, M. (1997). Virtual reality prototyping-a framework for the development of electronics and telecommunication products. In *Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Rapid System Prototyping* (S. 2–11). Chapel Hill, NC, USA. doi:10.1109/IWRSP.1997.618812
- Keuth, H. (1978). *Realität und Wahrheit. Zur Kritik des kritischen Rationalismus*. Tübingen: Mohr.
- Khurana, A. & Rosenthal, S. R. (1998). Towards Holistic “Front Ends” In New Product Development. *Journal of Product Innovation Management*, 15 (1), 57–74. doi:10.1111/1540-5885.1510057
- Kim, D. (2013). *The State of Scrum. Benchmark and Guidelines*. Zugriff am 30.08.2019. Verfügbar unter https://www.scrumalliance.org/ScrumRedesign-DEVSite/media/ScrumAllianceMedia/Files%20and%20PDFs/State%20of%20Scrum/2013-State-of-Scrum-Report_062713_final.pdf
- Kirchhof, R. (2003). *Ganzheitliches Komplexitätsmanagement. Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen*. Dissertation. TU Cottbus, Cottbus.
- Kirschner, R. J. (2011). *Methodische Offene Produktentwicklung*. Dissertation. TU München, München. Verfügbar unter <https://media-tum.ub.tum.de/doc/1094898/1094898.pdf>
- Klaus, G. (1961). *Kybernetik in philosophischer Sicht*. Berlin: Dietz.
- Klingler, S. (2016). *Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 101). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., Elkins, C., Herald, K. et al. (2001). Providing Clarity and A Common Language to the “Fuzzy Front End”. *Research-Technology Management*, 44 (2), 46–55. doi:10.1080/08956308.2001.11671418
- Kohler, K., Hochreuter, T., Diefenbach, S., Lenz, E. & Hassenzahl, M. (2013). Durch schnelles Scheitern zum Erfolg. Eine Frage des passenden Prototypen? In *Beiträge zur Usability Professionals Konferenz* (S. 78–84). Bremen.

- Kohn, A. (2014). *Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen, Dissertation*. Dissertation. TU München, München.
- Koller, R. (1998). *Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-80417-5
- Kotler, P. & Bliemel, F. (2001). *Marketing-Management. Analyse, Planung und Verwirklichung* (10. Aufl.). Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Krevelen, D. W. F. van & Poelman, R. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *The International Journal of Virtual Reality*, 9 (2), 1–20.
- Krieg, W. (1971). *Kybernetische Grundlagen der Unternehmensgestaltung*. Stuttgart: Haupt.
- Küppers, G. & Krohn, W. (1992). Selbstorganisation. Zum Stand einer Theorie in den Wissenschaften. In G. Küppers & W. Krohn (Hrsg.), *Emergenz. Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung* (2. Aufl., S. 7–26). Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Lancaster, K. J. (1966). A New Approach to Consumer Theory. *Journal of Political Economy*, 74 (2), 132–157.
- Larsson, P., Vastfjäll, D. & Kleiner, M. (2002). Better Presence and Performance in Virtual Environments by Improved Binaural Sound Rendering. In *Proceedings of the 22nd International Conference: Virtual, Synthetic, and Entertainment Audio* (S. 1–10). Espoo, Finland.
- Lim, Y.-K., Pangam, A., Periyasami, S. & Aneja, S. (2006). Comparative analysis of high- and low-fidelity prototypes for more valid usability evaluations of mobile devices. In *Proceedings of the 4th Nordic Conference on Human-Computer Interaction Changing Roles (NordiCHI)* (S. 291–300). Oslo, Norwegen. doi:10.1145/1182475.1182506
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (VDI-Buch, 3. Aufl.). Dordrecht: Springer.

- Lindemann, U. & Lorenz, M. (2008). Uncertainty handling in integrated product development. In *Proceedings of the 10th International Design Conference (DESIGN)* (S. 175–182). Dubrovnik, Kroatien.
- Link, P. (2014). Agile Methoden im Produkt-Lifecycle-Prozess – Mit agilen Methoden die Komplexität im Innovationsprozess handhaben. In K.-P. Schoeneberg (Hrsg.), *Komplexitätsmanagement in Unternehmen. Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern* (S. 65–92). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-658-01284-7_5
- Lohmeyer, Q. (2013). *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 59). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Luce, R. D. & Tukey, J. W. (1964). Simultaneous conjoint measurement. A new type of fundamental measurement. *Journal of Mathematical Psychology*, 1 (1), 1–27. doi:10.1016/0022-2496(64)90015-X
- Ludwig, B. (2001). *Management komplexer Systeme. Der Umgang mit Komplexität bei unvollkommener Information: Methoden, Prinzipien, Potentiale*. Berlin: edition sigma.
- Maeng, S., Lim, Y.-K. & Lee, K. (2012). Interaction-driven design. In *Proceedings of the 2012 Designing Interactive Systems Conference* (S. 448–457). Newcastle Upon Tyne, UK. doi:10.1145/2317956.2318022
- Maier, M. W. (1998). Architecting principles for systems-of-systems. *Systems Engineering*, 1 (4), 267–284. doi:10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D
- Malik, F. (2008). *Strategie des Managements komplexer Systeme. Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme* (10. Aufl.). Bern: Haupt.
- Marthaler, F., Orsolani, E., Uhlig, P., Kühfuss, D., Siebe, A., Bursac, N. & Albers, A. (2019). Strategische Potentialfindung zur generationsübergreifenden Produktentwicklung mit langfristigem Zeithorizont. Eine qualitative Studie im Live-Lab IP-Integrierte Produktentwicklung. In *Beiträge zum 5. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)* (S. 3641–3650). Stuttgart. doi:10.1017/dsi.2019.371

- Marxen, L. (2014). *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 74). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Masing, W. (2007). Das Unternehmen im Wettbewerb. In T. Pfeifer & R. Schmitt (Hrsg.), *Handbuch Qualitätsmanagement* (5. Aufl., S. 3–14). München: Hanser.
- Matros, K. (2016). *Entwicklung von Hybridantriebssystemen auf Basis des Pull-Prinzips der Validierung und des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 95). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Matthiesen, S. (2002). *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 6). Dissertation. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Matthiesen, S. (2011). Seven Years of Product Development in Industry. Experiences And Requirements For Supporting Engineering Design With 'Thinking Tools'. In *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 236–245). Kopenhagen, Dänemark.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gesinger, A., Pflugler, B. et al. (2018). *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung. Techniken zur Analyse und Synthese* (KIT Scientific Working Papers Nr. 58). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). doi:10.5445/IR/1000080744
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Grauberger, P., Steck, M. & Cersowsky, S. (2017). Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen. In *Beiträge zum 4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)* (S. 1–10). Stuttgart. doi:10.5445/IR/1000071442
- Matthiesen, S., Schäfer, T., Mangold, S. & Durow, P. (2013). X-in-the-Loop in der Gerätebranche. Ein ganzheitliches Validierungsframework unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anwender, Gerät und Anwendung. In *Beiträge zum 2. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)* (S. 1–10). Stuttgart.

- Maune, G. (2002). *Möglichkeiten des Komplexitätsmanagements für Automobilhersteller auf Basis IT-gestützter durchgängiger Systeme*. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn.
- Mayer, H. O. (2013). *Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung* (Sozialwissenschaften 10-2012, 6. Aufl.). München: Oldenbourg. doi:10.1524/9783486717624
- McCurdy, M., Connors, C., Pyrzak, G., Kanefsky, B. & Vera, A. (2006). Breaking the fidelity barrier. In *Proceedings of the 2006 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1233–1242). Montreal, Quebec, Canada. doi:10.1145/1124772.1124959
- McManus, H. & Hastings, D. (2005). A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems. In *Proceedings of the 15th Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering (INCOSE)* (S. 484–503). Rochester, NY, USA. doi:10.1002/j.2334-5837.2005.tb00685.x
- Meboldt, M. (2008). *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung. Als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 29). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Meier, G. & Hansen, J. (1999). Die Quotenstichprobe. In Arbeitskreis Deutscher Markt- und Sozialforschungsinstitute e.V. (ADM) & Arbeitsgemeinschaft Media-Analyse e.V. (AG.MA) (Hrsg.), *Stichproben-Verfahren in der Umfrageforschung* (S. 103–111). Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwissenschaften. doi:10.1007/978-3-663-11511-3_8
- Menk, C. (2019). Einsatz von Spatial Augmented Reality in der Automobilindustrie. In R. Dörner, W. Broll, P. Grimm & B. Jung (Hrsg.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (2. Aufl., S. 373–376). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-58861-1_9
- Messlerle, M. (2016). *Methodik zur Identifizierung der erfolgversprechendsten Produktideen in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Microsoft Corp. (2019). *HoloLens (1st Gen) hardware*, Microsoft Corp. Zugriff am 30.10.2019. Verfügbar unter <https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens1-hardware>

- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D (12).
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. & Kishino, F. (1994). Augmented reality. A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Proceedings of the International Symposium on Photonics for Industrial Applications* (S. 282–292). Boston, MA, USA. doi:10.1117/12.197321
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63 (2), 81–97. doi:10.1037/h0043158
- Moe, N. B., Dingsøyr, T. & Dybå, T. (2010). A teamwork model for understanding an agile team. A case study of a Scrum project. *Information and Software Technology*, 52 (5), 480–491. doi:10.1016/j.infsof.2009.11.004
- Mueller-Oerlinghausen, J. & Sauder, A. (2003). Kreativität: Alles oder nichts? Erfolgsfaktoren innovativer Produktentwicklung. In F. Habann (Hrsg.), *Innovationsmanagement in Medienunternehmen. Theoretische Grundlagen und Praxiserfahrungen* (S. 15–36). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-322-89795-4_1
- Müller, R. M. (1983). Zur Geschichte des Modelldenkens und des Modellbegriffs. In H. Stachowiak (Hrsg.), *Modelle. Konstruktion der Wirklichkeit* (Kritische Information, Bd. 101, S. 17–86). München: Fink.
- Muschik, S. (2011). *Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 50). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Netzer, O. & Srinivasan, V. (2011). Adaptive Self-Explication of Multiattribute Preferences. *Journal of Marketing Research*, 48 (1), 140–156. doi:10.1509/jmkr.48.1.140
- Neufville, R. de, Weck, O. L. de, Frey, D., Hastings, D., Larson, R., Simchi-Levi, D., Oye, K., Weigel, A. et al. (2004). Uncertainty management for engineering systems planning and design. In *Proceedings of the 2004 MIT Engineering Systems Symposium* (S. 1–18). Cambridge, MA, USA.

- Ng, L. X., Ong, S. K. & Nee, A. Y. C. (2010). ARCADE. A simple and fast augmented reality computer-aided design environment using everyday objects. In *Proceedings of the 2010 IADIS International Conference Interfaces and Human Computer Interaction (IHCI)* (S. 227–234). Freiburg.
- Nölle, S. (2006). *Augmented Reality als Vergleichswerkzeug am Beispiel der Automobilindustrie, Dissertation*. Dissertation. TU München, München.
- North, K. (2011). *Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen* (Gabler Lehrbuch, 5. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler.
doi:10.1007/978-3-8349-6427-4
- Oehme, O. & Huschka, C. (2003). Augmented Reality in der Automobilentwicklung. Visualisierung von Varianten im Kontext zum Hardwaremodell. *Unternehmen der Zukunft*, 4 (1), 10–11.
- Oh, H., Yoon, S. Y. & Hawley, J. (2004). What virtual reality can offer to the furniture industry. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 4 (1), 1–17.
- Ovesen, N. & Dowlen, C. (2012). The Challenges of Becoming Agile. Experiences from New Product Development in Industry and Design Education. In *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering and Product Design Education* (S. 9–14). Antwerpen, Niederlande.
- Pahl, G., Beitz, W., Grote, K.-H. & Feldhusen, J. (2007). *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung* (Springer-Lehrbuch, 7. Aufl.). Berlin: Springer.
- Park, J. (2008). Augmented Reality Based Re-formable Mock-Up for Design Evaluation. In *Proceedings of the 2008 International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality (ISUVR)* (S. 17–20). Gwangju, Südkorea.
doi:10.1109/ISUVR.2008.22
- Patzak, G. (1982). *Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin: Springer.
- Peddie, J. (2017). *Augmented Reality. Where We Will All Live*. Cham: Springer.
doi:10.1007/978-3-319-54502-8

- Peglow, N., Powelske, J., Birk, C., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Systematik zur Differenzierung von Varianten im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In *Beiträge zum 15. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik* (S. 9–17). Duisburg.
- Peschl, A. (2018). Virtuelle Kundenintegration. Die Bedeutung der Digitalisierung für die Interaktion bei der Kundenintegration. In T. Kollmann (Hrsg.), *Handbuch Digitale Wirtschaft* (1. Aufl., S. 1–16). Wiesbaden: Springer.
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungs-lösungen* (VDI-Buch, 2. Aufl.). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-20580-4
- Porter, A. (2004). *Accelerated testing and validation. Testing, engineering, and management tools for lean development*. Amsterdam: Newnes.
- Porter, S. R., Marnier, M. R., Smith, R. T., Zucco, J. E. & Thomas, B. H. (2010). Spatial Augmented Reality for interactive rapid prototyping. In *Proceedings of the 9th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (S. 265–266). Seoul, Südkorea. doi:10.1109/ISMAR.2010.5643599
- Posner, B., Keller, A., Binz, H. & Roth, D. (2012). Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren. In *Beiträge zum 10. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik* (S. 537–548). Dresden.
- Probst, G. J. B. & Deussen, A. (1997). Wissensziele als neue Managementinstrumente. *Gablers Magazin*, 8 (1), 6–9.
- PTC Inc. (2017). *The State of Industrial Augmented Reality 2017*. Zugriff am 17.01.2019. Verfügbar unter <https://www.ptc.com/en/resources/augmented-reality/white-paper/state-of-industrial-ar>
- Pulm, U. (2004). *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*. Dissertation. TU München, München.
- Rademacher, M., Krömker, H., Weber, C. & Riedel, O. (2014). *Virtual reality in der Produktentwicklung. Instrumentarium zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Reichwald, R., Meyer, A., Engelmann, M. & Walcher, D. (2007). *Der Kunde als Innovationspartner. Konsumenten integrieren, Flop-Raten reduzieren, Angebote verbessern* (1. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-9226-0
- Reinemann, J., Fahl, J., Hirschter, T. & Albers, A. (2019). Augmented Reality in der Produktvalidierung. Potenziale und Grenzen in frühen Entwicklungsphasen. In *Beiträge zur Konferenz Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design (EEE). Band 1* (S. 33–50). Dresden.
- Reinemann, J., Hirschter, T., Fahl, J., Hünemeyer, S. & Albers, A. (2019). An Investigation of Use Cases for Customer-Integrated Product Validation. In *Proceedings of the 2019 R&D Management Conference* (S. 1–10). Paris, Frankreich.
- Reinemann, J., Hirschter, T., Mandel, C., Heimicke, J. & Albers, A. (2018). Methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In *Beiträge zum 28. DfX-Symposium* (S. 307–320). Tutzingen.
- Reinhart, G., Lindemann, U. & Heinzl, J. (1996). *Qualitätsmanagement. Ein Kurs für Studium und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-80210-2
- Reiß, N. (2018). *Ansätze zur Steigerung der Methodenakzeptanz in agilen Prozessen der PGE - Produktgenerationsentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 112). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Reiß, N., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Approaches to increasing method acceptance in agile product development processes. In *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 435–444). Vancouver, Kanada.
- Reither, F. (1996). Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität. Annäherung an ein neues Muster des Problemlösens. In H. Balck (Hrsg.), *Networking und Projektorientierung. Gestaltung des Wandels in Unternehmen und Märkten* (S. 183–197). Berlin: Springer.
- Renner, I. (2007). *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*. Dissertation. TU München, München.

- Rode, P. (2013). *Virtuelle Stimuli für Kundentests im Innovationsprozess*. Wiesbaden: Springer. doi:10.1007/978-3-8348-2368-7
- Roozenburg, N. F. M. (2002). Defining synthesis. On the senses and the logic of design synthesis. In A. Chakrabarti (Ed.), *Engineering Design Synthesis. Understanding, Approaches and Tools* (pp. 3–18). London: Springer. doi:10.1007/978-1-4471-3717-7_1
- Ropohl, G. (1975). Einleitung in die Systemtechnik. In G. Ropohl (Hrsg.), *Systemtechnik. Grundlagen und Anwendung* (S. 1–77). München: Hanser.
- Ropohl, G. (2005). Allgemeine Systemtheorie als transdisziplinäre Integrationsmethode. *Journal of Technology Assessment in Theory and Practice*, 14 (2), 24–31.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik* (3. Aufl.). Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe.
- Ruppert, T. (2007). *Modularisierung des Verbrennungsmotors als strategische Option in der Motorenindustrie*. Dissertation. Universität Kassel, Kassel.
- Rutherford, S. (2005). Cooking up Pleasurable Products. Understanding Designers. In W. S. Green & P. W. Jordan (Hrsg.), *Pleasure With Products. Beyond Usability* (S. 298–306). Boca Raton: CRC Press.
- Sattler, H. (1991). *Herkunfts- und Gütezeichen im Kaufentscheidungsprozeß. Die Conjoint-Analyse als Instrument der Bedeutungsmessung*. Dissertation. Universität Kiel, Kiel.
- Sattler, H. & Hensel-Börner, S. (2007). A Comparison of Conjoint Measurement with Self-Explicated Approaches. In A. Gustafsson, A. Herrmann & F. Huber (Eds.), *Conjoint Measurement. Methods and Applications* (4th ed., vol. 8, pp. 67–76). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-540-71404-0_4
- Schein, E. H. (2010). *Organizational culture and leadership* (The Jossey-Bass business & management series, 4th ed.). San Francisco: Jossey-Bass.
- Scherer, H. (2016). *Modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 97). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Schermer, F. J. & Drinkmann, A. (2017). *Grundlagen der Psychologie*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Schilling, T. (2008). *Augmented Reality in der Produktentstehung*. Dissertation. TU Ilmenau, Ilmenau.
- Schirmer, A. (1990). Planung und Einführung eines neuen Produktes am Beispiel der Automobilindustrie. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 42 (10), 892–907.
- Schmidt, T. S., Chahin, A., Kößler, J. & Paetzold, K. (2017). Agile development and the constraints of physicality. A network theory-based cause-and-effect analysis. In *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 199–208). Vancouver, Kanada.
- Schmidt, T. S. & Paetzold, K. (2016). Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte. Chancen und Herausforderungen. In *Beiträge zum 27. DfX-Symposium* (S. 255–267). Jesteburg.
- Schmidt, T. S. & Paetzold, K. (2017). Challenges of Agile Development. A Cause-and-Effect Analysis. In *Proceedings of the 7th International Conference on Complex Systems Design & Management (CSD&M)* (S. 237). Paris, Frankreich. doi:10.1007/978-3-319-49103-5_21
- Schöps, T., Engel, J. & Cremers, D. (2014). Semi-dense visual odometry for AR on a smartphone. In *Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (S. 145–150). München. doi:10.1109/ISMAR.2014.6948420
- Schorck, S. & Kirchner, E. (2018). Method for the development of early prototypes of mechatronic machine elements based on their critical properties. In *Proceedings of the 15th International Design Conference (DESIGN)* (S. 1325–1336). Dubrovnik, Kroatien.
- Schröder, A. & Schrofner, A. (2015). Hochleistung ist crossfunktional. *Der F&E Manager - Für Mehr Effizienz in Der Innovation*, 16 (4), 6–13.
- Schubert, B. (1990). *Entwicklung von Konzepten für Produktinnovationen mittels Conjointanalyse*. Dissertation. Universität Göttingen, Göttingen.

- Schubert, S., Heller, J. E. & Feldhusen, J. (2012). Produktmerkmale in der Entwicklung von kundenindividuellen Produkten. In *Beiträge zum 10. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik* (S. 425–440). Dresden.
- Schuh, G. & Bender, D. (2012). Grundlagen des Innovationsmanagements. In G. Schuh (Hrsg.), *Innovationsmanagement* (Handbuch Produktion und Management, Bd. 3, 2. Aufl., S. 1–16). Berlin: Springer.
- Schuhmann, M., Klimant, P., Kollatsch, C. & Wittstock, V. (2013). Modulares Framework zur Entwicklung von Augmented-Reality-Anwendungen. In *Proceedings of the 2nd Conference on Research and Use of VR/AR Technologies of the Professorship for Machine Tools and Forming Technology at the Chemnitz University of Technology* (S. 115–124). Chemnitz.
- Schulte-Henke, C. (2007). *Kundenorientiertes Target Costing und Zuliefererintegration für komplexe Produkte. Entwicklung eines Konzepts für die Automobilindustrie*. Dissertation. Universität Saarbrücken, Saarbrücken.
- Schumpeter, J. A. (1939). *Business Cycles. A Theoretical, Historical, and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. New York: McGraw-Hill.
- Schwaber, K. (2004). *Agile project management with Scrum*. Redmond: Microsoft Press.
- Schwaber, K. & Beedle, M. (2001). *Agile software development with Scrum* (Series in agile software development). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Schwaninger, M. (1998). *Systemtheorie. Eine Einführung für Führungskräfte, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler* (2. Aufl.). St. Gallen: IfB.
- Seiffert, U. & Rainer, G. (2008). *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-8348-9479-3
- Sekolec, R. (2005). *Produktstrukturierung als Instrument des Variantenmanagements in der methodischen Entwicklung modularer Produktfamilien*. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.

- Sharma, V. S., Mehra, R., Kaulgud, V. & Podder, S. (2019). An Extended Reality Approach for Creating Immersive Software Project Workspaces. In *Proceedings of the 12th International Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering (CHASE)* (S. 27–30). Montreal, Kanada. doi:10.1109/CHASE.2019.00013
- Sheskin, D. J. (2007). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures* (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Slater, M., Usoh, M. & Steed, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3 (2), 130–144. doi:10.1162/pres.1994.3.2.130
- Souder, W. E. & Chakrabarti, A. K. (1980). Managing the coordination of marketing and R&D in the innovation process. *TIMS Studies in the Management Sciences*, 15, 135–150.
- Soundararajan, S. & Arthur, J. D. (2011). A Structured Framework for Assessing the „Goodness“ of Agile Methods. In *Proceedings of the 18th IEEE International Conference and Workshops on Engineering of Computer-Based Systems* (S. 14–23). Las Vegas, USA. doi:10.1109/ECBS.2011.26
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stark, R., Beckmann-Dobrev, B., Schulze, E.-E., Adenauer, J. & Israel, J. H. (2009). Smart Hybrid Prototyping zur multimodalen Erlebbarkeit virtueller Prototypen innerhalb der Produktentstehung. In *Beiträge zur 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (S. 437–443). Berlin.
- Steiner, M. (2007). *Nachfrageorientierte Präferenzmessung. Bestimmung zielgruppenspezifischer Eigenschaftssets auf Basis von Kundenbedürfnissen*. Dissertation. Universität Jena, Jena.
- Steinhauser, N. & Zehle, K.-O. (2010). Risikominimierung in der Produktentwicklung. *Technologie und Management*, 24 (2), 16–20.
- Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality. Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42 (4), 73–93. doi:10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x

- Stier, C. (2014). *Ein Beitrag zur Validierung von Antriebssystemen mit Bezug auf kupplungs- und motorinduzierte Schwingungen* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 82). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Stolper, M. (2007). *Market Driving-Konzept*. Dissertation. Universität Dortmund, Dortmund.
- Suh, N. P. (1999). A Theory of Complexity, Periodicity and the Design Axioms. *Research in Engineering Design*, 11 (2), 116–132. doi:10.1007/PL00003883
- Thau, S. (2013). *Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C2-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 66). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Töllner, A. (2010). Modelle und Modellierung. In G. Bandow & H. H. Holzmüller (Hrsg.), „*Das ist gar kein Modell!*“. *Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften* (Gabler Research, 1. Aufl., S. 3–21). Wiesbaden: Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-8484-5_1
- Tönnis, M. (2010). *Augmented Reality. Einblicke in die Erweiterte Realität* (Informatik im Fokus). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-14179-9
- Türk, D., Leutenecker, B. & Meboldt, M. (2014). Experience the relevance of testing in engineering design education. In *Proceedings of the 10th International CDIO Conference* (S. 1–11). Barcelona, Spanien.
- Ulrich, H. (1970). *Die Unternehmung als produktives soziales System. Grundlagen der allgemeinen Unternehmungslehre*. Bern: Haupt.
- Ulrich, H. & Probst, G. J. B. (1995). *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Ein Brevier für Führungskräfte*. Bern: Haupt.
- Ulrich, K. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, 24 (3), 419–440. doi:10.1016/0048-7333(94)00775-3
- Utterback, J. M. & Abernathy, W. J. (1975). A dynamic model of process and product innovation. *Omega*, 3 (6), 639–656.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1976). *Elektronische Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung und -steuerung. Teil IV*. Düsseldorf: VDI-Verl.

- VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2004). VDI 2206. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019). VDI 2221 Blatt 2. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019). VDI 2221 Blatt 1. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth.
- Verma, H. V. (2012). *Services marketing. Text and cases* (2. Aufl.). Neu Delhi: Pearson Education.
- Verworn, B. & Herstatt, C. (2007). Bedeutung und Charakteristika der frühen Phasen des Innovationsprozesses. In C. Herstatt & B. Verworn (Hrsg.), *Management der frühen Innovationsphasen. Grundlagen, Methoden, Neue Ansätze* (2. Aufl., S. 3–19). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-8349-9293-2_1
- Voeth, M. (2000). *Nutzenmessung in der Kaufverhaltensforschung. Die Hierarchische Individualisierte Limit Conjoint-Analyse (HILCA)* (nbf Neue Betriebswirtschaftliche Forschung, Bd. 265). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverl. doi:10.1007/978-3-322-91477-4
- Wanke, S. (2010). *Neue Konzepte zur Verwaltung und Bereitstellung von Lösungen im Produktentwicklungsprozess. CPM/PDD-Lösungsmuster als Grundlage eines verhaltensbeschreibenden Lösungskataloges*. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- Weber, C. (2012). Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften. Eine kritische Zwischenbilanz. In *Beiträge zum 23. DfX Symposium* (S. 25–62). Bamberg.
- Weck, O. L. de, Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2007). A Classification of Uncertainty for Early Product and System Design. In *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 159–160). Paris, Frankreich.
- Weckenmann, A. & Werner, T. (2007). Messen und Prüfen. In T. Pfeifer & R. Schmitt (Hrsg.), *Handbuch Qualitätsmanagement* (5. Aufl., S. 619–659). München: Hanser.

- Weech, S., Kenny, S. & Barnett-Cowan, M. (2019). Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related. A Review. *Frontiers in psychology*, 10, 158. doi:10.3389/fpsyg.2019.00158
- Wesner, E. (1977). *Die Planung von Marketing-Strategien auf der Grundlage des Modells des Produktlebenszyklus*. Dissertation. FU Berlin, Berlin.
- Wheelwright, S. C. & Clark, K. B. (1995). *Leading product development. The senior manager's guide to creating and shaping the enterprise*. New York: Free Press.
- Wiedemann, E. (2013). *Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen*. Dissertation. TU München, München.
- Willke, H. (2000). *Systemtheorie I. Grundlagen* (UTB für Wissenschaft: Uni-Taschenbücher, Bd. 1161, 6. Aufl.). Stuttgart: Fischer.
- Wilmsen, M., Dühr, K., Heimicke, J. & Albers, A. (2019). The First Steps Towards Innovation. A Reference Process for Developing Product Profiles. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED)* (S. 1673–1682). Delft, Niederlande. doi:10.1017/dsi.2019.173
- Wintergerst, E. (2015). *Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung* (IPEK-Forschungsberichte, Bd. 86). Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Winzer, P. (2013). *Generic Systems Engineering. Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung*. Berlin: Springer Vieweg.
- Wittke, M. (2007). AR in der PKW-Entwicklung bei Volkswagen. In *Beiträge der 10. IFF-Wissenschaftstage* (S. 51–56). Magdeburg.
- Wolter, F.-E., Reuter, M. & Peinecke, N. (2007). Geometric Modeling for Engineering Applications. In E. Stein (Ed.), *Encyclopedia of computational mechanics* (vol. 23, p. 97). Chichester: Wiley. doi:10.1002/0470091355.ecm013.pub2
- Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2018). Process models in design and development. *Research in Engineering Design*, 29 (2), 161–202. doi:10.1007/s00163-017-0262-7

Yogasara, T. (2014). *Anticipated user experience in the early stages of product development*. Dissertation. Queensland University of Technology, Brisbane.

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor Co-betreut wurden:

Elleuch, W. (2019). *Potenzialanalyse von Augmented Reality Interfaces für den Einsatz in der Produktvalidierung in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Etri, M. & Sängler, J. (2020). *Untersuchung von Potentialen, Herausforderungen und Risiken bei der Integration von Extended-Reality-Anwendungen in der Produktentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Fu, Y. (2019). *Effizienzsteigerung in der Mensch-Roboter- Interaktion durch verschiedene Kommunikationskanäle*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Güttinger, J. (2018). *Entwicklung einer Methode zur Produktvalidierung in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Harms, J. (2018). *Potenzialanalyse der Augmented Reality-Technik für den Einsatz zur Produktvalidierung in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Humpert, F. B. (2018). *Potenziale und Herausforderungen kundenintegrierter Produktvalidierung in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Kiziltug, T. (2019). *Entwicklung eines Beschreibungsmodells für Augmented-Reality-basierte Validierungsumgebungen und Validierungskonfigurationen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Kothiya, M. (2020). *Anwendung und Evaluation einer Systematik zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen am Beispiel der Entwicklung eines Mahlzeitscanners*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kumar, A. (2020). *Investigation of Augmented Reality Systems in the Context of Immersion and Presence*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Hector School of Engineering & Management, Karlsruhe.
- Meng, F. (2018). *Potenzialanalyse der Augmented Reality-Technologie zur Produktvalidierung in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Pfeiffer, C. (2018). *Entwicklung einer Methode zur Konfiguration von Augmented-Reality-basierten Validierungsumgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Schmid, D. (2019). *Entwicklung eines Leitfadensystems zur Unterstützung des Aufbaus Augmented-Reality-basierter Validierungsumgebungen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Sommer, M. M. (2019). *Development of an evaluation concept for a virtual product development approach in the context of virtual commissioning*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Hector School of Engineering & Management, Karlsruhe.
- Syring, M. (2018). *Entwicklung einer Methode zur Festlegung und Konkretisierung von Validierungszielen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Walker, P. (2019). *Evaluation einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Vorveröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Arbeit entstanden sind:

- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Reinemann, J., Spadinger, M., Hünemeyer, S. & Heimicke, J. (2019). Identification of Indicators for the Selection of Agile, Sequential and Hybrid Approaches in Product Development. In Proceedings of the 29th CIRP Design Conference (S. 838–847). Póvoa de Varzim, Portugal. doi:10.1016/j.procir.2019.04.229
- Albers, A., Reinemann, J., Fahl, J. & Hirschter, T. (2019). Augmented Reality for Product Validation. Supporting the Configuration of AR-Based Validation Environments. In Proceedings of 21st HCI International Conference. Part II (S. 429–448). Orlando, FL, USA.
- Albers, A., Reinemann, J., Hirschter, T., Fahl, J. & Heitger, N. (2019). Validation-Driven Design in the Early Phase of Product Development. In Proceedings of the 29th CIRP Design Conference (S. 630–637). Póvoa de Varzim, Portugal. doi:10.1016/j.procir.2019.04.211
- Reinemann, J., Fahl, J., Hirschter, T. & Albers, A. (2019). Augmented Reality in der Produktvalidierung. Potenziale und Grenzen in frühen Entwicklungsphasen. In Beiträge zur Konferenz Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design (EEE). Band 1 (S. 33–50). Dresden.
- Reinemann, J., Hirschter, T., Fahl, J., Hünemeyer, S. & Albers, A. (2019). An Investigation of Use Cases for Customer-Integrated Product Validation. In Proceedings of the 2019 R&D Management Conference (S. 1–10). Paris, Frankreich.
- Reinemann, J., Hirschter, T., Mandel, C., Heimicke, J. & Albers, A. (2018). Methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In Beiträge zum 28. DfX-Symposium (S. 307–320). Tutzingen.

Glossar

AR-Szene, AR-Umgebung	Eine AR-Szene oder AR-Umgebung bezeichnet die Überlagerung eines bestimmten realen Raums durch definierte virtuelle Objekte mithilfe der Augmented-Reality-Technologie. (Jung & Vitzthum, 2019; Schuhmann et al., 2013)
Augmented Reality (AR)	Die augmentierte Realität (engl. Augmented Reality) bezeichnet die computergestützte Erweiterung der vom Menschen wahrgenommenen Realität um virtuelle Inhalte. (Broll, 2013)
Augmented-Reality-System (AR-System)	Ein AR-System bezeichnet ein System der Hardware- und Softwarekomponenten, die erforderlich sind, um eine AR-Umgebung darzustellen. Zu diesen Komponenten zählen in der Regel ein Tracking-System, ein Szenengenerator, ein Anzeige- und ein Datenbanksystem. Bei modernen AR-Systemen werden die einzelnen Subsysteme meist in einem Gerät zusammengefasst. Aufgrund ihrer Rolle als Schnittstelle zwischen der realen und der virtuellen Umwelt werden AR-Systeme auch als AR-Interfaces bezeichnet. (Dörner et al., 2019; Jung & Vitzthum, 2019; Schilling, 2008; Tönnis, 2010)
Connected System	Ein Connected System bezeichnet in der Terminologie des IPEK-XiL-Ansatzes ein mit dem zu untersuchenden System interagierendes System. (Albers, Behrendt et al., 2016)
Frühe Phase im Modell der PGE	„Die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit einer bewerteten technischen Lösung endet, die das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elemente abdeckt. Die zur technischen Lösung gehörende Produktspezifikation als Teil des Zielsystems enthält u.a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile. Sie ermöglicht eine valide

Bewertung des zu entwickelnden technischen Systems hinsichtlich der relevanten Parameter wie beispielsweise der Produzierbarkeit, der notwendigen Ressourcen sowie des technischen und ökonomischen Risikos.“ (Albers, Rapp et al., 2017, S. 4)

Immersion

Immersion bezeichnet die Eigenschaft einer virtuellen Szene beim Anwender ein subjektives Gefühl der Präsenz zu erzeugen. Präsenz meint das Gefühl des Anwenders in der virtuellen Szene anwesend zu sein und sie damit letztlich als real zu interpretieren. (Dörner et al., 2019; Rademacher et al., 2014; Steuer, 1992)

Interaktives Produkt

Ein interaktives Produkt bezeichnet ein Produkt, das Eingaben von einem Anwender empfängt und Ausgaben an ihn übermittelt und es dem Anwender so ermöglicht mit dem Produkt zu interagieren. Interaktiven Produkten stehen Produkte gegenüber, die in keiner Interaktion mit einem menschlichen Anwender stehen, sondern etwa ausschließlich mit anderen technischen Produkten interagieren. (Hassenzahl, 2006; DIN EN ISO 9241-210, 2011; Yogasara, 2014)

IPEK-XiL-Ansatz

Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL-Ansatz) ist ein Ansatz zur durchgängigen methodischen Unterstützung und Beschreibung von Validierungsaktivitäten. Nach dem Verständnis des IPEK-XiL-Ansatzes erfolgt die Validierung eines Teilsystems unter Berücksichtigung seiner Wechselwirkungen mit allen relevanten umgebenden Systemen, wie dem Gesamtsystem, der Umwelt und dem Anwender. (Albers, Behrendt et al., 2016)

IPEK XR-Lab

Das IPEK XR-Lab bezeichnet das Labor, das im Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsprojekts aufgebaut wurde. Es ist mit geeigneten Hardware- und Softwaresystemen ausgestattet, die den Aufbau und die Exploration unterschiedlicher AR-Szenen ermöglichen.

Kundenerlebte Produkteigenschaften

„Kundenerlebte Produkteigenschaften sind Produkteigenschaften, welche das Verhalten des technischen Gesamtsystems aus Sicht des Kunden bzw. Anwenders beschreiben. Sie ermöglichen dem Kunden bzw. Anwender (ähnliche) Produkte subjektiv,

zum Teil objektiviert, miteinander zu vergleichen und damit Produktdifferenzierung zu beschreiben.“ (Albers, Heitger et al., 2018; zit. nach Heitger, 2019, S. 22)

Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

„Als Produktgenerationsentwicklung wird die Entwicklung technischer Produkte verstanden, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation (ÜV) als auch durch eine Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. [...] Die Anteile technischer Neuentwicklungen einzelner Funktionseinheiten können sowohl durch die Aktivität Gestaltvariation (GV) als auch durch die [...] Aktivität Prinzipvariation (PV) [...] erfolgen. Neue Produktgenerationen basieren immer auf [Referenzsystemen].“ (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015, S. 4)

Präferenzmessung

Als Präferenzmessung werden solche Validierungsaktivitäten bezeichnet, deren Ziel in der Untersuchung der Präferenzen, meist von Kunden und Anwendern, für bestimmte Produkteigenschaften und deren Ausprägungen besteht. Eine Präferenz bezeichnet dabei die „subjektive Vorziehenswürdigkeit einer Alternative gegenüber anderen Produktalternativen zu einem bestimmten Zeitpunkt“ (Steiner, 2007, S. 11).

Produktprofil

Ein Produktprofil bezeichnet „ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht“. (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018; zit. nach Heitger, 2019, S. 27)

Produktqualität (pragmatische, hedonische)

Nach dem kundenbezogenen Qualitätsansatz bezeichnet die Produktqualität den Grad der Erfüllung der Anforderungen von Kunden- und Anwendern an ein Produkt. Die kognitive oder pragmatische Komponente der Produktqualität ist „das Ergebnis eines kognitiven Vergleichs [...] der wahrgenommenen Ist- und der erwarteten Soll-Leistung“ (Katičić, 2012, S. 63) eines Produkts. Die emotionale oder hedonische Komponente ergibt sich hingegen aus dem mitunter unbewussten, affektiven Zustand bei der Exploration eines Produkts. (Bauer, 2000; Garvin, 1984; Hassenzahl et al., 2003; Katičić, 2012)

Prototyp	Ein Prototyp bezeichnet ein verkürztes physisches, virtuelles oder gemischt physisch-virtuelles Produktmodell, das für einen bestimmten Einsatzzweck erstellt wird und "zur Analyse, Gestaltung und Bewertung" (DIN EN ISO 9241-210, 2011, S. 6) des Produkts verwendet werden kann.
System-in-Development	Das System-in-Development bezeichnet in der Terminologie des IPEK-XiL-Ansatzes das physische und/oder virtuelle (Teil-)System, welches im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität steht und über das dabei Erkenntnisse gewonnen werden sollen. (Albers, Behrendt et al., 2016)
Unsicherheit (technologische, marktliche)	Technologische Unsicherheit bezeichnet fehlendes Wissen in Bezug auf die technische Lösung und deren fertigungstechnische Umsetzbarkeit. Marktliche Unsicherheit resultiert aus fehlendem Wissen in Bezug auf die Größe und Beschaffenheit des Zielmarktes sowie insbesondere die Bedürfnisse und Anforderungen der Kunden und Anwender des zu entwickelnden Produkts. (Freudenmann, 2014; Reichwald et al., 2007)
Validierung	Validierung bezeichnet bezogen auf technische Systeme die „Prüfung [...], ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt“ (VDI 2206, 2004, S. 39). Die Validierung geht damit über die Verifikation, also den formalen Abgleich der technischen Lösung mit der Spezifikation, hinaus. Die Validierung beantwortet die Frage, ob das richtige Produkt entwickelt wird, während die Verifikation die Antwort auf die Frage liefert, ob ein korrektes Produkt entwickelt wird. (Albers, Behrendt et al., 2016)
Validierungskonfiguration	Eine Validierungskonfiguration bezeichnet eine spezifische Kombination von Methoden, Testfällen, Ressourcen und Parametrisierungen, die von einer Validierungsumgebung abgeleitet werden. Jede Validierungsumgebung verfügt über mindestens eine Validierungskonfiguration. (Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Mandel et al., 2018)

Validierungssystem	Ein Validierungssystem bezeichnet die Gesamtheit aller entwickelten Systeme, Methoden und Prozesse zur Validierung eines Produkts. (Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Mandel et al., 2018)
Validierungsumgebung	Eine Validierungsumgebung bezeichnet eine „konkrete Ausprägung des Handlungssystems zur Validierung in Bezug auf Methoden und das Ressourcensystem für eine oder mehrere Kombinationen aus einem Produkt, einem Punkt im Produktlebenszyklus und einem Validierungsziel“ (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 547). Eine Validierungsumgebung stellt damit eine Auswahl der Elemente des Validierungssystems dar, die für die Erreichung eines bestimmten Validierungsziels benötigt werden. (Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Mandel et al., 2018)
Wiedergabetreue	Wiedergabetreue (eng. fidelity) bezeichnet die Ähnlichkeit eines Produktmodells (Prototyps) mit dem späteren Endprodukt. Die Wiedergabetreue eines Prototyps lässt sich differenziert entlang verschiedener Wiedergabedimensionen beschreiben. (Klingler, 2016; Kohler et al., 2013; Lim et al., 2006; McCurdy et al., 2006; Reinemann, Fahl et al., 2019; Türk et al., 2014)