

Felix Pfaff

**Die Evolution technischer Systeme:
Untersuchung der Zusammenhänge von
SGE – Systemgenerationsentwicklung,
Produktumfeld und Innovation**

The Evolution of Technical Systems:
Investigation of the Relationships between
SGE – System Generation Engineering,
Product Context, and Innovation

Band 200

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Die Evolution technischer Systeme: Untersuchung der Zusammenhänge von SGE – Systemgenerationsentwicklung, Produktumfeld und Innovation

Band 200

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2026
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Die Evolution technischer Systeme: Untersuchung der Zusammenhänge von SGE – Systemgenerationsentwicklung, Produktumfeld und Innovation

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

Felix Pfaff, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung:	18.06.2026
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer

Vorwort der Herausgeber

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 zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

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

Vorwort zu Band 200

Die Entwicklung technischer Systeme im 21. Jahrhundert lässt sich aufgrund der entstandenen Komplexität ihres Aufbaues, der Interdisziplinarität für ihre Entwicklung und auch den verkürzten Marktzyklen in globalen Käufermärkten nicht mehr mit den klassischen Vorstellungen einer planbaren und weitgehend linear beherrschbaren Produktentwicklung beschreiben. Die Unternehmen müssen in zunehmend dynamischen Märkten Lösungen hervorbringen, die nicht nur technisch leistungsfähig sind, sondern zugleich auch auf veränderte Kunden- und Anwenderbedarfe reagieren, neue regulatorische Rahmenbedingungen berücksichtigen, gesellschaftliche Erwartungen und zum Teil technologische Umbrüche integrieren und das alles unter einem erheblichen Kosten- und Zeitdruck. Gerade in einem solchen hochdynamischen Umfeld wird die Fähigkeit, technische Systeme über mehrere Generationen hinweg erfolgreich zu entwickeln und immer wieder mit neuem Innovationspotenzial zu versehen, zu einer zentralen Voraussetzung einer ganzheitlichen Produkt- und Produktportfolioplanung. Dabei ist das Entwickeln in immer neuen Generationen in der Praxis der Produktentwicklung technischer Systeme schon immer inhärente Grundlage des Vorgehens. Produktlösungen beruhen dabei typischerweise auf Vorgängerprodukten und -systemen, die geeignet an die Bedingungen des Marktes adaptiert werden. Auch sogenannte vollständige Neuschöpfungen, oder auch Neuentwicklungen in der klassischen Konstruktionsmethodik (White-Paper-Development) beruhen dabei, wie alle Untersuchungen zeigen, auch auf Referenzen aus dem eigenen Unternehmen, dem Wettbewerb, den Märkten, oder gar der Forschung. Bisher gab es in der Forschung zur Produktentwicklung allerdings kein theoretisches Modell das diese Praxis systematisch beschreibt und damit praktisch nutzbar macht. Erst mit dem Modell der *SGE – Systemgenerationsentwicklung* nach ALBERS (seit 2012 als *PGE* veröffentlicht) wird dieser Zusammenhang mit besonderer Klarheit beschrieben. Neue Systemgenerationen entstehen immer auf Basis von Referenzen, die als sogenannte Referenzsystemelemente zu einer Menge zusammengefasst werden, die als Referenzsystem der jeweiligen Produktgeneration beschrieben wird. Die kreative Zusammenstellung dieses Referenzsystems ist die Basis einer jeglichen Neuentwicklung, auf der dann durch nur drei grundlegende Variationen – nämlich der Übernahmevariation, der Ausprägungsvariation und der Prinzipvariation – die Lösungsmenge der neuen Produktgeneration entsteht. Neuentwicklungen ohne Vorgängergeneration, sogenannte G_1 -Entwicklungen, unterscheiden sich in der Beschreibung durch die *SGE* dabei nur in einem Punkt: es gibt keinen direkten Architektur- oder Systemvorgänger als Teil des Referenzsystems. Ansonsten ist auch diese G_1 -Entwicklung vollständig durch die *SGE* beschrieben. Die *SGE* stellt damit einen tragfähigen theoretischen Rahmen bereit, um Produktplanung,

Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung nicht als isolierte Einzelprozesse, sondern als fortlaufende, vernetzte, generationsübergreifende Synthese technischer Systeme und deren Produktionssystem zu verstehen. Aus dieser Betrachtung ergibt sich jedoch eine weiterführende wissenschaftliche Fragestellung von erheblicher Bedeutung:

Wenn technische Systeme in Generationen entstehen und sich in einem wandelnden Umfeld behaupten müssen, dann reicht es nicht aus, nur einzelne Entwicklungsschritte oder einzelne Produktgenerationen zu betrachten. Vielmehr ist zu fragen, wie Produktumfeld, Produktprofil, technische Variation, Referenzsystemelemente und Innovation über längere Entwicklungsverläufe zusammenhängen. Für die Produktentwicklung ist dieses Wissen deshalb wichtig, weil die Wahl geeigneter Referenzen und geeigneter Variationen maßgeblich beeinflusst, ob eine neue Produktgeneration große Innovationspotenziale entfaltet und zugleich mit vertretbaren Kosten und Risiken entwickelt werden kann. Vor diesem Hintergrund ist der von Herrn Dr.-Ing. Felix Pfaff in seiner wissenschaftlichen Arbeit gewählte Zugang besonders überzeugend. Die Arbeit nutzt die Analogie zur natürlichen Evolution in der Biologie nicht als bloßes sprachliches Bild, sondern als systematischen Erklärungsrahmen für die Evolution technischer Systeme. Wie biologische Organismen sich in Wechselwirkung mit ihrer Umwelt verändern und bewähren müssen, stehen auch technische Systeme in einem Umfeld, das Entwicklung, Erfolg und Scheitern beeinflusst.

Anders als in der Natur ist technische Entwicklung aber durch den Menschen gestaltet. Dieser Gestaltungsprozess durch den Menschen berücksichtigt dann die Einflüsse von Märkten, Unternehmen, Wissen, gesellschaftlicher Entwicklung, Bedarfssituationen, technische Möglichkeiten und führt diese Randbedingungen in den Gestaltungsprozess ein. Im Unterschied zur biologischen Evolution ist in diesem Prozess der Gestaltung von Systemen ein weiterer entscheidender Unterschied die zur Verfügung stehende Zeit. Während in der Natur über zum Teil sehr lange Zeiträume die Adaption an neue Randbedingungen erfolgt, ist in der technischen Entwicklung die Gestaltungszeit für eine neue Systemlösung – die Time-to-Market – sehr begrenzt. Diese Aspekte werden in der Arbeit von Herrn Pfaff aufgenommen. Durch das von ihm gewählte retrospektive Forschungsvorgehen, bezogen auf reale Produkte und Systeme der Vergangenheit und deren Generationsgenealogie, ist dabei äußerst folgerichtig, da Innovationen nach SCHUMPETER erfolgreiche Inventionen sind und damit immer nur im Nachhinein als solche erkannt werden können. Herr Dr.-Ing. Felix Pfaff hat in seiner Arbeit Entwicklungsverläufe technischer Systeme über mehrere Generationen hinweg untersucht und bereitet die Ergebnisse in einem

umfangreichen Datensatz auf. Daraus leitet er fallübergreifende Muster, Heuristiken und weitere Erkenntnisse ab.

Damit verbindet die Arbeit theoretische Modellbildung, empirisch retrospektive Analyse und den Anspruch einer späteren methodischen Nutzbarkeit in der Praxis der Produktsynthese. Sie setzt damit an einer zentralen Stelle der *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung* an und öffnet zugleich einen neuen Zugang zur Weiterentwicklung und Begründung der SGE als Erklärungsmodell technischer Systementwicklung. Die Arbeit liefert somit sowohl einen wichtigen Beitrag zur Forschung auf dem Gebiet der Produktentwicklung als auch klare Beiträge zur zukunftsorientierten Gestaltung der Produktentwicklung in den Unternehmen.

April, 2026

Albert Albers

Kurzfassung

Unternehmen sehen sich im VUKA-Umfeld des 21. Jahrhunderts mit Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität sowie hohem Innovations- und Kostendruck konfrontiert. Die systematische Planung und Entwicklung von Produktprofilen und technischen Systemen mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers bietet hier großes Unterstützungspotenzial: Durch Übernahmevariation (ÜV) und die Nutzung unternehmensinterner Referenzen lassen sich Kosten und Risiken reduzieren, während durch gezielte Neuentwicklung mit Ausprägungsvariation (AV) und Prinzipvariation (PV) neuer Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen geschaffen werden kann. Referenzen und Variationsarten müssen passend für das zukünftige Umfeld ausgewählt werden, um im „Survival of the fittest“ zu bestehen, wofür Wissen über die Zusammenhänge von SGE, Produktumfeld und Innovation benötigt wird. Daher ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, explorativ Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation zu identifizieren und zu erklären.

Das Modell zur Beschreibung der Zusammenhänge wird durch eine Analogie der natürlichen Evolution zur Evolution technischer Systeme motiviert. Für den induktiven, theoriebildenden Forschungsansatz dieser Arbeit wurden 12 retrospektive, literaturbasierte Fallstudien zur Evolution technischer Systeme durchgeführt, aus denen ein Forschungsdatensatz mit 112 Systemgenerationen und Produktprofilen, 1195 Variationen und Referenzen sowie 405 Umfeldfaktoren entstand. Die fallübergreifende Analyse und die Theoriesynthese kombinieren einen fallbasierten iterativen Ansatz mit einem variablenbasierten Ansatz.

Ergebnis sind 79 Theoriebausteine, gegliedert in 14 Muster, 39 Heuristiken und 26 weitere Erkenntnisse. Sie beschreiben Zusammenhänge zwischen makroökonomischen Umfeldfaktoren (Akzeptanz, rechtliche Rahmenbedingungen, Krisen), mikroökonomischen Umfeldfaktoren (Bedarfe, Kritik, Nischenkonstruktion), unternehmensinternen Umfeldfaktoren (Projektumfeld, Marketing, Geschäftsmodelle, Standardisierung), Produktprofil-Variation (Muster für PV und Weiterentwicklung, S-Kurven), Variation des technischen Systems (Architektur, Subsysteme, Lösungsprinzipien), der Auswahl von Referenzen (interne und externe Quellen), der Evolution von Produktvarianten sowie Reaktionen auf gescheiterte Systemgenerationen. Die Theoriebausteine beschreiben die Evolution technischer Systeme und liefern Ansätze zur generationsübergreifenden Planung von Referenzen und Variationen. Die Arbeit leistet einen Beitrag zur Erklärung der Evolution technischer Systeme und liefert eine Grundlage für methodische Unterstützung, um Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und Risiken zu entwickeln.

Abstract

Companies in the VUCA environment of the 21st century face volatility, uncertainty, complexity, and ambiguity as well as high innovation and cost pressure. Systematic planning and development of product profiles and technical systems using the model of SGE – System Generation Engineering according to Albers offers significant potential for support: Through carry-over variation (CV) and the use of internal references, costs and risks can be reduced, while targeted new development using attribute variation (AV) and principle variation (PV) can create new customer, user, and provider benefit. References and types of variation must be selected to fit the future environment in order to succeed in the “survival of the fittest,” which requires knowledge of the relationships between SGE, product environment, and innovation. The aim of this work is therefore to exploratively identify and explain relationships between product environment, variations of technical systems, and their product profiles in the sense of the model of SGE as well as innovation.

The model for describing these relationships is motivated by an analogy between natural evolution and the evolution of technical systems. For the inductive, theory-building research approach, 12 retrospective, literature-based case studies on the evolution of technical systems were conducted, resulting in a research dataset comprising 112 system generations and product profiles, 1195 variations and references, and 405 environmental factors. Cross-case analysis and theory synthesis combine an iterative case-based approach with a variable-based approach.

The result is 79 theory elements, structured into 14 patterns, 39 heuristics, and 26 additional insights. They describe relationships between macroeconomic factors (acceptance, legal frameworks, crises), microeconomic factors (needs, criticism, niche construction), internal company factors (project environment, marketing, business models, standardization), product profile variation (patterns for PV and further development, S-curves), variation of technical systems (architecture, subsystems, solution principles), reference selection (internal and external sources), variant evolution, and responses to failed system generations. These theory elements describe the evolution of technical systems and provide approaches for cross-generational planning of references and variations. This work contributes to explaining the evolution of technical systems and provides a foundation for methodological support to develop system generations with high innovation potential while reducing costs and risks.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zunächst möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers bedanken. Mit dem IPEK und der KaSPro hat er über Doktoranden-Generationen hinweg ein einzigartiges Umfeld für Forschung, Lehre und Innovation geschaffen, von dem ich profitieren durfte. Er hat mir von Beginn an große Freiheit gewährt und große Verantwortung übertragen – sowohl hinsichtlich der Ausgestaltung des Forschungsvorhabens als auch hinsichtlich meines Werdegangs am IPEK. Die Zusammenarbeit war geprägt von Vertrauen, Leistungsdenken und einem stets positiven, inspirierenden Blick in die Zukunft.

Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats. Die Diskussion in Hannover, die laufenden Arbeiten zu Technischer Vererbung & SGE und die weiterführenden Hinweise waren für die Arbeit sehr wertvoll. Bei Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die reibungslose Moderation der Prüfung.

Für zahlreiche Anmerkungen zur vorliegenden Arbeit sowie detaillierten fachlichen Diskussionen möchte ich Herrn Maximilian Kübler, Herrn Carsten Thümmel, Frau Dr.-Ing. Katharina Ritzer und Herrn Dr.-Ing. Simon Rapp herzlich danken. Ich bedanke mich beim gesamten IPEK-Team für die kollegiale Atmosphäre und die Unterstützung, die ich aus allen Bereichen – Institutsleitung, Wissenschaft, IT, Administration und Technische Dienste – erfahren durfte. Gleichmaßen möchte ich allen Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern danken, die ich betreuen durfte. Besonders bedanken möchte ich mich beim Team der Forschungsgruppen Entwicklungsmethodik und -management, Advanced Systems Engineering und CAE/Optimierung für fachliche Diskussionen und viele schöne Momente im und außerhalb des Institutsalltags.

Von ganzem Herzen möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken, dass sie immer an mich geglaubt und mich in allen Lebenslagen unterstützt haben – insbesondere bei meinen Eltern Lothar und Evi, bei meiner Patentante Annette und meinem Bruder Benjamin. Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Frau Anna und meiner Tochter Mila, die mich auch nach langen Tagen mit offenen und liebenden Armen empfangen haben. Ohne Eure Unterstützung wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract.....	iii
Danksagung.....	v
Abbildungsverzeichnis.....	xi
Tabellenverzeichnis.....	xxi
Abkürzungsverzeichnis.....	xxiii
Formelzeichen.....	xxv
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Fokus der Arbeit.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	5
2 Stand der Forschung.....	7
2.1 Innovation und das Umfeld der Produktentwicklung.....	7
2.1.1 Produktentwicklung als Teil der Produktentstehung.....	8
2.1.2 Das Umfeld der Produktentwicklung.....	9
2.1.3 Innovation aus der Perspektive der Produktentwicklung.....	10
2.1.4 Zielgrößen der Produktentwicklung.....	16
2.2 Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen.....	16
2.2.1 Modellierung von Produkten als technische Systeme.....	17
2.2.2 Modellierung von Produktentstehungs- und Produktentwicklungsprozessen.....	19
2.2.3 Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers.....	24
2.2.4 ASE – Advanced Systems Engineering.....	32
2.3 Für die Arbeit relevante Grundlagen der Evolutionstheorie.....	35
2.3.1 Synthetische Evolutionstheorie (Modern Synthesis – MS).....	35
2.3.2 Erweiterte Synthese (Extended Evolutionary Synthesis – EES).....	36
2.3.3 Vergleich der zentralen Konstrukte von MS und EES.....	37
2.4 Durch die Evolutionstheorie motivierte Ansätze in der Entwicklungsmethodik.....	39
2.4.1 Musterbasierte Evolutions-motivierte Ansätze.....	39
2.4.2 Methodische Evolutions-motivierte Ansätze.....	43
2.4.3 Datenbasierte Evolutions-motivierte Ansätze.....	47
2.5 Fazit zum Stand der Forschung.....	52
3 Forschungsbedarf und Zielsetzung.....	55

3.1	Forschungsbedarf	55
3.2	Zielsetzung und Arbeitsthese.....	57
3.3	Forschungsfragen und Prämissen	57
4	Forschungsvorgehen	59
4.1	Forschungsansatz	59
4.2	Forschungsdesign und Forschungsmethoden.....	62
4.2.1	Aufbau des Fallstudien-Datensatzes	64
4.2.2	Datenanalyse und Theoriesynthese	67
5	Beschreibung der Evolution technischer Systeme	73
5.1	Analogiebildung und Entwicklung des Beschreibungsmodells.....	73
5.1.1	Zentrum der Betrachtung – Technisches System und Produktprofil	74
5.1.2	Anpassungsmechanismus und Wechselwirkungen mit der Umwelt	74
5.1.3	Informationsweitergabe an die nächste Generation	76
5.1.4	Variationsmechanismus	77
5.1.5	Generationsübergreifende Evolution	82
5.1.6	Makroevolution	82
5.2	Datenmodell	86
5.3	Zwischenfazit.....	90
6	Retrospektive Fallstudien zur Evolution technischer Systeme.....	93
6.1	Exemplarisch vorgestellte Fallstudie – Apple: iPhone	94
6.1.1	Systemmodell für das iPhone	94
6.1.2	Überblick über die Evolution des iPhone	95
6.2	Resultierender Fallstudien-Datensatz.....	107
6.2.1	Kurzbeschreibung der Fallstudien	107
6.2.2	Eigenschaften des Fallstudien-Datensatzes.....	111
7	Fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese	115
7.1	Makroökonomische Umfeldfaktoren	118
7.1.1	Niedrige Akzeptanz in der Gesellschaft.....	118
7.1.2	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen.....	121
7.1.3	Gesellschaftliche Entwicklungen.....	123
7.1.4	Einfluss von Krisen.....	125
7.2	Mikroökonomische Umfeldfaktoren.....	126
7.2.1	Kunden- und Anwenderbedarfe	127
7.2.2	Kunden- und Anwenderkritik.....	128
7.2.3	Nischenkonstruktion und $G_{i=1}$ -Entwicklung	130
7.3	Unternehmensinterne Umfeldfaktoren	139
7.3.1	Entwicklung mit hohem Neuentwicklungsanteil unterstützen ...	140

7.3.2	Abstimmung von SGE und Marketing-Maßnahmen	141
7.3.3	Geschäftsmodellentwicklung und SGE	142
7.3.4	Standardisierung	144
7.4	Variation des Produktprofils	148
7.4.1	Heuristiken für Produktprofil-PV	151
7.4.2	Produktprofil-Variationsmuster	153
7.4.3	Produktprofil-S-Kurve	155
7.4.4	Produktprofil-PV und PV im technischen System	157
7.5	Variation des technischen Systems	158
7.5.1	Weiterentwicklung der Architektur	161
7.5.2	Variationsanteile im Gesamtsystem	162
7.5.3	Variationsanteile auf Subsystem-Ebene	175
7.5.4	Variationsmuster auf Subsystem-Ebene	180
7.6	Referenzsystem	185
7.6.1	RSE aus älteren Vorgängergenerationen und für zukünftige Systemgenerationen	187
7.6.2	RSE aus dem Wettbewerbsumfeld	189
7.6.3	RSE aus und für Standards	191
7.6.4	RSE aus anderen Branchen	192
7.6.5	Interne RSE aus anderen Linien (linienextern)	194
7.6.6	Externe RSE zu internen machen	195
7.7	Evolution von Produktvarianten	197
7.7.1	Leitvarianten-Systemgenerationen	200
7.7.2	Übergreifender Charakter der Evolution von Produktvarianten	202
7.7.3	Entstehung neuer Produktvarianten	203
7.7.4	Bildung höher eingeordneter Produktvarianten	203
7.7.5	Bildung niedriger eingeordneter Produktvarianten	205
7.8	Ursachen für und Reaktionen auf Scheitern	209
7.8.1	Scheitern früher Systemgenerationen	211
7.8.2	Scheitern später Systemgenerationen	211
7.9	Zwischenfazit	213
8	Zusammenfassung und Gesamtfazit	215
8.1	Motivation, Forschungsziel und Forschungsvorgehen	215
8.2	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	218
8.3	Beitrag und Implikationen	224
9	Ausblick	227
9.1	Weitere Untersuchung der Evolution technischer Systeme	227
9.2	Weiterentwicklung des Modells der SGE	228
9.3	Entwicklung methodischer Unterstützung	228
9.4	Datenbasierte Ansätze im Advanced Systems Engineering	230

Literaturverzeichnis.....	I
Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Forschungsarbeit am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden:.....	XXXV
Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind:.....	XXXVII
Anhang A Fallstudien	XLI
Xiaomi: Mi Ultra.....	XLI
Toyota: Getriebe des Hybrid Synergy Drive	XLV
Volkswagen: Doppelkupplungsgetriebe	LIV
Google: Glass	LX
Vorwerk: Thermomix.....	LXV
Sony: PlayStation.....	LXXI
BYD: Traktionsbatterie.....	LXXVII
Ultimate Ears: Boom.....	LXXXII
SEW: Fahrerloses Transportsystem.....	LXXXVIII
SpaceX: Falcon.....	XCV
ArianeGroup: Ariane	C
Anhang B Playbook	CVII
Auszug aus dem Playbook	CVII
Auswertung der Live-Lab Studie.....	CX
Anhang C Einsatz Generativer KI.....	CXI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Schematische Darstellung der Mechanismen der natürlichen Evolution nach der Modern Synthesis am Beispiel der Evolution von Vögeln (stark vereinfacht).	2
Abbildung 1.2:	Schematische Darstellung der zentralen Elemente des Modells der SGE im Kontext von Umfeld und Innovation am Beispiel der Entwicklung eines internetfähigen Fahrzeugs (stark vereinfacht).	3
Abbildung 1.3:	Thema der Arbeit sowie adressierte und relevante Forschungsfelder dargestellt in einem ARC-Diagramm (Areas of Relevance and Contribution) nach Blessing und Chakrabarti (2009).	4
Abbildung 2.1:	Integrationsbereiche des Themenfeldes Innovationsprozesse und Produktentwicklung nach Albers & Gausemeier (2012). Eigene Darstellung.	9
Abbildung 2.2:	Innovationsportfolio nach Henderson und Clark (1990). Eigene Darstellung.	11
Abbildung 2.3:	Elemente einer Innovation nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018). Übersetzte Darstellung nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018).	12
Abbildung 2.4:	Produktprofil-Schema zur Darstellung von Produktprofilen. Angepasste Darstellung nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018). Eigene Darstellung.	13
Abbildung 2.5:	Schematische Darstellung der Lebenszyklen von Produktgenerationen, Technologien und Branchen (Wesner, 1977), Darstellung nach Albers, Bursac et al. (2017).	15
Abbildung 2.6:	Funktionales, struktureles und hierarchisches Konzept. Darstellung nach Ropohl (2009). Eigene Darstellung.	17
Abbildung 2.7:	Co-evolutionäre Entwicklung des Ziel- und Objektsystems durch abwechselnde Analyse- und Syntheseaktivitäten des Handlungssystems (erweitertes ZHO-System). Übersetzte Darstellung nach (Albers, Lohmeyer et al., 2011).	20
Abbildung 2.8:	iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016).	23

Abbildung 2.9:	Die zwei zentralen Grundhypothesen des Modells der SGE am Beispiel der Entwicklung einer Smart-Home Branderkennung. Angepasste Darstellung nach Albers & Rapp (2022).....	27
Abbildung 2.10:	Zwei beispielhafte Entwicklungssituationen als Beispiel für die Verwendung der Indizes i und n im Modell der SGE.....	29
Abbildung 2.11:	Beschreibungsmodell für die Weiterentwicklung von Produktportfolios (Schlegel et al., 2023). Orange: Aufgrund eines Auslösers auf Linienebene veränderte Elemente; Blau: Aufgrund eines Auslösers auf Subsystemebene veränderte Elemente; Grün: beibehaltene Elemente des Produktportfolios.	30
Abbildung 2.12:	SGE Risikoportfolio am Beispiel der ersten Generation des Zweimassenschwungrads. Angepasste Darstellung nach Albers et al. (2017).....	31
Abbildung 2.13:	Kontinuierliches Wechselspiel zwischen domänenspezifischer Entwicklung und domänenübergreifender Vernetzung im Advanced Systems Engineering. Angepasste Darstellung nach Albers (2023a, S. 8).....	33
Abbildung 2.14:	Lebenslinie technischer Systeme als S-Kurve nach (Altshuller, 1986). Eigene Darstellung.	41
Abbildung 2.15:	Entwicklungsgesetze der Technik aufgeteilt in die Kategorien Aufbau-, Bewegungs- und Tendenzgesetze nach Klein (2014, S. 132), der auf Altshuller (1986) und Zlotin & Zusman (2013) aufbaut. Eigene Darstellung.	42
Abbildung 2.16:	Die fünf Phasen von Directed Evolution in Bezug zu Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft (Zeihisel et al., 2013). Eigene Darstellung.	45
Abbildung 2.17:	Durchbrechen der evolutionären Spirale mit WOIS (Linde et al., 1996). Eigene Darstellung.	46
Abbildung 2.18:	Radträger mit integrierter Sensorik als Beispiel für eine Gentelligente Komponente und Anwendungsfall der Technischen Vererbung. Übersetzte Darstellung nach Lachmayer et al. (2014).....	49
Abbildung 2.19:	Generationsübergreifende Betrachtung einer technischen Vererbung (Gottwald, 2016).	50
Abbildung 2.20:	Netzwerkmodell der Systemstruktur einer iPhone-Produktgeneration. Das Kantengewicht wird über die Art der Bauteilverbindung bestimmt. Reproduced from Li et al. (2022),	

	Towards the evolution characteristics of product structural properties based on the time-dependent network, Journal of Engineering Design, © copyright 2022, reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, https://www.tandfonline.com	51
Abbildung 2.21:	Zeitabhängiges Netzwerkmodell für generationsübergreifende Systemstrukturen. Reproduced from Li et al. (2022), Towards the evolution characteristics of product structural properties based on the time-dependent network, Journal of Engineering Design, © copyright 2022, reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, https://www.tandfonline.com	52
Abbildung 4.1:	Der Zyklus der Theoriesynthese und -prüfung, der den „spiralförmigen“ Aufbau wissenschaftlicher Erkenntnis zeigt (Cash, 2018, S. 88). Eigene Darstellung.	61
Abbildung 4.2:	Forschungsdesign der Arbeit – Verbindung der Forschungsfragen mit den Forschungsmethoden, den Ergebnissen und der Struktur der Arbeit. Der Farbverlauf zwischen FF2 und FF3 visualisiert deren gemeinsame Bearbeitung in der fallübergreifenden Analyse und dem zugehörigen Ergebnisteil.	62
Abbildung 4.3:	Vorgehen für die fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese anhand beispielhafter Theoriebausteine (TB1-4)	68
Abbildung 5.1:	Systemgeneration G_i als hierarchisches Systemmodell mit zugehörigem Produktprofil als zentrale Modellelemente zur Beschreibung der Evolution technischer Systeme.	74
Abbildung 5.2:	Umfeldfaktoren auf den drei Umfeld-Ebenen beeinflussen die Systemgenerationsentwicklung. Die Systemgeneration stellt sich als Innovation oder gescheiterte Invention heraus.	76
Abbildung 5.3:	Hinzukommen bzw. Wegfallen von Subsystemen auf explizit modellierten Systemebenen.	78
Abbildung 5.4:	Nicht Explizit modellierte Ebene: Modellierung über die Variationsart des Supersystems.	79
Abbildung 5.5:	Grundhypothesen des Modells der SGE und Weiterentwicklung von Umfeldfaktoren im Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme.....	81
Abbildung 5.6:	Makroevolution über Produktlinien, -Familien und -Varianten..	83

Abbildung 5.7:	Datenmodell mit drei Tabellen und den Beziehungen zwischen den Tabellen.	87
Abbildung 5.8:	Auszug aus der zentralen Visualisierung der Fallstudie Thermomix (wird im Text erklärt).....	89
Abbildung 6.1:	Systemmodell für die Fallstudie Apple iPhone anhand der $G_{11}^{\text{iPhone, X}}$ (Goldheart, 2017, https://de.ifixit.com/Teardown/iPhone+X+Teardown/98975 , Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/).	95
Abbildung 6.2:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 1 links.....	96
Abbildung 6.3:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 1 rechts.	97
Abbildung 6.4:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 2 links.....	98
Abbildung 6.5:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 2 rechts.	99
Abbildung 6.6:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 3 links.....	100
Abbildung 6.7:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 3 rechts. ...	101
Abbildung 6.8:	Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie iPhone. Innerhalb einer Systemgeneration sind die Produktvarianten abnehmend sortiert mit der High-End-Variante links.	104
Abbildung 6.9:	Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und des Produktprofil-Claims für die Fallstudie iPhone.	105
Abbildung 6.10:	Häufigkeit der Variationsarten, Herkunft der RSE und Markterfolg über die Datenpunkte im Datensatz.	111
Abbildung 6.11:	Verteilung der Datenpunkte zu Variationen über die Fallstudien.	112
Abbildung 6.12:	Verteilung der Datenpunkte zu Umfeldfaktoren über die Fallstudien.	112
Abbildung 7.1:	Einordnung der Unterkapitel zu den Theoriebausteinen in das Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme. ...	116
Abbildung 7.2:	H01: Auf niedrige Akzeptanz in der Gesellschaft mit PV reagieren. In der Abbildung ist die reaktive Anwendung bezogen auf die die $G_{i=n-1}$ dargestellt.	119
Abbildung 7.3:	H02: Proaktive (Über-)Erfüllung von rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen.	121
Abbildung 7.4:	H03: Umgehung von rechtlichen Rahmenbedingungen. Die Abbildung zeigt die reaktive Anwendung.	123

Abbildung 7.5:	H04: Mitnahme gesellschaftlicher Entwicklungen durch AV. Die Abbildung zeigt die proaktive Anwendung.....	124
Abbildung 7.6:	E03: Bedarfe wirken auf unterschiedlichen Ebenen der Evolution.	128
Abbildung 7.7:	H05: Auf Kundenkritik unmittelbar mit Neuentwicklung reagieren.	129
Abbildung 7.8:	E04: Markteinführung in Nische mit hohem Wettbewerbsdruck und hoher Nachfrage vs. niedrigem Wettbewerbsdruck und niedriger Nachfrage. Die Abbildung zeigt Kategorie A, Referenzsysteme wurden nicht abgebildet.	131
Abbildung 7.9:	H06: Neue Nische als etablierter Anbieter mit wenig PV erschließen. Die Einflusspfeile der Umfeldfaktoren wurden nicht abgebildet.....	134
Abbildung 7.10:	H07: G ₁ als etablierter Anbieter in umkämpfter Nische platzieren. Die Einfluss-Pfeile der Umfeldfaktoren wurden nicht abgebildet.....	135
Abbildung 7.11:	H08: G ₁ als Start-up in bestehender, aber wenig umkämpfter Nische platzieren.	136
Abbildung 7.12:	H09: Niedrigen Wettbewerbsdruck der frühen Generationen für AV/PV nutzen.....	137
Abbildung 7.13:	H10: In der Nischenkonstruktion bei steigendem Wettbewerb bestehen	138
Abbildung 7.14:	E06: Abstimmung von SGE und Marketing-Maßnahmen.	141
Abbildung 7.15:	E07: Entwicklung von Geschäftsmodellen in Generationen...	142
Abbildung 7.16:	H11: PV des Geschäftsmodells tritt gemeinsam mit PV des Produktprofils und des technischen Systems auf.....	143
Abbildung 7.17:	H12: Einführungsstrategien für Standardisierungsmethoden – neuen Standard setzen vs. evolutionäre Einführung. Produktprofile wurden nicht abgebildet.....	145
Abbildung 7.18:	E09: Entwicklung von Variationsanteilen nach der Einführung von Standardisierungsmethoden	147
Abbildung 7.19:	Tabellarische Übersicht der Produktprofil-Claim-Variationen in den Fallbeispielen.	149
Abbildung 7.20:	H14: Produktprofil-S-Kurve.....	156
Abbildung 7.21:	H15: Produktprofil-PV braucht Hoch-PV-Systemgeneration zur Realisierung.	157

Abbildung 7.22:	H16: Externe RSE für Architekturänderung.	162
Abbildung 7.23:	Variationsanteile je Systemgeneration Teil 1.	163
Abbildung 7.24:	Variationsanteile je Systemgeneration Teil 2.	164
Abbildung 7.25:	Schematische Darstellung der Kategorien von Systemgenerationen.	166
Abbildung 7.26:	Hoch-PV- und Niedrig-PV-Systemgenerationen sowie Systemgenerationen mit dem höchsten PV-Anteil.	167
Abbildung 7.27:	H17: Hoch-PV-Systemgenerationen als zukünftige RSE-Quelle.	168
Abbildung 7.28:	H18: Hoch-PV mit Hoch-CV kombinieren.	170
Abbildung 7.29:	H19: Hoch-CV und einzelne PV mit Fokus auf den Hauptnutzen.	171
Abbildung 7.30:	H20: $\delta CV = 100\%$ durch vorausschauend entwickelte interne RSE.	173
Abbildung 7.31:	Exemplarische Darstellung von Subsystemen für jede der sechs Kategorien.	176
Abbildung 7.32:	Überblick über die Kategorien für die Herkunft der Referenzsystemelemente und Verteilung der Kategorien im Datensatz und in den Fallstudien.	186
Abbildung 7.33:	H22: Mehrere Generationen zurückliegende RSE für PV.	187
Abbildung 7.34:	H23: Nicht verwendete RSE nachverfolgbar halten durch einen kontinuierlichen RSE Speicher.	188
Abbildung 7.35:	H24: Wettbewerber und deren Evolution subsystembezogen als RSE-Quellen verstehen.	190
Abbildung 7.36:	H27: Interne Evolutionen über die Referenzsysteme koppeln.	194
Abbildung 7.37:	H28: Externe RSE zu internen machen zur Senkung des Wissensdefizits.	196
Abbildung 7.38:	Gewichtete Kanten im Beschreibungsmodell.	198
Abbildung 7.39:	Graphen zu den Fallstudien im Vergleich.	199
Abbildung 7.40:	H30: PV für neuen Nutzen in höher eingeordneten Produktvarianten.	204
Abbildung 7.41:	H31: Unterlegene, dafür niedriger eingeordnete Produktvariante.	206
Abbildung 7.42:	H32: Gleichziehen im Hauptnutzen, sparen am Nebennutzen.	207

Abbildung 7.43:	E16: Ohne Invention kein Innovationspotenzial.	212
Abbildung 8.1:	Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme mit zentralen Elementen und Relationen. Dargestellt ist die im Rahmen der Arbeit gezeigte retrospektive Anwendung – das Modell kann theoretisch auch für die Beschreibung geplanter zukünftiger Systemgenerationen angewendet werden.....	219
Abbildung 8.2:	Überblick über die Theoriebausteine.	221
Abbildung A.1:	Die fünf untersuchten Systemgenerationen des Mi Ultra (Bildquellen: Notebookcheck, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024).	XLII
Abbildung A.2:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie Mi Ultra.	XLIII
Abbildung A.3:	Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (links) und Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (rechts) für die Fallstudie Mi Ultra.....	XLIV
Abbildung A.4:	Systemmodell für die Fallstudie Toyota Hybrid Synergy Drive Hybridgetriebe anhand des $G_1^{THS-G, P110}$. Charakteristisch sind die Kette im Abtrieb zum Differenzial, das einfache Planetengetriebe und das koaxiale Layout der Kraftmaschinen. Abbildung nach Eberhardt (2022).	XLVI
Abbildung A.5:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie THS-G Teil 1 (links).	XLVIII
Abbildung A.6:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie THS-G Teil 1 (rechts).	XLIX
Abbildung A.7:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie THS-G Teil 2 (links).....	L
Abbildung A.8:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie THS-G Teil 2 (rechts). ...	LI
Abbildung A.9:	Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie THS-G.	LIII
Abbildung A.10:	Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und des Produktprofil-Claims für die Fallstudie THS-G.....	LIII
Abbildung A.11:	Systemmodell für die Fallstudie VW DCT anhand der $G_1^{MT, DQ250}$ (Schnittdarstellung nach Naunheimer et al., 2019, S. 552).	LV
Abbildung A.12:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie VW DCT.	LVII
Abbildung A.13:	Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie VW DCT.	LIX
Abbildung A.14:	Zwei der vier untersuchten Systemgenerationen der Google Glass (Bildquellen: $G_1^{Explorer\ Ed.}$: Cooper Hewitt - Design	

	Museum, 2017, Lizenz CC0; G ₃ ^{Enterprise Ed.} : Notebookcheck 2017).....	LX
Abbildung A.15:	Systemmodell für die Fallstudie Google Glass anhand der G ₁ ^{Explorer Ed.} (Teardown-Abbildung aus Torborg & Simpson, 2014, http://www.catwig.com/google-glass-teardown/ , Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)	LXI
Abbildung A.16:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie Google Glass.	LXII
Abbildung A.17:	Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie Google Glass.	LXIII
Abbildung A.18:	Systemmodell für die Fallstudie Thermomix anhand der G ₇ ^{TM5} (Teardown-Abbildung nach Isakeit, 2018, https://de.ifixit.com/Teardown/Thermomix+TM5+Teardown/117133 , Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/). Die Elektronik-Hardware (*) und Software wurden in der Fallstudie nicht detailliert betrachtet.	LXVI
Abbildung A.19:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie Thermomix Teil 1. ...	LXVII
Abbildung A.20:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie Thermomix Teil 2. ..	LXVIII
Abbildung A.21:	Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie Thermomix. ...	LXX
Abbildung A.22:	Systemmodell für die Fallstudie PlayStation anhand der G ₁ ^{PlayStation} (Teardown-Abbildung nach Lloyd, 2019, https://de.ifixit.com/Teardown/Teardown+der+Sony+PlayStation/128089 , Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/). Die erste Systemgeneration war rein konvektionsgekühlt, weshalb das Kühlsystem (3) keine zusätzliche Hardware benötigte.	LXXII
Abbildung A.23:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie PlayStation.	LXXIII
Abbildung A.24:	Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie PlayStation.	LXXV
Abbildung A.25:	Zwei der sechs untersuchten Systemgenerationen der BYD Traktionsbatterien. (Bildquellen: G ₁ ^{F3DM} : Batteriepack-Gehäuse, Zhao, Jiang & Chen, 2006,	

<https://patents.google.com/patent/CN100595946C/en>, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) G₆^{han}:

Blade-Batterie-Pack auf der IAA 2023, Blume, 2023,

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IAA_Summit_2023,Munich\(P1110715\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IAA_Summit_2023,Munich(P1110715).jpg), Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

..... LXXVII

Abbildung A.26: Zentrale Visualisierung der Fallstudie BYD Batterie..... LXXIX

Abbildung A.27: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie BYD Batterie. LXXX

Abbildung A.28: Systemmodell für die Fallstudie UE Boom anhand der G₃^{UE Boom, Boom} (Bildzitat gem. § 51 UrhG zur inhaltlichen Analyse des Videos von Thao, 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=0-R46ZLkiMk>). LXXXIII

Abbildung A.29: Zentrale Visualisierung der Fallstudie UE Boom. LXXXIV

Abbildung A.30: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie UE Boom. LXXXVI

Abbildung A.31: Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und des Produktprofil-Claims für die Fallstudie UE Boom. LXXXVII

Abbildung A.32: Systemmodell für die Fallstudie SEW DTS anhand eines der G₂ ähnlichen Systems. Die Subsysteme 5, 6, 8, 9, 17, 24 sind nicht sichtbar. Die Subsysteme 11, 13, 19, 22, 23, 25 sind im dargestellten System nicht vorhanden (Bildzitat gem. § 51 UrhG zur inhaltlichen Analyse: SEW-EURODRIVE, 2024, <https://www.sew-eurodrive.de/automatisierung/maxolution-systemloesungen/mobile-systeme/mobile-transportssysteme/mobile-transportssysteme.html>)..... LXXXIX

Abbildung A.33: Zentrale Visualisierung der Fallstudie SEW DTS Teil 1.XC

Abbildung A.34: Zentrale Visualisierung der Fallstudie SEW DTS Teil 2.XCI

Abbildung A.35: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie SEW DTS.XCII

Abbildung A.36: Vergleich der Variationsanteile je Subsystem für die Fallstudie SEW DTS..... XCIV

Abbildung A.37: Die fünf untersuchten Systemgenerationen der SpaceX Falcon (Lucabon, 2017, *Falcon rocket family*,

	https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Falcon_rocket_family4.svg , Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-SA 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).XCV
Abbildung A.38:	Systemmodell für die Fallstudie SpaceX Falcon anhand der $G_{4, \text{Falcon 9 FT}}$. Die Subsysteme <i>Flugcomputer</i> und <i>Navigation</i> sind nicht abgebildet (Lucabon, 2017, <i>Falcon rocket family</i> , https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Falcon_rocket_family4.svg , Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-SA 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/). XCVI
Abbildung A.39:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie Falcon. XCVIII
Abbildung A.40:	Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie SpaceX Falcon. C
Abbildung A.41:	Die sechs untersuchten Systemgenerationen der Ariane (Bildquellen: G_5 bis G_9 aus DLR, 2023, https://www.dlr.de/de/bilder/raumfahrt/missionen/ariane5_versionen , Lizenz: CC BY-NC-ND 3.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.de , G_{10} : SkywalkerPL, 2017, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ariane_62_and_64.svg , Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY 3.0, https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). CI
Abbildung A.42:	Systemmodell für die Fallstudie ArianeGroup: Ariane anhand der $G_{7, \text{Ariane 5 ECA}}$. Die Subsysteme 3, 7, 8 sind nicht abgebildet (Bildquelle: ©ESA, ESA – European Space Agency, 2004). .. CII
Abbildung A.43:	Zentrale Visualisierung der Fallstudie Ariane..... CIII
Abbildung A.44:	Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie Ariane..... CIV
Abbildung B.45:	Auswertung der Live-Lab Studie. CX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Definitionen der Standardisierungsmethoden nach Albers, Scherer et al. (2015), Übersetzung nach Bursac (2016).....	18
Tabelle 2.2:	Vergleich der zentralen Konstrukte der MS und der EES, zusammengefasst aus Laland et al. (2015).....	38
Tabelle 2.3:	Definition von Elementen der Technischen Vererbung analog zu Elementen der natürlichen Evolution nach (Mozgova et al., 2015, S. 5–6), Übersetzung nach Rapp (2021).....	47
Tabelle 4.1:	„Process of Building Theory from Case Study Research“, übersetzt und zusammengefasst nach Eisenhardt (1989, S. 533):	60
Tabelle 4.2:	Überblick über die zwölf Fallstudien.	65
Tabelle 4.3:	Vorgehen für den Aufbau des Fallstudien-Datensatzes.	66
Tabelle 4.4:	Fallunterscheidung für die Auftretenshäufigkeit Heuristiken. ...	70
Tabelle 5.1:	Vergleich der zentralen Konstrukte der MS und der EES, zusammengefasst aus Laland et al. (2015), mit den analogen Konstrukten der Evolution technischer Systeme.	85
Tabelle 7.1:	Überblick über die Theoriebausteine zu makroökonomischen Umfeldfaktoren und deren Anwendung in der Produktentwicklung.	118
Tabelle 7.2:	Überblick über die Theoriebausteine zu mikroökonomischen Umfeldfaktoren und deren Anwendung in der Produktentwicklung.	126
Tabelle 7.3:	Überblick über die Theoriebausteine zu unternehmensinternen Umfeldfaktoren und deren Anwendung in der Produktentwicklung.	139
Tabelle 7.4:	Überblick über die Theoriebausteine zur Variation des Produktprofils und deren Anwendung in der Produktentwicklung.	150
Tabelle 7.5:	Überblick über die Theoriebausteine zur Variation technischer Systeme und deren Anwendung in der Produktentwicklung. .	159
Tabelle 7.6:	Median der Variationsanteile für die Fallstudien.....	166

Tabelle 7.7:	Überblick über die Theoriebausteine zu Referenzsystemen und deren Anwendung in der Produktentwicklung.	185
Tabelle 7.8:	Überblick über die Theoriebausteine zur Evolution von Produktvarianten und deren Anwendung in der Produktentwicklung.....	200
Tabelle 7.9:	Ursachen des Scheiterns in den Fallstudien und Einordnung in die Ursachen-Kategorien nach Bauer (2006): 1) technische Probleme, 2) Konkurrenzsituation, 3) Fehleinschätzung der potenziellen Nutzer, 4) zu hoher Neuheitsgrad, 5) instabiles Produktumfeld.....	210
Tabelle 7.10:	Überblick über die Theoriebausteine zu Ursachen für und Reaktionen auf Scheitern und deren Anwendung in der Produktentwicklung.....	211
Tabelle 8.1:	Überblick über die Fallstudien.	217

Abkürzungsverzeichnis

3D-NAND	Vertikal gestapelte Flash-Speicher-Zellen
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
ASE	Advanced Systems Engineering
AV	Ausprägungsvariation
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BMS	Batteriemanagementsystem
CPU	Central Processing Unit
CV	Übernahmevariation (engl. Carryover Variation)
DNA	deoxyribonucleic acid / DNS: Desoxyribonukleinsäure
EES	Erweiterte Synthese (engl. Extended Evolutionary Synthesis)
GPU	Graphics Processing Unit
GTO	Geostationary Transfer Orbit (geostationärer Transferorbit)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybrid-Elektrofahrzeug / Hybridfahrzeug)
I/O	Input/Output (Ein-/Ausgabe)
Kap.	Input/Output (Ein-/Ausgabe)
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KI	Künstliche Intelligenz
Konn.	Konnektivität
LEO	Low Earth Orbit (niedriger Erdborbit)
LiFePO ₄	Lithium-Eisen-Phosphat (Akkutechnologie)
Li-Ionen	Lithium-Ionen (Akkutechnologie)
Li-Po	Lithium-Polymer (Akkutechnologie)

MS	Modern Synthesis (Synthetische Evolutionstheorie)
NCM	Nickel-Cobalt-Mangan (Kathodenmaterialchemie)
Nr.	Nummer
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeug)
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Prinzipvariation
RAM	Random Access Memory (Arbeitsspeicher)
RMB	Renminbi Yuan
SGE	Systemgenerationsentwicklung
SQL	Structured Query Language
SUV	Sport Utility Vehicle
SysML	Systems Modeling Language
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens (russ.: Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VUKA	Volatilität, Unsicherheit, Komplexität, Ambiguität

Formelzeichen

G_i	Systemgeneration
R_i	Referenzsystem
V	Summe der Variationsaktivitäten für S_i
S_i	Menge aller Subsysteme der G_i .
CS_i, AS_i, PS_i	Teilmenge der Subsysteme der G_i , die durch CV, AV, PV entwickelt werden
$ S_i $	Anzahl aller Subsysteme der G_i
$ CS_i , AS_i , PS_i $	Anzahl der mit CV, AV, PV entwickelten Subsysteme
$\delta_{CV,i}, \delta_{AV,i}, \delta_{PV,i}$	Variationsanteile für eine Produktgeneration G_i
$\delta_{ND,i}$	Neuentwicklungsanteil für eine Produktgeneration G_i
F	Fallstudie
$\delta_{CV,i}^F, \delta_{AV,i}^F, \delta_{PV,i}^F$	Variationsanteile der Systemgeneration G_i der Fallstudie F
$\tilde{\delta}_{CV}^F, \tilde{\delta}_{AV}^F, \tilde{\delta}_{PV}^F$	Median der Variationsanteile der Fallstudie F
s	Subsystem
$ s $	Anzahl aller Systemgenerationen eines Subsystems s
$ CV, s , AV, s , PV, s $	Anzahl aller Systemgenerationen des Subsystems s , die mit der CV, AV, PV entwickelt wurden
$\delta_{CV,s}^F, \delta_{AV,s}^F, \delta_{PV,s}^F$	Subsystembezogener Variationsanteil des Subsystems s der Fallstudie F

1 Einleitung

Analogiebildung zwischen Biologie und Technikwissenschaft hat mehrfach zu Erfolgen und sogar Paradigmenwechseln geführt. Mitte des 20. Jahrhunderts wurden unterschiedliche Aspekte der Systemtheorie unter anderem vom Biologen Bertalanffy zur allgemeinen Systemtheorie zusammengefasst (Rosen, 1969). Aus der allgemeinen Systemtheorie entwickelte Ropohl (2009) die Systemtheorie der Technik zur Beschreibung (sozio-)technischer Systeme. Ein weiteres Beispiel ist die in den 1960er Jahren aufkommende Wissenschaft der Bionik, welche die technische Umsetzung von Prinzipien der Natur verfolgt (Nachtigall, 2010). Auch Künstliche Intelligenz, die aktuell weitreichende Auswirkungen auf die Arbeitsweise in vielen Disziplinen hat (Michael et al., 2023), hat ihre Ursprünge in der Analogiebildung: McCulloch und Pitts (1943) legten die theoretische Grundlage für künstliche neuronale Netze durch Abstraktion der Funktionsweise biologischer Neuronen. Seit den 1990er Jahren finden genetische Algorithmen, die natürliche Evolutionsmechanismen imitieren, breite Anwendung für Such- und Optimierungsprobleme (Goldberg, 1989), unter anderem in der Produktentwicklung auf dem Gebiet des Computer Aided Engineering (CAE) (Bentley, 1999).

1.1 Motivation

Auch diese Arbeit auf dem Feld der Produktentwicklung wird durch eine Analogie zwischen Biologie und Technikwissenschaften motiviert: Charles Darwin (1859/2003) hat erkannt, dass von mehreren Populationen diejenige im „Survival of the fittest“ besteht, die sich am besten an stetig verändernde Umweltbedingungen anpasst. Arten und deren Individuen bestehen fort, indem sie sich unter diesem Evolutionsdruck an neue Gegebenheiten anpassen. Im Allgemeinen wird unter der Evolutionstheorie die aus den darwinschen Erkenntnissen zur Selektion und den mendelschen Erkenntnissen zur Genetik hervorgegangene Synthetische Evolutionstheorie (Modern Synthesis – MS) verstanden, deren zentrale Konstrukte in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt werden. Die MS beschreibt und erklärt die Variation des Genmaterials der nächsten Generation durch zufallsgesteuerte Rekombination und Mutation der elterlichen DNA. Die natürliche Selektion bestimmt, welche der aus den genetischen Informationen hervorgehenden Individuen ihr Erbgut an die nächste Generation weitergeben. Neuere Erkenntnisse bringen neben der natürlichen Selektion weitere Evolutionsmechanismen in die

Theorie der Erweiterten Synthese (Extended Evolutionary Synthesis – EES) ein (Laland et al., 2015).

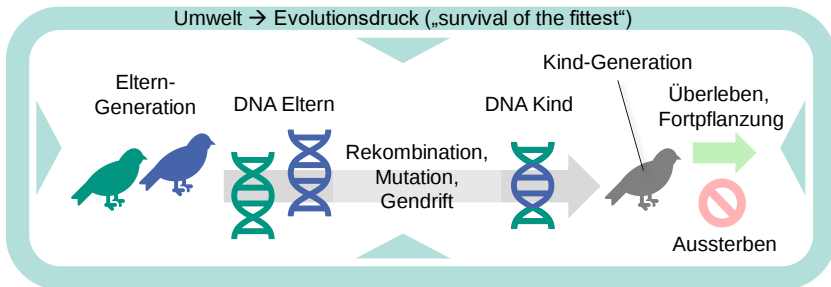


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Mechanismen der natürlichen Evolution nach der Modern Synthesis am Beispiel der Evolution von Vögeln (stark vereinfacht).

In Analogie zur Biologie kann auch die Entwicklung neuer Produkte und der Wettbewerb um einen Platz im Markt als Evolution verstanden werden: Produkte müssen im sich stetig verändernden Umfeld von Recht, Politik, Gesellschaft, Umwelt und Markt von Produktentwickelnden weiter- und neuentwickelt werden, um Fortschritt zu ermöglichen und sich gegenüber dem Wettbewerb durchzusetzen (Arthur, 2009). Setzt sich eine neue technische Lösung, eine Invention, erfolgreich am Markt durch, so kann diese als Innovation bezeichnet werden (Schumpeter, 1934). Im Gegensatz zur natürlichen Evolution ist die Produktentstehung kein selbstregulierendes System – der Mensch steht im Mittelpunkt der Produktentstehung (Albers, 2010) und ist für die Entwicklung neuer technischer Lösungen unter diesem Innovationsdruck verantwortlich (acatech, 2012).

Mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers (Albers, Bursac et al., 2015; Albers & Rapp, 2022) kann die Entwicklung neuer technischer Systeme auf Basis von Referenzen und in Generationen beschrieben werden. Demnach werden die Subsysteme neuer Systemgenerationen basierend auf Elementen eines Referenzsystems mithilfe von drei Variationsarten entwickelt: Übernahmevariation (ÜV), Ausprägungsvariation (AV) und Prinzipvariation (PV). Abbildung 1.2 zeigt die zentralen Elemente des Modells der SGE im Kontext von Umfeld und Innovation.

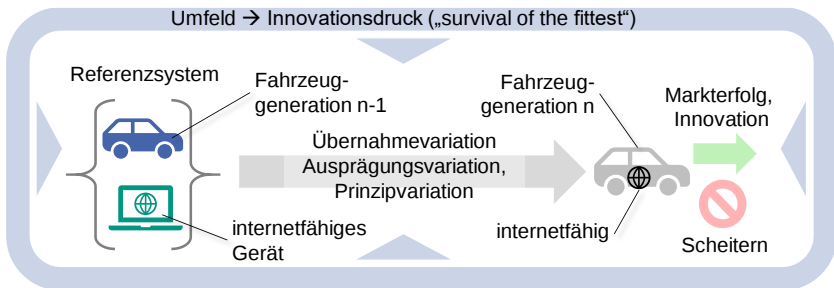


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der zentralen Elemente des Modells der SGE im Kontext von Umfeld und Innovation am Beispiel der Entwicklung eines internetfähigen Fahrzeugs (stark vereinfacht).

Wissen, beispielsweise in Form von Mustern, über die „Evolution technischer Systeme“ – also Wissen über Zusammenhänge von Umfeld, Systemgenerationsentwicklung und Innovation – hat das Potenzial, die Entwicklung neuer Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial, niedrigen Kosten und niedrigem Risiko zu unterstützen (Pfaff, Kempf et al., 2022).

1.2 Fokus der Arbeit

Vor dem Hintergrund des beschriebenen Potenzials der Evolutionsanalogie verfolgt diese Arbeit das Ziel, Ansätze aufzuzeigen, wie neue Systemgenerationen so entwickelt werden können, dass sie zum Umfeld passen, ein hohes Innovationspotenzial bieten und gleichzeitig Kosten sowie Risiken reduziert werden. Dazu untersucht diese Arbeit die Evolution technischer Systeme aus der Perspektive der Produktentwicklung. Die Ergebnisse adressieren im Speziellen die Produktentwicklung mit dem Integrationsbereich der strategischen Produktentwicklung, indem auch die generationsübergreifende Planung und Entwicklung von Systemgenerationen untersucht wird (vgl. Kapitel 2.1.1). Als theoretischer Bezugsrahmen für die Beschreibung der Evolution technischer Systeme und die Einordnung der Erkenntnisse dient die KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung, die mit dem Modell der SGE (vgl. Kapitel 2.2.3) und dem auf Schumpeter (1934) aufbauenden Innovationsverständnis (vgl. Kapitel 2.1.3) bereits zentrale theoretische Konstrukte zur Beschreibung der Evolution technischer Systeme integriert.

Auch der Forschungsansatz dieser Arbeit wird durch eine Analogie zur Evolutionsforschung motiviert: Da Innovation Markterfolg voraussetzt, können

Produkte immer nur retrospektiv und für ein bestimmtes Umfeld als Innovation klassifiziert werden (Arthur, 2009; Bauer, 2006). Um die Mechanismen der natürlichen Selektion zu beschreiben, war Darwin auf Fallstudien angewiesen, die teilweise auf eigenen Beobachtungen in der Natur und teilweise auf Sammlungen konservierter Organismen basierten (Darwin, 1859/2003). In dieser Arbeit werden Fallstudien zur Evolution technischer Systeme über mehrere Systemgenerationen und eine fallübergreifende Analyse verwendet, um Heuristiken, Muster und weitere Erkenntnisse zu den Zusammenhängen von Systemgenerationsentwicklung, Produktumfeld und Innovation induktiv herzuleiten. Abbildung 1.3 zeigt das Thema dieser Arbeit, essenzielle relevante und hilfreiche Forschungsfelder sowie Forschungsfelder, zu denen ein Beitrag geleistet werden soll.

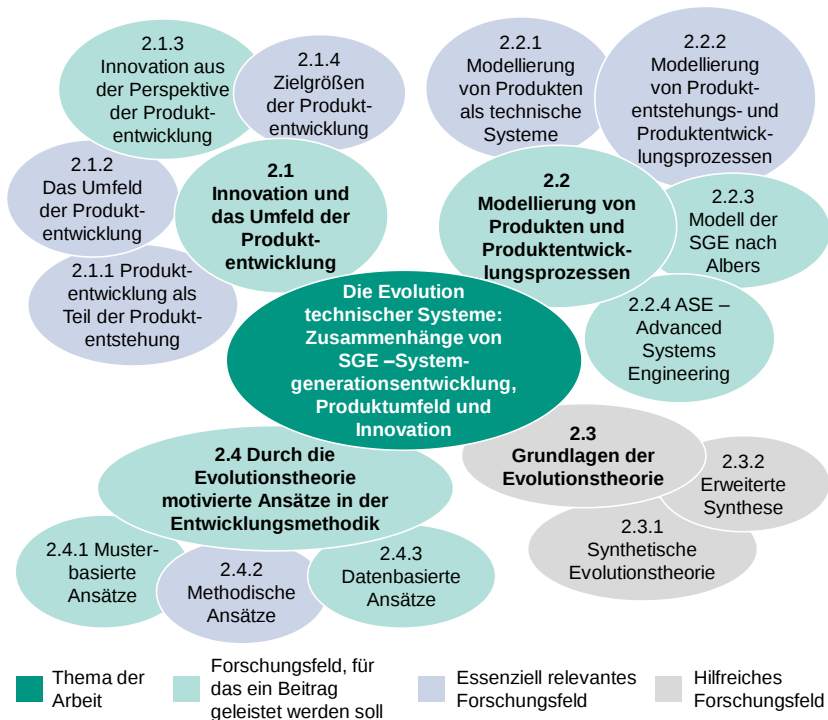


Abbildung 1.3: Thema der Arbeit sowie adressierte und relevante Forschungsfelder dargestellt in einem ARC-Diagramm (Areas of Relevance and Contribution) nach Blessing und Chakrabarti (2009).

Diese Forschungsarbeit entstand im Rahmen einer Assistenzpromotion am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und ist ein Element der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung. Die KaSPro integriert die grundlegenden Forschungsmethoden und Ansätze der Forschung am IPEK und stellt so einen umfassenden Wissensspeicher dar, auf dem diese Forschungsarbeit aufbaut und zu dem diese Arbeit beiträgt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in neun Kapitel. In **Kapitel 2** wird der Stand der Forschung dargelegt. Zuerst wird das dieser Arbeit zugrunde liegende Verständnis von Innovation, Produktentwicklung und dem Umfeld der Produktentwicklung eingeführt. Anschließend werden Modelle zur Beschreibung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen vorgestellt, insbesondere das Modell der SGE. Für die Analogiebildung zwischen natürlicher Evolution und der Evolution technischer Systeme werden die zentralen Konstrukte der Evolutionstheorie kurz erläutert. Abschließend werden bereits auf dieser Analogie aufbauende Ansätze aus der Entwicklungsmethodik gegenübergestellt.

Aufbauend auf dem Stand der Forschung und der Motivation dieser Arbeit wird in **Kapitel 3** der Forschungsbedarf zusammengefasst, die Zielsetzung und Arbeitsthese der Arbeit formuliert und Forschungsfragen und -Prämissen zur Operationalisierung des Forschungsziels abgeleitet. In **Kapitel 4** wird der übergreifende induktive Forschungsansatz der Arbeit hergeleitet und diesem folgend das Forschungsdesign zur Beantwortung der Forschungsfragen sowie die eingesetzten Forschungsmethoden der Fallstudienforschung erläutert.

Der erste Teil der Forschungsergebnisse, ein Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme, wird in **Kapitel 5** mithilfe einer Analogiebildung zwischen natürlicher Evolution und der Evolution technischer Systeme entwickelt. Zur weiteren Verwendung in der Arbeit wird das Beschreibungsmodell in ein Datenmodell überführt. Das Beschreibungs- und das Datenmodell werden in **Kapitel 6** für retrospektive, literaturbasierte Fallstudien zur Evolution technischer Systeme angewendet. Der aus den Fallstudien resultierende Datensatz ist die Grundlage für die fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese in **Kapitel 7**, das das zentrale Ergebniskapitel der Arbeit darstellt. In Kapitel 7 werden die Erkenntnisse zur Evolution technischer Systeme in Form von anwendungsorientierten Theoriebausteinen formuliert und mithilfe des Beschreibungsmodells in einen Gesamtzusammenhang eingeordnet.

In **Kapitel 8** werden die Erkenntnisse und die Vorgehensweise der Arbeit zusammengefasst sowie Limitationen, Beitrag und Implikationen diskutiert. **Kapitel 9** schließt die Arbeit mit einem Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf und mögliche anknüpfende Forschungsvorhaben ab.

2 Stand der Forschung

In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung zum Forschungsgegenstand dieser Arbeit – Die Evolution technischer Systeme: Zusammenhänge von SGE – Systemgenerationsentwicklung, Produktumfeld und Innovation – dargelegt. Zu Beginn wird das Innovationsverständnis dieser Arbeit und das Umfeld der Produktentwicklung vorgestellt. Kapitel 2.2 führt grundlegende Modelle für Produkte und Produktentwicklungsprozesse ein, darunter das für diese Arbeit zentrale Modell der SGE in Kapitel 2.2.3. In Kapitel 2.3 werden die für diese Arbeit relevanten theoretischen Konstrukte der Evolutionstheorie eingeführt und in Kapitel 2.4 ein Überblick über bereits bestehende, aus der Evolutionstheorie motivierte Ansätze in der Entwicklungsmethodik gegeben.

2.1 Innovation und das Umfeld der Produktentwicklung

Produktentwickelnde kreieren unter Berücksichtigung sämtlicher Phasen des Produktlebenszyklus und im Zusammenwirken mit weiteren produktbeeinflussenden Stellen neue Produkte (acatech, 2012; Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017). Die VDI-Richtlinie 2221 definiert ein Produkt als ein „Erzeugnis oder Leistung materieller wie immaterieller Art, das oder die allein oder als System angeboten wird, um den Bedarf am Markt sowie die Bedürfnisse von Nutzern zielgruppengerecht zu befriedigen“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 8).¹ Der Zweck eines Produkts ist es, Nutzen für Kunden, Anwender und für den Anbieter zu stiften (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Ein Produkt stiftet Nutzen, indem es als System Funktionen erfüllt (Albers & Sauer, 2023).

Das Umfeld des 21. Jahrhunderts wird häufig mit dem Akronym VUKA beschrieben und ist demnach gekennzeichnet durch Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität (Schoemaker et al., 2018). Für dieses sich dynamisch wandelnde Umfeld aus Gesellschaft, Märkten, Politik und Recht müssen Ingenieurinnen und Ingenieure Produkte entwickeln, die Fortschritt ermöglichen und sich gegenüber

¹ Aus der VDI Richtlinie 2221 aus dem Jahr 2019 werden im Folgenden häufig Definitionen zitiert, da der Richtlinienprozess des VDI durch die Einbindung von Stakeholdern aus Wissenschaft und Praxis einen breiten Konsens sicherstellt.

Wettbewerbern durchsetzen (Arthur, 2009). Um nachhaltig in diesem Umfeld zu bestehen, sind Innovationen notwendig (Hauschildt et al., 2023).

In Kapitel 2.1.1 wird die Produktentwicklung in die Produktentstehung und den Produktlebenszyklus eingeordnet. In Kapitel 2.1.2 wird das Umfeld der Produktentwicklung näher analysiert und in Kapitel 2.1.3 das dieser Arbeit zugrunde liegende Innovationsverständnis erläutert.

2.1.1 Produktentwicklung als Teil der Produktentstehung

Die Produktentstehung ist Teil des Produktlebenszyklus und beschreibt den Prozess von der Produkt- oder Geschäftsidee bis zum Start der Serienproduktion (Albers & Gausemeier, 2012; VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1). Der **Produktlebenszyklus** kann nach Albers & Gausemeier (2012) in die Phasen Produktentstehung, Fertigung, Distribution, Nutzung und Rücknahme eingeteilt werden. Die Produktentstehung beinhaltet die Strategische Produktplanung, die Produktentwicklung und die Produktionssystementwicklung, welche nicht als sequenzielle Phasen, sondern als integriert ablaufende Aktivitäten verstanden werden sollen (Albers & Gausemeier, 2012; Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017). Aus dem **integrativen Charakter der Produktentstehung** ergeben sich die in Abbildung 2.1 dargestellten Integrationsbereiche: Strategische Produktentwicklung, Strategische Produktionssystementwicklung und Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung sowie ein übergreifender Kooperationskern, das Systems Engineering (Albers & Gausemeier, 2012). Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung ist das Produkt-Produktions-CoDesign nach Albers, Lanza et al. (2022). Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Produktentwicklung mit dem Integrationsbereich der Strategischen Produktentwicklung.

Nach der VDI-Richtlinie 2221 ist die **Produktentwicklung** ein „interdisziplinärer Unternehmensprozess zur Entwicklung eines marktfähigen Produkts, basierend auf der Definition initialer Ziele und Anforderungen an das Produkt, die im Lauf des Prozesses kontinuierlich weiterentwickelt und iterativ angepasst werden“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S.8).

Die **Strategische Produktplanung** umfasst nach Gausemeier, Echterfeld & Amshoff (2016) die Aktivitäten Potenzialfindung, Produktfindung und Geschäftsplanung.

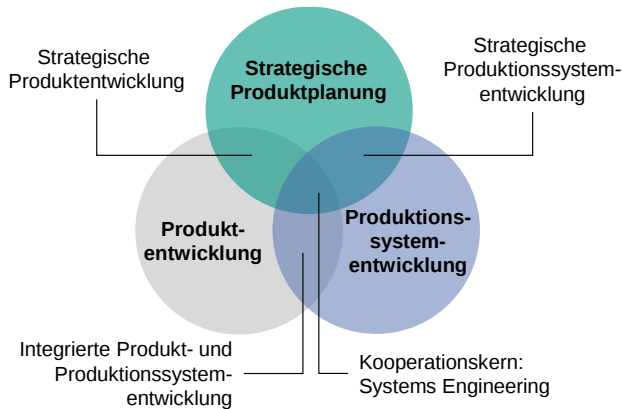


Abbildung 2.1: Integrationsbereiche des Themenfeldes Innovationsprozesse und Produktentwicklung nach Albers & Gausemeier (2012). Eigene Darstellung.

2.1.2 Das Umfeld der Produktentwicklung

Produktentwicklungsprozesse sind in das Unternehmen und das Umfeld² des Unternehmens eingebettet. Um mit der Komplexität des Umfelds der Produktentwicklung umgehen zu können, haben sich aus verschiedenen disziplinären Perspektiven Ansätze etabliert, die das Umfeld von produzierenden Unternehmen und der Produktentwicklung im Speziellen in mehreren Ebenen und mithilfe von Faktoren beschreiben (Gericke et al., 2013).

Aus der **Perspektive der Produktentwicklung** teilt die VDI-Richtlinie 2221 Blatt 2 die Kontextfaktoren der Produktentwicklung daher in unternehmensinterne und unternehmensexterne Faktoren ein. Die unternehmensexternen Faktoren werden weiter in mikro- und makroökonomische Faktoren unterschieden, die unternehmensinternen in die Ebenen Organisation, Projekt und Individuum. Das Modell basiert auf Erkenntnissen aus empirischen Studien zu Entwicklungsprojekten von Hales & Gooch (2004) und wurde mit Faktoren nach

² In der Literatur werden neben dem Begriff „Umfeld“ auch die Begriffe „Kontext“ und „Umwelt“ verwendet, um zu beschreiben, was außerhalb der Systemgrenze der Produktentwicklung liegt und auf diese einwirkt.

Gericke et al. (2013) angereichert. Zweck des Modells ist es, aufzuzeigen, welche Kontextfaktoren für die kontextspezifische Adaption des allgemeinen Modells der Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1 grundsätzlich relevant sein können.

Im **Zukunftsmanagement** nach Fink und Siebe (2011, 2016) wird das Umfeld in der Szenariotechnik mithilfe von Schlüsselfaktoren beschrieben. Schlüsselfaktoren in der Szenariotechnik sind Größen, mit denen sich ein Szenariofeld hinreichend beschreiben lässt. Szenariofelder reichen von allgemeinen Szenarien für ganze Wirtschaftssysteme bis hin zu konkreten Produktszenarien. Für ein Szenariofeld werden die Schlüsselfaktoren in Systemebenen und Einflussbereiche eingeordnet. Schlüsselfaktoren werden in der Szenariotechnik häufig mehrdimensional beschrieben und je Dimension mit zwei Ausprägungen (niedrig, hoch) versehen.

Aus der **Perspektive des Strategischen Managements** von Unternehmen unterscheidet Hungenberg (2014) zwischen Makroumwelt und Branchenumwelt. Faktoren aus der Makroumwelt können durch Unternehmen der Branche dabei nicht direkt beeinflusst werden (Hungenberg & Wulf, 2015). Ein verbreitetes Modell zur Analyse der Branchenumwelt eines Unternehmens sind die Five Forces nach Porter (1980) mit den Analysefeldern Wettbewerb in der Branche, potenzielle neue Wettbewerber, Substitutionsprodukte, Lieferanten und Kunden. Für die Analyse der Makroumwelt hat sich die PESTEL-Analyse mit den sechs Analysefeldern der politischen, ökonomischen (economical), sozialen, technologischen, ökologischen (ecological) und rechtlichen (legal) Umwelt etabliert (Grant, 2016).

2.1.3 Innovation aus der Perspektive der Produktentwicklung

Die Fähigkeit von Unternehmen, Innovationen hervorzubringen, hat großen Einfluss auf den Unternehmenserfolg sowie den Fortschritt und Wohlstand in der Gesellschaft (Damanpour et al., 2006; Hauschildt et al., 2023; Ili et al., 2010; Smetana et al., 2025). Die Innovationsfähigkeit von Unternehmen wird durch viele Unternehmensbereiche beeinflusst und in der Wissenschaft aus verschiedenen disziplinären Perspektiven erforscht (Isaksson et al., 2019). In dieser Arbeit wird Innovation aus der Perspektive der Produktentwicklung verstanden.

Viele aktuelle **Innovationsverständnisse** in der Produktentwicklung bauen auf Schumpeters „Theory of Innovation“ (1947) auf und stellen die technische Neuheit als Charakteristikum einer Innovation in den Vordergrund (Isaksson et al., 2019). Bereits 1934 hatte Schumpeter die erfolgreiche Durchsetzung am Markt und den damit verbundenen wirtschaftlichen Erfolg als weiteres zentrales Charakteristikum einer Innovation hervorgehoben (Schumpeter, 1934). Für die Unterscheidung

zwischen fehlgeschlagenen Inventionen und Innovation existieren viele Ansätze in der Literatur (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018; Baccarini, 1999; Bauer, 2006; Cooper & Kleinschmidt, 1987; Griffin & Page, 1996), die aus Anbietersicht alle den Markterfolg durch erwirtschafteten Gewinn als notwendiges Kriterium verwenden. Innovationen können daher nur retrospektiv und für ein spezifisches Produktumfeld als solche klassifiziert werden (Bauer, 2006).

In der Innovationsmanagement-Literatur werden Innovationen weiter klassifiziert und dabei häufig zweidimensionale **Portfolio-Ansätze** verwendet: Henderson & Clark (1990) teilen Innovationen nach der Neuheit der Kernkonzepte und der Neuheit der Verbindungen zwischen den Kernkonzepten und -Komponenten in vier Kategorien ein, die im Portfolio in Abbildung 2.2 resultieren: Radikale Innovationen, Inkrementelle Innovationen, Modulare Innovationen und Architekturelle Innovationen. Echte radikale Innovationen, die durch die Ablösung bestehender Technologien ganze Märkte disruptieren (vgl. Schumpeter, 1934), sind dabei in der Praxis äußerst selten (Albers, Bursac et al. 2017). Hauschildt et al. (2023) verwenden die Dimensionen Neuheit der Mittel und Neuheit der Zwecke und Pearson (1990) Markt- und Technologieunsicherheit. Diese Portfolio-Ansätze werden häufig dazu verwendet, laufende Innovationsprojekte im Innovationsmanagement einzuordnen und setzen keinen Markterfolg voraus.

		Kernkonzepte	
		verbessert	grundlegend verändert
Verbindungen zwischen Kernkonzepten und Komponenten	unverändert	Inkrementelle Innovation	Modulare Innovation
	verändert	Architekturelle Innovation	Radikale Innovation

Abbildung 2.2: Innovationsportfolio nach Henderson und Clark (1990). Eigene Darstellung.

Zentrale **Erfolgsfaktoren** für die Entwicklung von Innovationen sind die Identifizierung von Zielmärkten, die frühzeitige und kontinuierliche Beachtung der Kundenbedürfnisse und die Differenzierung von Wettbewerbern und Vorgängerproduktgenerationen (Albers, 1994; Chong & Chen, 2010; Cooper &

Kleinschmidt, 1987; Cooper & Kleinschmidt, 1993). Ein Großteil der Innovationsvorhaben scheiterte in der Vergangenheit daran, dass diese nicht die richtigen Kundenbedürfnisse adressierten (GfK, 2006). Bauer (2006) identifizierte in seinen retrospektiven Fallstudien zu gescheiterten Inventionen fünf typische **Ursachen des Scheiterns**, die wiederholt, aber selten in Reinform auftraten: 1. technische Probleme, 2. Konkurrenzsituation, 3. Fehleinschätzung der potenziellen Nutzer, 4. zu hoher Neuheitsgrad, 5. instabiles Produktumfeld.

Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) führen bestehende Innovationsverständnisse aus der Perspektive der Produktentwicklung zusammen und ergänzen neben Invention und einer erfolgreichen Markteinführung und -diffusion einen erweiterten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen als notwendiges Kriterium. Nach Albers ist eine **Innovation** „die erfolgreiche Realisierung einer Neuheit, einer kreativen Idee oder Invention am Markt mit erweitertem Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen“ (IPEK, 2020a).

Das **Nutzenbündel** aus Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen kann mithilfe des Produktprofils modelliert werden und so frühzeitig in der Produktentwicklung berücksichtigt und insbesondere der Validierung zugänglich gemacht werden. In Abbildung 2.3 wird die Innovations-Definition in Form eines Innovationstrichters dargestellt.

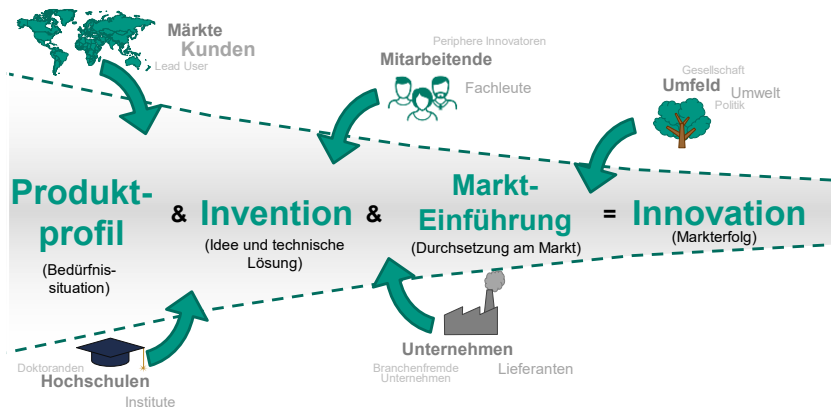


Abbildung 2.3: Elemente einer Innovation nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018). Übersetzte Darstellung nach Albers, Heimicke, Hirscher et al. (2018).

In Abbildung 2.4 ist ein Produktprofil-Schema dargestellt, welches häufig als pragmatische Repräsentation des **Produktprofils** verwendet wird.

Titel:		
Produktclaim <i>Wir brauchen ein Produkt, das...</i>		Bild
Initiale Produktbeschreibung ▪ Produkteigenschaften ▪ Hauptfunktionen/ Kundefunktionen ▪ USP (Alleinstellungsmerkmal) ▪ ...		
Referenzsystem Referenzsystemelemente aus ▪ Vorgängergeneration ▪ Eigenem Unternehmen ▪ Gleiche/ andere Branche ▪ ...	Use Cases In welchem Kontext wird dieses Produkt eingesetzt? ▪ Wie interagiert der Kunde / Nutzer mit dem Produkt? ▪ ...	
Anbiaternutzen ▪ Strategischer Einsatz ▪ Passt zu Unternehmensphilosophie, Marke, ... ▪ Erweiterung Produktportfolio ▪ Geschäftsmodell ▪ Ressourcen ▪ Nutzbare Kernkompetenzen	Kundennutzen ▪ Customer Pain – das Problem aus Sicht eines Kunden ▪ Wie wird das Produkt dem Kunden nutzen? ▪ Zielgruppe / Marktsegment	Anwieldernutzen ▪ User Pain – das Problem aus Sicht eines Anwenders ▪ Wie wird das Produkt dem Anwender nutzen? ▪ Zielgruppe
Wettbewerbssituation ▪ Wettbewerb ▪ Marktanteile ▪ Patentsituation ▪ Konkurrierende Produkte	Nachfrage ▪ Beschreibung des Kunden / Anwender ▪ Märkte ▪ Marktpotential/ Marktgröße ▪ Trends/ Zukunftsszenarien	
Validierung des ... durch ▪ z.B. des Customer Pain und User Pain durch Interviews ▪ z.B. der Patentsituation durch eine Patentanalyse mit Fokus auf Europa ▪ ...		Rahmenbedingungen / Einschränkungen ▪ Gesetzliche Rahmenbedingungen ▪ Standards ▪ Strategische Partnerschaften ▪ ...

Abbildung 2.4: Produktprofil-Schema zur Darstellung von Produktprofilen. Angepasste Darstellung nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018). Eigene Darstellung.

Das **Produktprofil** ist definiert als „ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung einer Produktgeneration explizit vorgibt. Ein Nutzenbündel wird hierbei verstanden als eine Gesamtheit aus Produkten und Dienstleistungen, welches mit dem Zweck erstellt wird, an einen Kunden verkauft zu werden und für ihn direkt oder indirekt – z. B. für von ihm berücksichtigte Anwender oder für seine Kunden – Nutzen zu stiften“ (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018, S. 255); Übersetzung nach IPEK (2020b).

Neben dem zentralen Nutzenbündel enthält das Produktprofil noch weitere Elemente, die unter anderem bereits erwähnte Erfolgsfaktoren und relevante Umfeldfaktoren abbilden. Diese werden im Produktprofil-Schema in Module unterteilt. Die Module repräsentieren Analyseperspektiven und beinhalten weitere Sub-Elemente zur Unterstützung, die an die Entwicklungssituation angepasst werden können. Der Produktprofil-Claim fasst dabei das Hauptziel eines Produkts, also dessen Zweck, in Kurzform zusammen.

Angestrebte Kunden- und Anwendernutzen im Produktprofil können dann in Innovationspotenzial (siehe 2.1.4) resultieren, wenn diese auch zu den **Bedarfen** der Kunden und Anwender als zentrale Stakeholder-Gruppen passen und so eine Nachfrage hervorrufen. Eine zentrale Aktivität der Produktentwicklung ist daher die Validierung von Produktprofilen, um sicherzustellen, dass die getroffenen Annahmen zu Kunden- und Anwendernutzen tatsächlich zutreffen (Schwarz et al., 2025). Im klassischen Innovationsmanagement werden zwei Strategien zum Umgang mit Bedarfen unterschieden (Hauschildt et al., 2023):

- **Market/Demand-Pull:** Neue Bedarfe reaktiv mit passenden Produkten adressieren.
- **Technology-Push:** Durch Invention neue Bedarfe hervorrufen.

Hauschildt et al. (2023) kritisieren diese Unterteilung, da durch Technology-Push keine neuen Bedarfe entstehen, sondern lediglich bisher latente Bedarfe hervortreten.

Durch das sich dynamisch ändernde makroökonomische Umfeld, beispielsweise härter werdender Nachhaltigkeits-Gesetzgebung, und dem Wettbewerb sowie neuen und geänderten Anwender- und Kundenbedarfen im mikroökonomischen Umfeld stehen Unternehmen mit ihren Produkten unter permanentem **Innovationsdruck** (Smetana et al., 2025; Stern & Jaberg, 2010). Vor dem Hintergrund der Innovations-Definition nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) müssen Unternehmen also permanent neuen Nutzen für die Bedarfe der Anwender,

Kunden und sich selbst als Anbieter durch neue Produktprofile und Inventionen generieren. Um überdurchschnittlichen Anbieternutzen in Form von Gewinn zu erzielen, haben Unternehmen nach Porter (1985) dabei die Möglichkeit, in Kosten- oder Nutzenführerschaft für einzelne Marktsegmente oder branchenweit zu gehen (Disselkamp, 2012). Der Innovationsdruck wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass Produktattribute über die Zeit von Begeisterungsattributen mit überproportional positivem Effekt auf die Kundenzufriedenheit über Leistungsattribute mit proportional positivem Effekt zu Basisattributen degradieren (Bailom et al., 1996; Kano et al., 1984).

Um diesem Druck zu begegnen, werden zum einen auf Basis von Referenzen neue Produkte ohne direkten Vorgänger entwickelt und in den Markt eingeführt (Albers, Ebertz et al., 2020). Zum anderen werden Produkte in **Produktgenerationen** weiterentwickelt, die zum Teil Bestehendes aus der Vorgängergeneration oder anderen Referenzen übernehmen und zum Teil neuen Nutzen durch Anpassung bestehender Referenzen oder die Einführung neuer Lösungsprinzipien stiften (Albers, Bursac et al., 2015). Daraus ergeben sich Produktgenerationslebenszyklen, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, die weiter in Technologie- und Branchenlebenszyklen münden (Wesner, 1977).

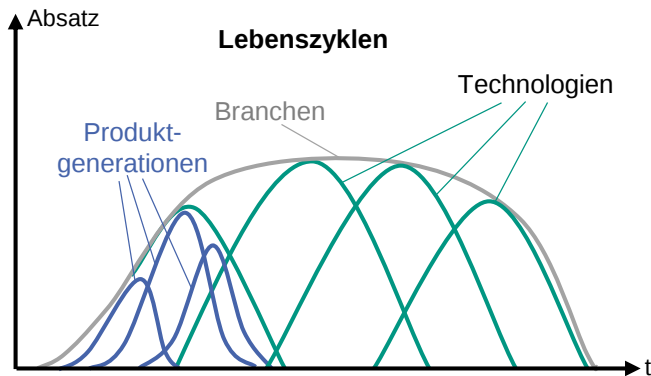


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Lebenszyklen von Produktgenerationen, Technologien und Branchen (Wesner, 1977), Darstellung nach Albers, Bursac et al. (2017).

2.1.4 Zielgrößen der Produktentwicklung

Ziel der Produktentwicklung ist es nach dem Innovationsverständnis nach Albers, Heimicke, Walter et al. (2018), Innovationen hervorzubringen. Da Innovationen immer nur retrospektiv als solche eingeordnet werden können, wird in dieser Arbeit in Anlehnung an Rapp (2021) und Marthaler (2021) vom **Innovationspotenzial** als Zielgröße in der Produktentwicklung gesprochen, das es zu maximieren gilt.

Weitere allgemeingültige Zielgrößen in der Produktentwicklung sind unter dem „Magischen Dreieck“ bekannt: **Qualität, Kosten, Zeit** (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017). Qualität kann nach DIN EN ISO 9000 als der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt, verstanden werden. Garvin (1984) verwendet einen umfassenderen Qualitätsbegriff für Produkte aus den fünf Perspektiven prozessbezogene, Preis-Nutzen-bezogene, anwenderbezogene, produktbezogene und transzendente Qualität. Kosten sind der in Geld bewertete Ressourcenverbrauch für die betriebliche Leistungserstellung (Ehrlenspiel et al., 2014). Die Entstehung der Kosten wird vorrangig in den Anfangsphasen des Produktentstehungsprozesses bestimmt (Ehrlenspiel et al., 2014). Olesen et al. (1996) fügen unter anderem **Risiko** und **Nachhaltigkeit** hinzu. Risiko ist nach DIN ISO 31000 als die „Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele“ definiert. Für ein zielgerichtetes Verständnis von Nachhaltigkeit im Kontext der Produktentwicklung sollte ein zum Zweck passender Bezugsrahmen gewählt werden (Jäckle et al., 2023).

2.2 Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen

Sowohl die Entstehung als auch die Nutzung technischer Systeme kann als soziotechnisches System verstanden werden (Ropohl, 2009). Um die Komplexität technischer Systeme und deren Entstehung für den Menschen im Mittelpunkt handhabbar zu machen, werden Modelle gebildet. Stachowiak (1973) definiert Modelle in seiner allgemeinen Modelltheorie anhand von drei Merkmalen: Dem Abbildungsmerkmal, dem Verkürzungsmerkmal und dem pragmatischen Merkmal. Das **Abbildungsmerkmal** besagt, dass alle Modelle ein Original abbilden, wobei ein Original selbst ein Modell sein kann. Nach dem **Verkürzungsmerkmal** bildet ein Modell nur die Merkmale eines Originals ab, die bei dessen Erschaffung aufgrund ihrer Relevanz für Modellersteller und/oder Modellnutzer berücksichtigt wurden. Die Relevanz bestimmter Merkmale folgt aus dem Modellzweck (**Pragmatisches Merkmal**), an den auch die Gültigkeit des Modells gebunden ist. Als Grundlage für

die Modellierung (sozio-)technischer Systeme wird die Systemtheorie der Technik nach Ropohl (2009) verwendet.

2.2.1 Modellierung von Produkten als technische Systeme

Die systemtheoretische Betrachtung technischer Artefakte als technische Systeme beruht nach Ropohl (2009) auf drei grundlegenden Konzepten: dem funktionalen, strukturalen und hierarchischen Konzept, die in Abbildung 2.6 dargestellt sind.

Das **Funktionale Konzept** beschreibt das Verhalten eines Systems aus Sicht seiner Umwelt durch die Wandlung von Eingangsgrößen (Energie, Stoff, Information) in Ausgangsgrößen (Energie', Stoff', Information') und durch beobachtbare Systemzustände. Bei technischen Systemen lassen sich drei Arten von Eingangs- und Ausgangsgrößen unterscheiden: Energie, Stoff und Information (Albers, 2023b). Die Funktion eines Systems ist der „allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 6). Die Realisierung von Funktion in einem System erfolgt nach dem **Strukturalen Konzept** durch Elemente und deren Relationen. Ein System wird durch eine Systemgrenze zu seiner Umgebung abgegrenzt, die in der Modellbildung festgelegt wird (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1). Nach dem **Hierarchischen Konzept** können Elemente eines Systems wieder als Subsysteme verstanden werden und ein System kann wiederum Teil eines umfassenderen Supersystems sein. Demnach können Systeme, je nach benötigtem Detaillierungsgrad, auf mehreren Systemebenen in Subsysteme untergliedert werden.

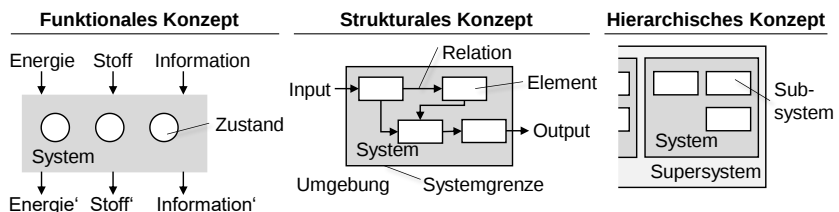


Abbildung 2.6: Funktionales, strukturalen und hierarchisches Konzept. Darstellung nach Ropohl (2009). Eigene Darstellung.

Durch die Modellierung nach dem strukturalen und hierarchischen Konzept ergibt sich für ein System die **Systemstruktur** und für ein Produkt die Produktstruktur. Funktionen wiederum können ebenfalls hierarchisch weiter in Teilfunktionen unterteilt werden, was die **Funktionsstruktur** ergibt (Albers, 2023b). Die

Architektur verknüpft die Systemstruktur mit der Funktionsstruktur (Förg et al., 2016; Krause et al., 2021). In der VDI2221 wird die Architektur aufbauend auf Definitionen aus dem Systems Engineering als „grundlegendes Konzept, Eigenschaften eines Systems oder allgemein die fundamentale Struktur eines Systems“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 4) verstanden.

Eine besondere Rolle kommt der Architektur bei der produktseitigen Standardisierung zu. Ziel produktseitiger Standardisierung ist es, bei geringen Produktkosten durch niedrige interne Variantenvielfalt Kunden eine hohe äußere Vielfalt an Produktvarianten anbieten zu können (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017; Förg et al., 2016). Um diesen Zielkonflikt aufzulösen, werden in der Praxis Methoden der **Standardisierung** verwendet: Modul-, Plattform- & Hut-, Baureihen- und Baukastenbauweise. In Tabelle 2.1 werden die Definitionen der vier Standardisierungsmethoden nach Albers, Scherer et al. (2015) wiedergegeben.

Tabelle 2.1: Definitionen der Standardisierungsmethoden nach Albers, Scherer et al. (2015), Übersetzung nach Bursac (2016).

Bauweise	Definition
Modul	„Ein Modul ist ein technisches Subsystem, das sich durch andere technische Subsysteme ersetzen lässt, so dass die Menge aller Funktionen oder Attribute des technischen Systems variiert wird.“
Plattform & Hut	„Eine Plattform ist die Menge jener Subsysteme, die in unterschiedlichen technischen Systemen unverändert zum Einsatz kommt. Der Hut hingegen umfasst die restlichen Subsysteme, die in den unterschiedlichen technischen Systemen die Menge aller Funktionen oder Attribute variieren.“
Baureihe	„Eine Baureihe bezeichnet mehrere technische Systeme, die eine ähnliche Produktarchitektur aufweisen. Die jeweiligen technischen Systeme unterscheiden sich dabei durch die Ausprägung einzelner Attribute, die durch Skalieren variiert werden.“
Baukasten	„Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können.“

Bei einem strukturgebundenen Baukasten haben die Varianten eine einheitliche Architektur (Ponn & Lindemann, 2011). Für die Umsetzung von Modul-, Plattform & Hut- und Baukasten-Bauweise ist die Definition von einheitlichen Schnittstellen an den Systemgrenzen erfolgsentscheidend (Albers et al., 2015). Die Standardisierungsmethoden haben einen fraktalen Charakter und können

kombiniert auf verschiedenen Systemebenen angewendet werden (Albers et al., 2015).

Neben hierarchischen Ebenen von Systemen und Subsystemen sowie Funktionen und Subfunktionen können technische Systeme auch auf mehreren **Abstraktionsebenen** modelliert werden. Pahl et al. (2007) beschreiben technische Systeme auf den drei Ebenen Funktion (funktionelle Lösungsmöglichkeiten), Physik (prinzipielle, physikalische Lösungsmöglichkeiten) und Gestalt (gestalterische Lösungsmöglichkeiten). Im Sinne der integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung ergänzen Ehrlenspiel und Meerkamm (2017) die Ebene der Produktion mit Lösungsmöglichkeiten der fertigungstechnischen Umsetzung. Im Systems Engineering wird zwischen der funktionalen, logischen und physischen Architektur unterschieden (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 4). Albers, Hirschter et al. (2020) schlagen lösungsoffene sowie kundenerlebbare Eigenschaften, Funktionen und physikalische Lösungsmöglichkeiten als Abstraktionsebenen vor.

2.2.2 Modellierung von Produktentstehungs- und Produktentwicklungsprozessen

Jeder Produktentstehungsprozess kann als iterativer **Problemlösungsprozess** verstanden werden (Albers, Saak et al., 2002). Nach Dörner (1979) sind Aufgaben und Probleme durch die Abweichung eines unerwünschten Anfangszustands (Ist) in einen gewünschten Endzustand (Soll) charakterisiert. Bei einer Aufgabe sind Ist, Soll und Lösungsweg von Beginn an klar. Bei einem Problem existiert eine Barriere: Ist, Soll und Lösungsweg können unklar sein. In der Produktentstehung entwickeln sich das Problem und dessen Lösung in einem co-evolutionären und iterativen Prozess durch abwechselnde Analyse- und Syntheseaktivitäten stetig weiter, bis der Ist-Zustand dem Soll-Zustand entspricht (Albers et al., 2002; VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1; Pahl et al., 2007).

Aufbauend auf dem Problembegriff und der Modellierung der Produktentstehung als soziotechnisches System nach Ropohl (2009) modellieren Albers und Braun (2011) „Produktentstehung als die Transformation eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem“ (S. 16). Die Wechselwirkungen der drei Subsysteme sind in Abbildung 2.7 visualisiert. Der in Abbildung 2.7 dargestellte Prozess kann vom einzelnen Produktentwickler bis hin zu einer gesamten Organisation beobachtet werden.

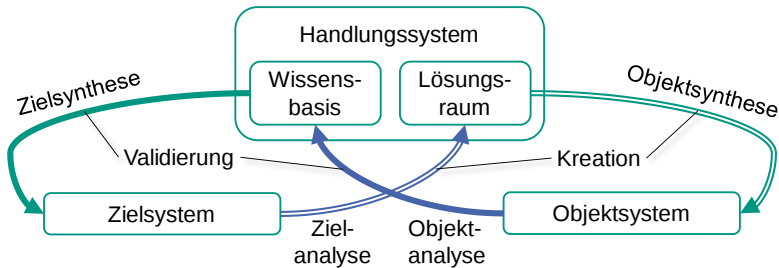


Abbildung 2.7: Co-evolutionäre Entwicklung des Ziel- und Objektsystems durch abwechselnde Analyse- und Syntheseaktivitäten des Handlungssystems (erweitertes ZHO-System). Übersetzte Darstellung nach (Albers, Lohmeyer et al., 2011).

Das **Zielsystem** umfasst Elemente verschiedener Partialmodelle, die den Soll-Zustand des zu entwickelnden Produkts beschreiben, sowie deren Begründungen und Wechselwirkungen (Albers, Lohmeyer et al., 2011; Ebel, 2015). Nach Ebel (2015) lassen sich diese Partialmodelle in lösungsoffene und lösungsspezifische Partialmodelle unterteilen. So sind beispielsweise Ziele lösungsoffen formuliert. Aus Zielen und Randbedingungen abgeleitete Anforderungen sind hingegen lösungsspezifisch. Die zu Beginn eher lösungsoffenen Elemente des Zielsystems werden im Verlauf des Produktentstehungsprozesses konkretisiert (Meboldt, 2008). Das lösungsoffene Produktprofil kann als Teil des initialen Zielsystems verstanden werden (Albers, Heitger et al., 2018). Das **Objektsystem** enthält alle Dokumente und Artefakte, die im Produktentstehungsprozess entstehen (Albers et al., 2011). Das **Handlungssystem** beinhaltet alle für die Produktentstehung benötigten Aktivitäten, Methoden, Prozesse und Ressourcen (Albers et al., 2011).

Sowohl der Produktentstehungsprozess als Ganzes als auch die einzelnen Synthese- und Analyse-Aktivitäten können als Problemlösungsprozess verstanden werden. Produktentstehungsprozesse werden immer komplexer, beispielsweise durch die zunehmende Anzahl an für die Entwicklung cyberphysischer Systeme benötigten Disziplinen (Dumitrescu et al., 2021). Die kognitiven Fähigkeiten der ausführenden Menschen bleiben jedoch begrenzt (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017). Bei der Modellierung von Produktentstehungsprozessen müssen sowohl die Bedürfnisse der Produktentwickler nach situationsgerechter methodischer Unterstützung im Prozess als auch die Bedürfnisse des (Prozess-)Managements berücksichtigt werden (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016).

Problemlösungsmethoden unterstützen Produktentwickelnde bei der Problemlösung. In Anlehnung an Ehrlenspiel & Meerkamm (2017) wird in der VDI-Richtlinie 2221 eine Methode als „planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von

Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ definiert (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 6). Problemlösungsmethoden aus der Literatur reichen von universell einsetzbaren Problemlösungsmethoden mit breitem Anwendungsbereich bis hin zu Methoden mit sehr spezifischem Einsatzbereich, die für technische Probleme oder bestimmte Entwicklungssituationen vorgesehen sind (Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016). Neben dem Einsatzbereich lassen sich Problemlösungsmethoden nach ihrem Detaillierungsgrad unterscheiden (Albers et al., 2016). Eine universell einsetzbare Problemlösungsmethode mit hohem Detaillierungsgrad ist die SPALTEN-Problemlösungsmethode nach Albers et al. (2002), die sich in der Praxis bewährt hat (Albers et al., 2016).

„Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell“ (Albers, 2010). **Prozessmodelle** abstrahieren individuelle Produktentstehungsprozesse hinsichtlich Inhalt (von produktspezifischen zu generischen Prozessmodellen) und Formalisierung (von Applikations-Modellen zu Meta-Modellen) (Muschik, 2011). Prozessmodelle können bei der Planung, Durchführung und Steuerung von Entwicklungsprozessen unterstützen (Lindemann, 2009; Wynn & Clarkson, 2018). In der VDI-Richtlinie 2221 werden Prozessmodelle zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen mit dem Fokus auf Produktentwicklungsprozesse anhand ihres Detaillierungs- und Formalisierungsgrades verglichen (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 29). Für den Fokus der Arbeit – Produktentwicklung mit dem Integrationsbereich der strategischen Produktentwicklung als Teil der Produktentstehung – sind insbesondere das Allgemeine Modell der Produktentstehung nach VDI-Richtlinie 2221, das V-Modell nach VDI/VDE-Richtlinie 2206, das Referenzmodell der strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen (4-Zyklen-Modell) nach Gausemeier et al. (2016) sowie das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell nach Albers, Reiß, Bursac & Richter (2016) relevant.

Das **Allgemeine Modell der Produktentstehung nach VDI-Richtlinie 2221** baut auf dem grundlegenden iterativen Regelungszyklus aus Zielen, Aktivitäten der Synthese und Analyse sowie Ergebnissen auf (vgl. ZHO-System). Die zeitliche Abfolge der kontextspezifisch anpassbaren Aktivitäten wird angelehnt an das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell nach Albers et al. (2016) in einer Matrixdarstellung in einem Phasenmodell modelliert. Schnittstelle zur strategischen Produktplanung ist der Entwicklungsauftrag.

Das **V-Modell nach VDI/VDE-Richtlinie 2206** baut auf dem Grundgedanken der Dekomposition eines Gesamtsystems in seine Subsysteme und Elemente (linker Schenkel des V) und der schrittweisen Integration in das Gesamtsystem (rechter Schenkel des V) sowie kontinuierlicher Verifikation (vom rechten zum linken

Schenkel des V) und Validierung der Eigenschaften (vom rechten Schenkel des V zu den Stakeholdern) auf. Das V wird weiter in die drei Stränge Anforderungsmanagement, Systementwicklung sowie Modellierung und Analyse unterteilt. Das Modell stellt ein Rahmenwerk ohne Ablaufmodell dar, sieht für die Systementwicklung aber die sechs Kontrollpunkte Geschäftsmodell, Spezifikation, Architektur, Implementierung, Integration und Übergabe vor. Schnittstelle zur strategischen Produktplanung ist das Geschäftsmodell.

Das Referenzmodell der strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen – auch **4-Zyklen-Modell** genannt – nach Gausemeier et al. (2016) modelliert die Produktentstehung von der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf als ein Wechselspiel von in vier Zyklen untergliederten Aufgaben. Der Zyklus der strategischen Produktplanung ist dabei den drei Entwicklungszyklen – Produktentwicklung, Dienstleistungsentwicklung, Produktionssystementwicklung – vorangestellt.

Das **iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell** nach Albers et al. (2016) ist ein hoch formalisiertes und detailliertes generisches Metamodell und vereint die Perspektiven von Entwicklung und Management. Wie in Abbildung 2.8 dargestellt, basiert das iPeM auf dem ZHO-System und der SPALTEN-Problemlösungsmethode. Das iPeM modelliert die Produktentstehung in den Ebenen der parallelen Entwicklung mehrerer Produktgenerationen, der Entwicklung des Validierungssystems, der Entwicklung des Produktionssystems und der Entwicklung der Strategie. Die Aktivitäten im Handlungssystem werden in Makro- und Mikro-Aktivitäten unterteilt und in Matrixform dargestellt. Die vertikal angeordneten Makroaktivitäten sind weiter in Basisaktivitäten, die den prozessbegleitenden Rahmen bilden, und Kernaktivitäten unterteilt. Horizontal angeordnet sind die Aktivitäten der Problemlösung nach SPALTEN. Die zeitliche Abfolge dieser Aktivitäten wird in einem dynamischen Phasenmodell abgebildet und in Referenz-, Implementierungs- und Anwendungsmodell unterteilt. Das iPeM ermöglicht eine detaillierte Modellierung der für die Entwicklung technischer Systeme benötigten Makro- und Mikroaktivitäten.

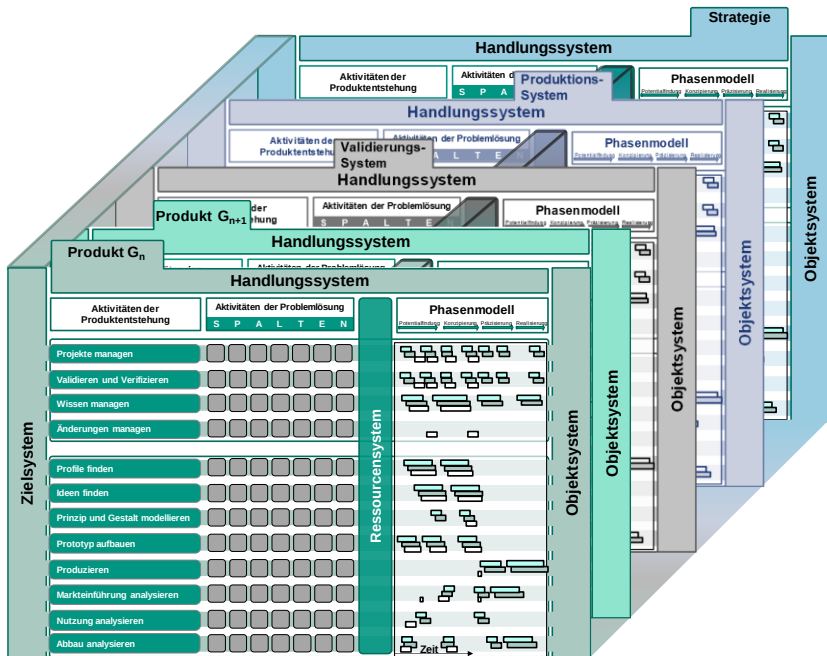


Abbildung 2.8: iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016).

2.2.3 Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers

Methoden und Prozesse für die Entwicklung von Produkten mit hohem Innovationspotenzial sollten auf einem Beschreibungsmodell für grundlegende Phänomene in der Entwicklung neuer technischer Systeme aufbauen (Albers & Rapp, 2022). Ein grundlegendes Phänomen in der Produktentwicklung ist, dass neue technische Systeme immer eine Kombination aus bereits bestehenden und neuen Lösungen sind (Sivaloganathan & Shahin, 1999). Ein Großteil des Wissens von Produktentwickelnden und Unternehmen ist in vergangenen Produkten enthalten, weshalb dieses Wissen systematisch wiederverwendet werden sollte, insbesondere bei komplexen Problemen (Shahin et al., 1999).

Der Anteil klassischer „Neukonstruktion“ nach Pahl und Beitz (2007) liegt in der Praxis unter 20 % (Albers, Bursac et al., 2015; Kirchner, 2020; Knieke et al., 2022). Aus der Praxis wird an entwicklungsmethodischer Forschung und den Methoden, die aus ihr hervorgehen, häufig kritisiert, diese wären dennoch nur bei „green field“ Neuentwicklung ohne den Bezug zu bestehenden Systemen anwendbar (Kirchner, 2020). Design Reuse, Engineering Changes, die C-K Theorie und das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers sind verbreitete Ansätze aus der Entwicklungsmethodik, die den Bezug zu bestehenden Systemen berücksichtigen. Auch die in Kapitel 2.4 dargestellten Ansätze, die durch die Evolutionstheorie motiviert sind, stellen den Bezug zu bestehenden Systemen her.

Design Reuse beschreibt nach Alblas und Jayaram (2015) den Prozess, vorhandene Designartefakte in neuen Designs wiederzuverwenden. Das Ziel von Design Reuse ist die Minimierung des Ressourceneinsatzes in der Produktentstehung. Sivaloganathan und Shahin (1999) grenzen Design Reuse dabei von Innovation ab. Das **Engineering Change Management** verfolgt das Ziel, negative Auswirkungen von Engineering Changes auf Zeit, Kosten und Qualität sowie negative Auswirkungen von Änderungsausbreitung (Change Propagation) zu reduzieren (Alblas & Jayaram, 2015). Die **C-K Theorie** nach Hatchuel und Weil (2003) ist eine „universelle Design Theorie“ (S. 2), in der existierendes, validiertes Wissen im Knowledge-Space (K-Space) modelliert wird. Wissens Elemente mit unklarem Status, beispielsweise neue, noch nicht abgesicherte Konzepte, werden im Concept-Space (C-Space) modelliert und nach abgeschlossener Validierung in den K-Space transferiert (C→K). Ziel der C-K Theorie ist es, Design mit Fokus auf Kreativität und Innovation zu definieren.

Im Folgenden wird das Modell der **SGE – Systemgenerationsentwicklung**³ nach **Albers** (Albers, Bursac et al., 2015; Albers & Rapp, 2022) eingeführt, das explizit den Bezug von bestehenden zu neuen Systemen beschreibt und dabei sowohl Wiederverwendung als auch Neuentwicklung in variablen Anteilen sowie die Entwicklung von technischen Systemen ohne direkte Vorgängergeneration und die Entwicklung von Systemen in Generationen berücksichtigt. Das Modell der SGE ist ein Beschreibungsmodell, das Produktentwicklung aus der neuen Perspektive der Systemgenerationsentwicklung beschreibt und die Entwicklung von praxisgerechten Methoden, Prozessen und Tools unterstützen soll (Albers et al., 2015). Das Modell baut auf zwei zentralen Grundhypothesen auf. Die **erste Hypothese** lautet: „Die Entwicklung eines neuen Systems basiert auf einem Referenzsystem“ (übersetzt, Albers & Rapp, 2022, S. 29 nach Albers et al., 2015; Albers, Rapp et al., 2019). „Das **Referenzsystem** für ein neues System ist ein System, dessen Subsysteme aus bereits existierenden oder geplanten sozio-technischen Systemen und deren Dokumentation stammen und Basis und Startpunkt für die Entwicklung eines neuen Systems sind“ (Albers & Rapp, 2022, S. 29 nach Albers, Heimicke et al., 2019). Subsysteme des Referenzsystems werden auch als Referenzsystemelemente – kurz RSE – bezeichnet.

Die **zweite Hypothese** lautet: „Basierend auf dem Referenzsystem wird ein neues System durch die Zusammensetzung von drei verschiedenen **Variationsarten** von Subsystemen entwickelt: Übernahmevariation, Ausprägungsvariation und Prinzipvariation“ (übersetzt, Albers & Rapp, 2022, S. 30 nach Albers et al., 2015; Albers, Rapp et al. 2020). Die Variationsarten werden im Rahmen dieser Arbeit wie folgt basierend auf Albers & Rapp (2022) und Albers, Rapp et al. (2020) definiert:

- **Übernahmevariation (Carryover Variation, CV⁴)** ist eine Aktivität für die Entwicklung eines Subsystems eines neuen Systems, bei der das zugrunde liegende RSE übernommen wird und Anpassungen nur an den Schnittstellen für die Systemintegration vorgenommen werden.
- **Ausprägungsvariation (Attribute Variation, AV)** ist eine Aktivität für die Entwicklung eines Subsystems eines neuen Systems, bei der das

³ Bis 2022 als „Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung“ bekannt. Das Modell wurde im Zuge der Generalisierung von Produkten hin zu technischen Systemen im Allgemeinen umbenannt.

⁴ Im Folgenden wird die Übernahmevariation nach dem englischen Begriff Carryover Variation mit CV abgekürzt. Diese Konvention wurde zur Vermeidung des Umlauts gewählt, um Formeln korrekt darzustellen und den Übertrag in die englische Sprache zu vereinfachen.

Lösungsprinzip und damit die Elemente und Relationen des zugrunde liegenden RSE beibehalten und die Ausprägung von Eigenschaften mindestens teilweise verändert wird.

- **Prinzipvariation (Principle Variation, PV)** ist eine Aktivität für die Entwicklung eines Subsystems eines neuen Systems, bei der das Lösungsprinzip des zugrunde liegenden RSE geändert und damit Elemente und Relationen hinzugefügt oder entfernt werden.

Lösungsprinzip wird nach der VDI-Richtlinie 2221 als „grundsätzliche Umsetzung einer Funktion oder mehrerer verknüpfter Funktionen durch Auswahl von Effekten oder Wirkprinzipien“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 7) verstanden. PV wird gegenüber dem hier eingeführten „geänderten Lösungsprinzip“ gegenüber dem zugrunde liegenden RSE häufig mit einem „neuen Lösungsprinzip“ assoziiert. Tatsächlich „neue“ Lösungsprinzipien sind, insbesondere im Maschinenbau, äußerst selten, da diesen physikalische Prinzipien zugrunde liegen. Eine Prinzipvariation auf höheren Systemebenen geht daher in der Spezifikation und Umsetzung immer mit Ausprägungsvariation auf darunterliegenden Systemebenen einher (Albers & Rapp, 2022).

Diese generalisierten Variationsarten können für verschiedene **Domänen** (Mechanik, Elektronik, Software) und auf verschiedenen **Abstraktionsebenen** technischer Systeme (vgl. 2.2.1) konkretisiert werden (Albers, Rapp et al., 2020). So wurden die Variationsarten für Funktionen und kundenerlebte Eigenschaften (Albers et al., 2021), Anforderungen und Testfälle (Wäschle et al., 2021) und Stakeholderbedarfe (Kubin et al., 2023) konkretisiert. Pfaff et al. (2024) schlagen für retrospektive Fallstudien den Produktprofil-Claim als Stellvertreter-Variable für die Variationsart des Produktprofils vor konkretisieren die generalisierten Variationsarten für den **Produktprofil-Claim** wie folgt:

- **„Übernahmevariation (CV):** Das Hauptproduktziel wird aus dem RSE übernommen.
- **Ausprägungsvariation (AV):** Das Hauptproduktziel wird aus dem RSE übernommen, jedoch werden Attribute verändert oder hinzugefügt (z. B. zusätzliche Zielkundengruppen, zusätzliche Nutzen).
- **Prinzipvariation (PV):** Das Hauptproduktziel des RSE wird zu einem anderen Ziel geändert (z. B. große Schiffe: Transport über das Meer vs. Hotel auf dem Wasser).“ (Pfaff et al., 2024)

In Abbildung 2.9 wird das Referenzsystem und die Variationsarten an einer Smart-Home Branderkennung illustriert.

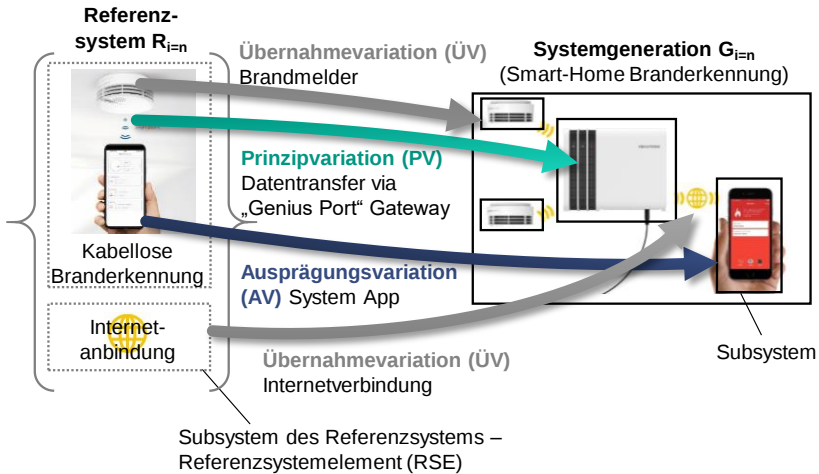


Abbildung 2.9: Die zwei zentralen Grundhypothesen des Modells der SGE am Beispiel der Entwicklung einer Smart-Home Branderkennung. Angepasste Darstellung nach Albers & Rapp (2022).

Ein weiteres grundlegendes Phänomen in der Entwicklung neuer technischer Systeme, auf dem das Modell der SGE aufbaut, ist, dass technische Systeme in **Generationen** entwickelt werden (vgl. 2.1.3) (Albers et al., 2015). Häufig ist die bereits im Markt befindliche Vorgängergeneration eine zentrale Quelle für Referenzsystemelemente für die aktuell in Entwicklung befindliche Systemgeneration (Albers et al., 2019). Das Modell der SGE kann mit den Modellelementen und Zusammenhängen in Formel 2.1 für die Beschreibung komplexerer Phänomene sowie der mathematischen Berechnung von Variationsanteilen in Formel 2.2 und Formel 2.3 weiter formalisiert werden (Albers et al., 2015; Albers, Fahl et al., 2020).

Sei G_i eine Systemgeneration, R_i das zugehörige Referenzsystem und V die Summe der Variationsaktivitäten für die Menge aller Subsysteme S_i der G_i . Dann beschreibt

$$R_i \xrightarrow{V} G_i \quad 2.1$$

die Entwicklung einer Systemgeneration G_i mit $i \in \mathbb{N}$. Mit dem Index $i = n$ wird immer die Systemgeneration in Entwicklung mit dem nächsten Markteintritt ($G_{i=n}$) bezeichnet.

Die Menge aller Subsysteme S_i der G_i kann in die drei Teilmengen CS_i , AS_i , PS_i aufgeteilt werden, wobei

- CS_i die Teilmenge der Subsysteme der G_i , die durch Übernahmevariation entwickelt werden,
- AS_i die Teilmenge der Subsysteme der G_i , die durch Ausprägungsvariation entwickelt werden und
- PS_i die Teilmenge der Subsysteme der G_i , die durch Prinzipvariation entwickelt werden, beinhalten.

Sei $|S_i|$ die Anzahl aller Subsysteme der G_i und $|CS_i|$, $|AS_i|$, $|PS_i|$ die Anzahl der mit einer der drei Variationsarten entwickelten Subsysteme. Dann sind

$$\begin{aligned}\delta_{CV,i} &= \frac{|CS_i|}{|S_i|} = \frac{|CS_i|}{|CS_i \cup AS_i \cup PS_i|} [\%] \\ \delta_{AV,i} &= \frac{|AS_i|}{|S_i|} = \frac{|AS_i|}{|CS_i \cup AS_i \cup PS_i|} [\%] \\ \delta_{PV,i} &= \frac{|PS_i|}{|S_i|} = \frac{|PS_i|}{|CS_i \cup AS_i \cup PS_i|} [\%]\end{aligned}\tag{2.2}$$

die Variationsanteile für eine Produktgeneration G_i , wobei

$$\delta_{ND,i} = \delta_{AV,i} + \delta_{PV,i}\tag{2.3}$$

den Neuentwicklungsanteil (ND, New Development) beschreibt.

Der Laufindex i ordnet die Systemgenerationen unabhängig von der Entwicklungssituation in ihrer Reihenfolge. Mit der Erweiterung um den Index n zu $i = n$ werden die Systemgenerationen bezogen auf die Entwicklungssituation zeitlich eingeordnet. Abbildung 2.10 veranschaulicht diese Art der Indexierung an zwei beispielhaften Entwicklungssituationen. In Entwicklungssituation 1 wird die G_2 als nächstes in den Markt eingeführt und daher mit dem Index n bezeichnet, in Entwicklungssituation 2 analog die G_3 . Mit $i = n - x$, $x \in \mathbb{N}$, $x > 0$ werden ausgehend von der $G_{i=n}$ weiter zurückliegende Vorgängergenerationen und mit $i = n + x$, $x \in \mathbb{N}$, $x > 0$ weiter in der Zukunft liegende Systemgenerationen bezeichnet.

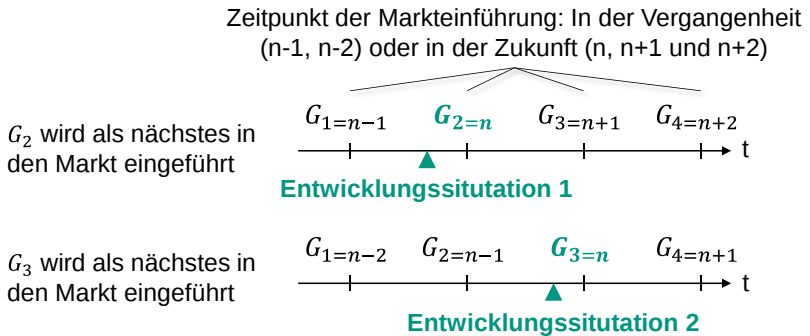


Abbildung 2.10: Zwei beispielhafte Entwicklungssituationen als Beispiel für die Verwendung der Indizes i und n im Modell der SGE.

Eine besondere Rolle im Modell der SGE nimmt die $G_{i=1}$ ein. Wird eine neue Systemgeneration ohne im Unternehmen vorhandene direkte Vorgängergeneration entwickelt, kann diese als $G_{i=n=1}$ bezeichnet werden (Albers, Ebertz et al., 2020). Die Wahrnehmung einer Systemgeneration als $G_{i=n=1}$ kann sich je nach Stakeholder unterscheiden, beispielsweise aus Kunden- oder Entwickelnden-Sicht. Daher empfehlen Albers et al. (2020) sieben Kriterien, um Systemgenerationen in der Entwicklung prospektiv anhand ihres G_1 -Charakters einzuordnen und geeignete Maßnahmen auszuwählen.

Unternehmen besetzen häufig mehrere Marktsegmente, indem sie mehrere Produktlinien, Produktfamilien und Produktvarianten parallel im Verbund eines **Produktportfolios** anbieten (Gausemeier & Plass, 2014). Dabei steigt die Variantenvielfalt innerhalb der Produktportfolios, weil Unternehmen auf immer individuellere Kundenwünsche reagieren müssen, um wettbewerbsfähig zu bleiben (Peglow et al., 2017). Schlegel et al. (2023) führen ein auf dem Modell der SGE basierendes Beschreibungsmodell für die Weiterentwicklung von Produktportfolios ein, das eine Unterteilung auf den Ebenen **Produktlinie** (L), **Produktfamilie** (F), **Produktvariante** (V) und **Subsysteme** (S) vorschlägt. In Abbildung 2.11 ist dargestellt, wie Elemente auf den Ebenen des Produktportfolios ebenfalls in Generationen weiterentwickelt werden und die Weiterentwicklung von Elementen auf den Ebenen wieder mit dem Modell der SGE beschrieben werden kann.

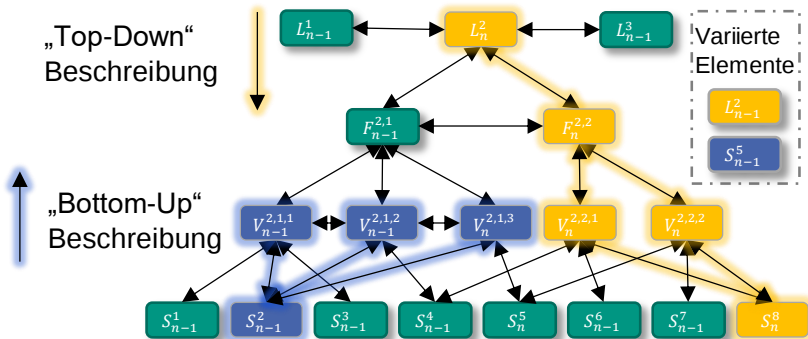


Abbildung 2.11: Beschreibungsmodell für die Weiterentwicklung von Produktportfolios (Schlegel et al., 2023). Orange: Aufgrund eines Auslösers auf Linienebene veränderte Elemente; Blau: Aufgrund eines Auslösers auf Subsystemebene veränderte Elemente; Grün: beibehaltene Elemente des Produktportfolios.

Das Modell der SGE kann präskriptiv und retrospektiv angewendet werden (Albers & Rapp, 2022). **Präskriptiv** fungieren intendierte Variationsaktivitäten für Subsysteme des neuen Systems als Planungsprämissen und Konkretisierung des Lösungsraums. **Retrospektiv** ermöglicht das Modell durch seinen hohen Formalisierungsgrad die Datensammlung und -Analyse in Produktentwicklungsprozessen und **datengetriebene Ansätze** für methodische Unterstützung. Variationsarten können retrospektiv durch den Vergleich von Subsystemen mit den zugrunde liegenden RSE bestimmt werden. Die retrospektive Bestimmung von Variationsarten und die Berechnung von Variationsanteilen ist mit Unsicherheiten verbunden und hängt insbesondere vom Systemmodell und der Wahl der RSE ab (Rapp et al., 2020). So resultiert ein höherer Detaillierungsgrad in der Modellierung häufig in einem niedrigeren PV-Anteil.

Dem ursprünglichen Ziel des Modells der SGE – die Entwicklung von praxisgerechten Methoden, Prozessen und Tools zu unterstützen (Albers et al., 2015) – folgend, wurde eine Vielzahl nutzenstiftender **Methoden, Prozesse und Tools basierend auf dem Modell der SGE** entwickelt und deren Mehrwert in der Praxis nachgewiesen. Rapp (2021) leistete einen grundlegenden Beitrag zur Formalisierung des Modells der SGE und wies nach, dass die Variationsarten und die Herkunft von RSE Schlüsselfaktoren für die Entwicklungszielgrößen Kosten, Risiko und Innovationspotenzial sowie für Entwicklungsaktivitäten sind. Das Risikoportfolio in Abbildung 2.12 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Neuentwicklungsanteil, aus der Herkunft von RSE resultierendem Wissensdefizit und Kosten sowie Risiko (Albers, Rapp et al., 2017). Pfaff, Rapp & Albers (2021a;

2021b) erweitern diesen Ansatz und verknüpfen mithilfe eines Datenmodells weitere Zielgrößen (Nachhaltigkeit, Qualität) mit weiteren Eigenschaften von RSE als Schlüsselfaktoren (Komplexität, Reifegrad).

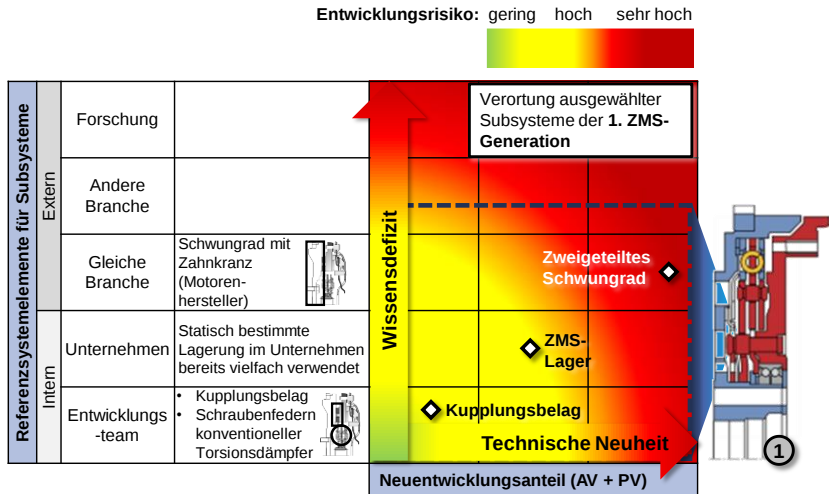


Abbildung 2.12: SGE Risikoportfolio am Beispiel der ersten Generation des Zweimassenschwungrads. Angepasste Darstellung nach Albers et al. (2017).

Ein weiterer zentraler methodischer Baustein sind Methoden zur Unterstützung der Ableitung von Variationen basierend auf RSE, um zukünftige Anforderungen zu erfüllen und dabei den Neuentwicklungsanteil zu reduzieren (Rapp et al., 2018). Marthaler (2021) entwickelte eine Systematik, um basierend auf Vorausschauergebnissen eine Roadmap für die Variation von Produkteigenschaften und darauf aufbauend zukunftsrobuste, also in möglichst vielen alternativen Zukünften potenziell erfolgreiche, Produktprofile abzuleiten (Marthaler et al., 2019). Schlegel et al. (2025) entwickelten eine Systematik zur zukunftsrobusten Weiterentwicklung von Produktportfolios. Die Systematik von Kübler et al. (2023) unterstützt bei der Identifikation sich zukünftig ändernder Produkteigenschaften und unterteilt diese in statische und dynamische Eigenschaften mit dem Ziel, Zukunftsrobustheit durch über mehrere Systemgenerationen upgradefähige Produkte zu erreichen. Neben der Planung von Variationen ist das Referenzsystem-Management (RSM) eine zentrale Aktivität in der Produktentstehung, für die Kempf (2025) ein grundlegendes Verständnis schafft und Methoden zur Identifikation von RSE (Kempf et al., 2023) und

Handlungsempfehlungen für die bessere Nutzbarkeit von Forschungsergebnissen als RSE für die Produktentwicklung (Kempf, Molz et al., 2025) aufzeigt.

Eine besondere Bedeutung kommt in der Produktentstehung den **frühen Phasen der Produktentwicklung** zu, da dort unter anderem das Produktprofil sowie zu realisierende Eigenschaften und Funktionen festgelegt werden (Albers, Heitger et al., 2018). Die Entscheidungen dieser frühen Prozessphasen haben eine hohe Auswirkung auf den weiteren Prozess, das letztendlich entwickelte Produkt und die Zielgrößen der Produktentwicklung (vgl. Kapitel 2.1.4), sind aber durch hohe Unsicherheit gekennzeichnet (Verworn & Herstatt, 2007). Albers, Rapp et al. (2017) definieren die Frühe Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung als „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- u. 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 et al., 2017, S. 4).

Neben dem Produktprofil schlagen Albers, Hünemeyer et al. (2023) das **Systemkonzept** als zentrales Ergebnis der Frühen Phase im Modell der SGE vor, das die fragmentierten Konzept-Definitionen im Stand der Forschung zusammenführt: „Ein Systemkonzept im Modell der SGE ist ein Konzept eines technischen Systems, das die aus dem Produktprofil abgeleiteten Ziele und Anforderungen an ein System sowie die Systemarchitektur und die zugehörigen Referenzsystemelemente und Variationsanteile unter Berücksichtigung der Randbedingungen definiert und der Validierung zugänglich macht“ (Albers et al., 2023, S. 2699).

2.2.4 ASE – Advanced Systems Engineering

Das ASE – Advanced Systems Engineering ist zugleich Framework und Leitbild, um in der Produktentstehung die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts anzugehen (Albers & Gausemeier, 2012; Albers, 2023a; Dumitrescu et al., 2021). ASE integriert die drei Perspektiven und Handlungsfelder Advanced Systems, Systems Engineering und Advanced Engineering. Abbildung 2.13 zeigt auf, wie die Entwicklung von Advanced Systems in den einzelnen Domänen – unterstützt durch Methoden, Prozesse und Tools des Advanced Engineerings – mithilfe einer durch

Systems Engineering ermöglichen Domänen-übergreifenden Vernetzungsebene zukünftig gelingen kann.

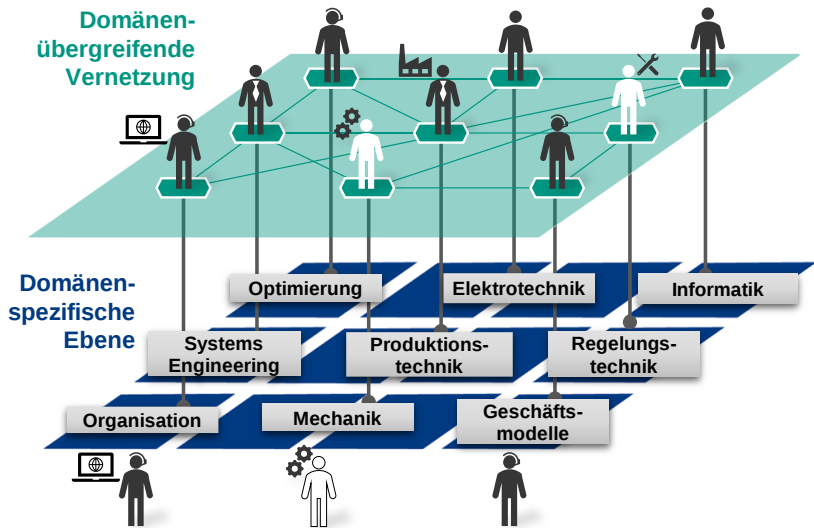


Abbildung 2.13: Kontinuierliches Wechselspiel zwischen domänenspezifischer Entwicklung und domänenübergreifender Vernetzung im Advanced Systems Engineering. Angepasste Darstellung nach Albers (2023a, S. 8).

Das ASE baut nach Albers, Dumitrescu et al. (2022) auf folgenden übergreifenden Konzepten auf:

- „Fachdisziplinübergreifende und modellbasierte Entwicklung von intelligenten, vernetzten, multidisziplinären und soziotechnischen Systemen.“
- Abdeckung des gesamten Innovationsprozesses von der Vorausschau der Entwicklung von Märkten, Technologien und Geschäftsumfeldern bis zum nachhaltigen Markterfolg.
- Neue, durch KI geprägte Engineering-Prozesse.
- Frühzeitige Erlebbarkeit des in Entwicklung befindlichen Systems für unterschiedliche Anspruchsgruppen (Stakeholder) zur Förderung von Akzeptanz und Identifikation“ (Albers et al., 2022, S. 12).

Advanced Systems sind intelligente bis hin zu autonomen, dynamisch vernetzte, durch soziotechnische Interaktion, hohe Komplexität und die Integration von

Services gekennzeichnete Systeme (Dumitrescu et al., 2021). Beispiele sind autonome Fahrzeuge oder hochvernetzte Haushaltsgeräte, die Kunden über die Analyse von Daten im Betrieb durch Remote Updates immer neue Funktionen bereitstellen (Albers et al., 2022). Herausforderungen bei der Entwicklung von Advanced Systems sind insbesondere Entwicklungskomplexität, Kostendruck und regulatorische Aspekte (Dumitrescu et al., 2021).

Systems Engineering wird nach der nach der VDI-Richtlinie 2221 angelehnt an das Begriffsverständnis des International Council on Systems Engineering (INCOSE) als interdisziplinärer Ansatz verstanden, „um komplexe technische Produkte/Systeme in großen Projekten zu entwickeln und zu realisieren“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 10; Walden et al., 2015). Dabei werden Kundenbedarfe und erforderliche Funktionen früh und problemorientiert formuliert. Das Systems Engineering baut auf den Konzepten der Systemtheorie der Technik auf (vgl. Kapitel 2.2.1). Das Model Based Systems Engineering (MBSE) baut auf der Systems Modeling Language (SysML) auf und verbindet alle Systemmodelle von der Frühen Phase des Produktentstehungsprozesses bis zu späteren Phasen des Produktlebenszyklus in einem zentralen, interdisziplinären Systemmodell (Walden et al., 2015).

Advanced Engineering fasst neue Methoden, Prozesse und Tools zusammen, die bestehende Ansätze vor dem Hintergrund der Digitalisierung und basierend auf Kreativität und Agilität erweitern (Albers et al., 2022). Agilität sollte dabei zielgerichtet implementiert und je nach Kontext geeignet mit strukturierenden Prozesselementen kombiniert werden, was Albers, Heimicke et al. (2019) im Ansatz des ASD – Agile Systems Design zusammenfassen. Eine weitere wichtige Säule des Advanced Engineering ist digitale Durchgängigkeit durch Produktlebenszyklusmanagement (PLM) (Albers et al., 2022). Das Ziel von PLM ist es, über den Produktlebenszyklus hinweg alle Informationen zu einem Produkt und aller mit Herstellung und Betrieb verbundenen wertschöpfenden Prozesse konsistent zu managen und für die Unterstützung des Produktentstehungsprozesses zur Verfügung zu stellen (Gerhard, 2016). Auf dieser Datenbasis aufbauend können Assistenzsysteme beispielsweise mithilfe von Künstlicher Intelligenz den Menschen in vielen Aktivitäten der Produktentstehung unterstützen (Dumitrescu et al., 2021; Kharatyan et al., 2022). Ein wichtiger Anwendungsfall ist das Lernen aus Erfahrungswissen, beispielsweise durch das Modell der SGE (Dumitrescu et al., 2021).

Im Kontext **datenbasierter oder „data-driven“ Ansätze** im Advanced Engineering werden die Begriffe Data Mining und Künstliche Intelligenz häufig verwendet. **Data Mining** umfasst die Extraktion von Wissen sowie die Erkennung von Mustern aus

großen, dynamischen und komplex strukturierten Daten (Bissantz & Hagedorn, 2009). Im Fokus von Data Mining steht also die Wissensgenerierung. Nach Probst et al. (2012) ist Wissen „die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen [...] und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge“ (Probst et al., 2012, S. 23). Grundlage für Wissen sind vernetzte Informationen, die wiederum auf Daten mit Kontext basieren (North, 2016; Probst et al., 2012). Unter **Künstlicher Intelligenz (KI)** kann nach Banh & Strobel (2023) eine Klasse von Algorithmen verstanden werden, die Aufgaben ausführen können, die normalerweise Menschen vorbehalten sind. Insbesondere Generative KI kann als Assistenzsystem Produktentwickelnde bei der Problemlösung unterstützen (Michael et al., 2023). Agentische KI Systeme (KI Agenten) mit höherem Autonomiegrad können alleine oder im Verbund komplexere Problemstellungen lösen (Shavit et al., 2023).

2.3 Für die Arbeit relevante Grundlagen der Evolutionstheorie

In Kapitel 2.3.1 und Kapitel 2.3.2 werden die für die Analogiebildung in dieser Arbeit relevanten Konstrukte der Synthetischen Evolutionstheorie (Modern Synthesis, MS) und der Erweiterten Synthese (Extended Evolutionary Synthesis, EES) erläutert und in Kapitel 2.3.3 nach Laland et al. (2015) gegenübergestellt.

2.3.1 Synthetische Evolutionstheorie (Modern Synthesis – MS)

Im Allgemeinen Sprachgebrauch wird unter der Evolutionstheorie die Synthetische Evolutionstheorie oder Modern Synthesis, kurz „MS“, verstanden, die aus den Darwin'schen Erkenntnissen zur Selektion, den Mendel'schen Erkenntnissen zur Genetik sowie darauf aufbauenden Erkenntnissen zur Populationsgenetik und der Makroevolution (Artbildung) hervorging (Lange, 2020).

Darwin veröffentlichte die **Selektionstheorie** 1859 in seinem zentralen Werk *The Origin of Species* (Darwin, 1859/2003). Die Theorie basiert auf Beobachtungen in der Natur und in der Züchtung, in der durch den Menschen Tiere zur Nachzucht selektiert werden. Eine zentrale Erkenntnis aus der Naturbeobachtung war, dass in der Natur von mehreren Populationen jene überlebt, die sich am besten an sich verändernde Umweltbedingungen anpasst. Dieses Prinzip der natürlichen Selektion bezeichnete Darwin als „survival of the fittest“, also das Überleben der am besten angepassten Individuen. Eine zentrale Erkenntnis aus der Beobachtung der Züchtung war, dass variierte Merkmale der Elterngenerationen an die Folgeneration vererbt werden.

Erst mit der **Genetik** konnte erklärt werden, nach welchen Prinzipien diese Vererbung funktioniert und wie neue Merkmale entstehen. Grundlagen der Genetik werden im Folgenden nach Graw (2015) eingeführt. Die Genetik ist die durch Gregor Mendel begründete „Wissenschaft von der Erzeugung“ und befasst sich mit den Regeln und Mechanismen der Ausbildung von erblichen Merkmalen und deren Weitergabe an die nächste Generation. Grundlegender Mechanismus der Entstehung neuer Merkmale durch Vererbung ist die zufallsgesteuerte Rekombination und ungerichtete, graduelle Mutation der in der DNA zusammengefassten elterlichen Gene, die für die Ausbildung der Merkmale der Kind-Generation verantwortlich sind. Diese Veränderungen können sich positiv, neutral oder negativ auf die Anpassung an die Umweltbedingungen und damit die Überlebens- und Fortpflanzungschancen eines Individuums auswirken. Kleine Variationen können sich, bei positiver Selektion, über Generationen immer weiter ausprägen und komplexer werden.

Ausgehend von diesen individuellen Variationen entwickeln sich **Populationen** durch die zentralen Evolutionsmechanismen Mutation, natürliche Selektion, Gendrift⁵ und Genfluss⁶ weiter, welche die Häufigkeit der auftretenden Gene beeinflussen (Futuyma, 1998). Neue **Arten** werden gebildet, wenn zwei Populationen einer Art sich durch diesen Prozess so unterscheiden, dass eine Reproduktionsbarriere entsteht (Futuyma, 1998).

2.3.2 Erweiterte Synthese (Extended Evolutionary Synthesis – EES)

Die Erweiterte Synthese oder Extended Evolutionary Synthesis, kurz EES, soll ein konzeptioneller Bezugsrahmen zur Erklärung evolutionärer Phänomene sein, die mit der synthetischen Evolutionstheorie nicht ausreichend erklärt werden können (Laland et al., 2015). Die EES ist – verglichen mit der MS – eine noch recht junge und viel diskutierte Theorie (Lange, 2020). Die Kernaspekte der EES werden im Folgenden nach Laland et al. (2015) zusammengefasst.

⁵ Gendrift: Zufällige Veränderungen der Häufigkeit von Genen in kleinen Populationen. Beispiel: Durch einen Zufall sterben einige Tiere mit einem bestimmten Gen, obwohl es keinen Nachteil hatte.

⁶ Genfluss: Austausch von Genen zwischen verschiedenen Populationen einer Art. Beispiel: Individuen wandern von einer Population in eine andere und paaren sich dort.

Die zwei grundlegenden Konstrukte der EES sind Konstruktive Entwicklung und Reziproke Kausalität. In der MS werden Gene vererbt und die Entwicklung des Phänotyps⁷ erfolgt genetisch vorprogrammiert in Abhängigkeit zu seiner Umwelt. Bei der **Konstruktiven Entwicklung** der EES gestalten Organismen ihre Entwicklung aktiv mit, indem sie mit der Umwelt wechselwirken und flexibel auf innere und äußere Einflüsse reagieren. Genetik und Umwelt sind so dynamisch miteinander verbunden. Durch zum Beispiel erkundendes Verhalten von Zellen und Geweben können auch ohne genetische Veränderungen neue Merkmale entstehen. In der MS besteht eine einseitige Kausalität von Umwelt zu Organismus. Die **Reziproke Kausalität** der EES bedeutet, dass Organismen durch ihre Aktivitäten Umweltbedingungen verändern, die wiederum die evolutionäre Entwicklung beeinflussen. Der Fokus der EES liegt auf vier Forschungsgebieten:

- **Variationstendenz in der Entwicklung (Developmental Bias):** Die Entwicklung von Organismen beeinflusst systematisch, welche phänotypischen Varianten entstehen. Veränderungen sind nicht ausschließlich zufällig, wie in der MS.
- **Entwicklungsplastizität:** Organismen passen ihren Phänotyp flexibel an Umweltbedingungen an. Diese Reaktionen können evolutionäre Prozesse mitgestalten.
- **Inklusive Vererbung:** Neben genetischer Information werden auch nicht-genetische Vererbungskanäle berücksichtigt, darunter epigenetische Vererbung, ökologische Vererbung und kulturelle Transmission.
- **Nischenkonstruktion:** Organismen verändern aktiv ihre Umwelt. Diese Rückwirkungen beeinflussen die evolutionären Bedingungen für sie selbst und andere Arten.

2.3.3 Vergleich der zentralen Konstrukte von MS und EES

Mit der MS und der EES lassen sich Phänomene in der natürlichen Evolution erklären. Bei der Erklärung einiger Phänomene ergänzt die EES die MS, bei anderen Phänomenen unterscheiden sich die theoretischen Konstrukte grundlegend. Tabelle 2.2 stellt die zentralen Konstrukte der MS und der EES nach Laland et al. (2015) vergleichend gegenüber.

⁷ Phänotyp bezeichnet die Summe aller erkennbaren Merkmale eines Organismus einschließlich Erscheinungsbild, innere Vorgänge und gegebenenfalls Verhaltensweisen (Lange, 2020, S. 16).

Tabelle 2.2: Vergleich der zentralen Konstrukte der MS und der EES, zusammengefasst aus Laland et al. (2015).

	Synthetische Evolutionstheorie (MS)	Erweiterte Synthese (EES)
Anpassungs-mechanismus und Wechselwirkung mit der Umwelt	Die natürliche Selektion wählt die am besten an die Umwelt angepassten Individuen aus und ist die alleinige kausale Ursache für Evolution.	Organismen beeinflussen aktiv ihre Umweltbedingungen, die wiederum die evolutionäre Entwicklung beeinflussen (Reziproke Kausalität).
Informations-weitergabe an die nächste Generation	Information wird nur durch genetische Vererbung weitergegeben. Entwicklung des Phänotyps erfolgt „ programmiert “.	Auch Verhalten, soziale Strukturen und Umweltwirkungen werden durch inklusive Vererbung weitergegeben. Entwicklung des Phänotyps erfolgt konstruktiv .
Variations-mechanismus	Zufällige genetische Variation durch Rekombination und Mutation.	Variationstendenz in der Entwicklung (Developmental Bias).
Generations-übergreifende Evolution	Gradualismus : Evolution verläuft kleinschrittig über viele Generationen.	Variable Änderungsraten : Auch sprunghafte Anpassungen sind möglich.
Makroevolution	Makroevolution wird durch Prozesse der Mikroevolution erklärt.	Zusätzliche Faktoren wie Developmental Bias und ökologische Vererbung fördern Makroevolution.

2.4 Durch die Evolutionstheorie motivierte Ansätze in der Entwicklungsmethodik

Neben den in der Einleitung angesprochenen Forschungsfeldern gingen auch aus der entwicklungsmethodischen Forschung Ansätze hervor, die auf Analogien zur Biologie, insbesondere zur Evolutionstheorie, aufbauen. Im Folgenden werden Ansätze aus der Literatur anhand von Zweck und Vorgehensweise vorgestellt. Diese Ansätze lassen sich in die Kategorien:

- Musterbasierte Evolutions-motivierte Ansätze
- Methodische Evolutions-motivierte Ansätze
- Datenbasierte Evolutions-motivierte Ansätze

Die Literaturrecherche und der Vergleich der Ansätze wurden auf einer Fachkonferenz (Pfaff, Kempf al., 2022) veröffentlicht.

2.4.1 Musterbasierte Evolutions-motivierte Ansätze

Alle Ansätze in dieser Kategorie zielen darauf ab, die Entwicklung neuer Systemgenerationen durch aufbereitetes Wissen aus vergangenen Entwicklungen zu unterstützen. Grundlegend dafür ist der **Musteransatz** nach Alexander, Ishikawa, Silverstein und Jacobson (1977), der ursprünglich für Architektur und Bauingenieurwesen formuliert wurde. Demnach können häufig wiederkehrende Lösungsprinzipien mit zugehörigem Problemkontext in Mustern formuliert und auf andere Probleme übertragen werden (Deigendesch, 2009; Weber & Husung, 2016).

Musterbasierte Ansätze aus der Konstruktionsmethodik

Weber und Husung (2016) beschreiben **Lösungsmuster** („Solution Patterns“) im Kontext des CPM (Characteristics-Properties Modeling) (Weber, 2014) als Aggregation von Merkmalen („Characteristics“) und Eigenschaften („Properties“) mit bekannten Beziehungen zwischen Merkmalen und Eigenschaften. Beispielsweise sind für die Eigenschaften Festigkeit und Steifigkeit bei bestimmten Lastarten bestimmte Querschnitte von Bauteilen als Merkmale optimal, zum Beispiel T- oder I-förmige Querschnitte für Biegebeanspruchungen (Weber & Husung, 2016). Albers und Sauer (2023) systematisieren wiederkehrende Lösungsmuster in Form von **Konstruktionselementen**, die wiederkehrende prinzipielle technische Lösungen für bestimmte Funktionen beschreiben, die durch Gestaltung an spezifische Anforderungen angepasst werden müssen. Weitere Ansätze der Konstruktionsmethodik, die erfolgreiche Muster zur Verfügung stellen, sind **Konstruktionsregeln** und **-Kataloge**, **Gestaltungsrichtlinien**,

Gestaltungsprinzipien und die **Grundregeln der Gestaltung** (Kirchner & Neudörfer, 2021; Pahl et al., 2007; Roth, 2001).

Ein weiterer weit verbreiteter Musteransatz sind die **40 Innovativen Grundprinzipien** nach Altshuller (1986), die aus der Analyse von über 40.000 Patentschriften hervorgingen und Teil von TRIZ – der Theorie des erfinderischen Problemlösens – sind. TRIZ ist ein Werkzeugkasten mit Theorien, Methoden und Hilfsmitteln, der bei der Strukturierung und Lösung technischer Problemstellungen unterstützen soll (Adunka, 2016). Die 40 Innovativen Grundprinzipien sind grundlegende Lösungsprinzipien, welche schon häufig zu einer neuen technischen Lösung geführt haben und daher erfolgsversprechende Suchrichtungen darstellen (Klein, 2014). Die Innovativen Grundprinzipien dienen zum Auflösen technischer Widersprüche (Altshuller, 1986). Beispielsweise „Innovationsprinzip 3 – Prinzip der örtlichen Qualität:

- a) Von der homogenen Struktur des Objekts oder des umgebenden Mediums (des äußeren Einflusses) ist zu einer inhomogenen Struktur überzugehen.
- b) Die verschiedenen Teile des Objekts sollen unterschiedliche Funktionen erfüllen.
- c) Jedes Teil des Objekts soll sich unter solchen Bedingungen befinden, die seiner Arbeit am meisten zuträglich sind.“ (Altshuller, 1986, S. 87)

Albers, Ohmer et al. (2011) abstrahieren die 40 Innovativen Grundprinzipien mithilfe des C&C²-Ansatzes nach Albers & Matthiesen (2002), um diese besser übertragbar und einfacher anwendbar zu machen. Ein C&C²-Modell verknüpft mithilfe der drei Kernelemente Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) und Connector (C) die Funktion und die Gestalt eines Systems. So können die 40 Innovativen Grundprinzipien mithilfe der vier Operatoren i) Hinzufügen von WFP, ii) Entfernen von WFP, iii) Ändern der Eigenschaften von WFP und iv) Ändern der Eigenschaften von LSS ausgedrückt werden.

Evolutions-motivierte musterbasierte Ansätze

Auch die in den beiden folgenden Absätzen erläuterten Ansätze S-Kurve und die Gesetze der Entwicklung von Systemen sind ursprünglich Teil von TRIZ und gehen auf Altshuller (1986) zurück. Altshuller selbst motiviert seine Ansätze nicht mit einer Analogie zur natürlichen Evolution. Die folgenden Ansätze, die auf Altshullers Erkenntnissen aufbauen, hingegen schon.

S-Kurven werden verwendet, um die Phasen zu veranschaulichen und zu beschreiben, die Produkte, Technologien, Unternehmen oder ganze Branchen durchlaufen. Altshuller (1986) unterteilt die S-Kurve, wie in Abbildung 2.14

dargestellt, in die vier Abschnitte Kindheit, Reife, Alter und Rückgang. In der Kindheit findet eine langsame Entwicklung statt. Die Reife ist durch eine rasche Verbesserung des Reifegrades und dem Beginn der Massenanzahl gekennzeichnet. Mit dem Rückgang lässt das Entwicklungstempo nach. Im Alter setzt entweder eine Stagnation oder ein Rückgang der Verkaufszahlen ein, dem durch eine Ablösung durch einen Nachfolger begegnet werden kann. Auch die Lebenszyklen nach Wesner (1977) leiten sich aus den S-Kurven ab. S-Kurven werden dazu genutzt, die betrachtete Entität, beispielsweise eine Systemgeneration, datenbasiert einzuordnen und entsprechend der Position entlang der S-Kurve geeignete Maßnahmen einzuleiten (Klein, 2014; Sawaguchi, 2011).

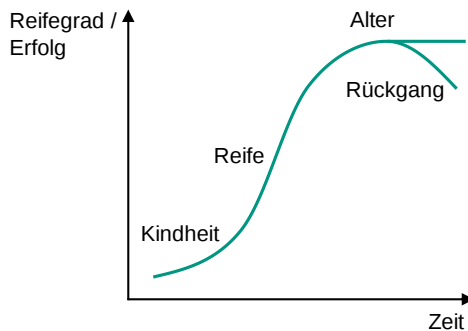


Abbildung 2.14: Lebenslinie technischer Systeme als S-Kurve nach (Altshuller, 1986). Eigene Darstellung.

Die **Gesetze der Entwicklung von Systemen** sollen grundlegende Regeln für die Lebensfähigkeit und Weiterentwicklung aller technischen Systeme darstellen (Altshuller, 1986). Gesetz 2 – Gesetz der energetischen Leitfähigkeit eines Systems lautet beispielsweise: „Eine notwendige Bedingung für die Lebensfähigkeit eines technischen Systems ist der Energiefluß durch alle Teile des Systems“ (Altshuller, 1986, S. 125). Zlotin & Zusman (2013) und Klein (2014) erweitern Altshullers Gesetze und ordnen diese den Lebensphasen zu. Abbildung 2.15 zeigt die Gesetze sowie deren Klassifizierung und Zuordnung nach Klein (2014). Das Mooresche Gesetz (Moore, 2006), nachdem sich bei fortlaufender Entwicklung die Anzahl der Transistoren, die auf einen integrierten Schaltkreis gleicher Größe passen, alle 18 Monate verdoppelt, kann als Gesetz für die Entwicklung von Systemen verstanden werden.

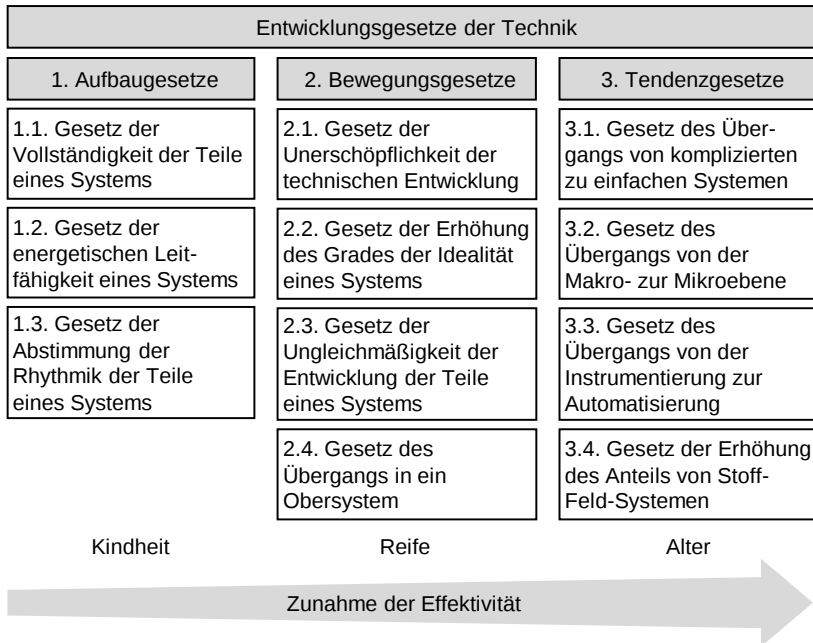


Abbildung 2.15: Entwicklungsgesetze der Technik aufgeteilt in die Kategorien Aufbau-, Bewegungs- und Tendenzgesetze nach Klein (2014, S. 132), der auf Altshuller (1986) und Zlotin & Zusman (2013) aufbaut. Eigene Darstellung.

Konkreter formuliert, aber nicht mehr auf alle technischen Systeme anwendbar, sind **Evolutionäre Trends** (Klein, 2014) oder auch „**Lines of Evolution**“ (Zeihsel et al., 2013). Diese Trends werden genutzt, um auf Basis vergangener Entwicklungen zukünftige Entwicklungspfade abzuleiten (Klein, 2014). Sie sind spezifischer formuliert als die Gesetze der Entwicklung von Systemen und beziehen sich auf bestimmte technische Systeme. In der Literatur existiert eine große Anzahl solcher Trends. Zeihsel et al. (2013) veröffentlichten eine Sammlung von 460 „Lines of Evolution“. Zlotin & Zusman (2013) konkretisieren Gesetz 3.3 nach Klein (2014) (vgl. Abbildung 2.15) für die Kontrolle von technischen Prozessen mit drei „Lines“:

- Werkzeuge zur Steuerung der Systemfunktion, wie Ruder, Lenkräder, Tragflächen, Führungen.
- Spezielle Vorrichtungen zur Umwandlung von Steuerbefehlen, wie Verstärker, Reduzierer, Filter, Gleichrichter, Stabilisatoren, Modulatoren/Demodulatoren.

- Vorrichtungen zur Erzeugung von Steuerbefehlen, wie Nocken, Kreiselinstrumente, Lochkarten.

Shpakovsky (2006) verwendet „**Evolution Trees**“, die an Stammbäume angelehnt sind, um die Entwicklung eines technischen Systems oder einer Technologie strukturiert darzustellen. Trends werden als Äste dargestellt, charakteristische Systemgenerationen als Knoten entlang dieser Äste. Zweck der Evolution Trees (Shpakovsky, 2006) ist es, konkurrierende Patente zu vermeiden oder die zukünftige Entwicklung eines technischen Systems vorherzusagen.

Dominant Design nach Henderson und Clark (1990) beschreibt ein weiteres evolutionäres Phänomen in der Produktentwicklung. Technologien und Produkte sind zu Beginn nicht vollständig ausgereift. Am Anfang steht eine Phase des Experimentierens und konkurrierender Lösungsansätze, bis sich ein Dominant Design am Markt und in der Produktentwicklung durchsetzt. Radikale Innovationen (siehe Kapitel 2.1.3) würden demnach ein neues, dominantes Design am Markt etablieren (Henderson & Clark, 1990).

2.4.2 Methodische Evolutions-motivierte Ansätze

Die Ansätze in dieser Kategorie bieten durch die Evolutionstheorie motivierte methodische Unterstützung, also ein planmäßiges Vorgehen zur Erreichung eines bestimmten Ziels (vgl. VDI-Richtlinie 2223).

ARIZ – Algorithmus zur Lösung von Erfindungsaufgaben

ARIZ – Algorithmus zur Lösung von Erfindungsaufgaben nach Altshuller (1986) ist eine Anleitung zur Lösung von Erfindungsaufgaben innerhalb von TRIZ. Ziel von ARIZ ist die Lösung spezifischer technischer Probleme mittels eines stark formalisierten, schrittweisen Vorgehens, das sich in drei Phasen untergliedern lässt (Klein).

- **Definitionsphase:** Problemstellung ohne Fachbegriffe formulieren, relevante System- und Umgebungselemente beschreiben, physikalische Widersprüche und deren Gegenteile definieren, verfügbare Ressourcen ermitteln.
- **Lösungsphase:** Ideales Endresultat ableiten, Widerspruch auf Makro- und Mikroebene analysieren, Lösungsprinzipien anwenden, ggf. Iterationen durchführen.
- **Bewertungsphase:** Gefundene Lösung detailliert prüfen, Übertragbarkeit auf andere Probleme bewerten und theoretische Umsetzung mit praktischer Umsetzung vergleichen.

Die Methodik umfasst Schritt-für-Schritt-Anweisungen zur Identifikation und Lösung physikalischer Widersprüche in Teilsystemen unter Anwendung der oben genannten Entwicklungsgesetze, Trends und Innovationsprinzipien.

Directed Evolution

Directed Evolution nach Zlotin und Zusman (2013) baut auf ARIZ auf und schlägt einen Innovationsprozess in fünf Phasen vor, um Gesetze, Trends und Innovationsprinzipien zu nutzen. Ziel von Directed Evolution ist die „evolutionäre“ Entwicklung technischer Systeme mit Unterstützung eines Softwaretools als Leitfaden und Hilfsmittel. Die fünf Phasen nach Zehisel et al. (2013) beschreiben den in Abbildung 2.16 dargestellten Prozess, der Erkenntnisse der vergangenen Evolution eines konkreten Systems mit allgemeinen musterbasierten Ansätzen kombiniert, um zukünftige Systeme zu entwickeln.

- 1) Analyse des Ist-Zustands:** Ausgangspunkt ist die aktuelle Struktur und Funktionalität des Systems, da das Verständnis der Gegenwart wichtig ist, um die Vergangenheit (Historie) zu verstehen.
- 2) Diagnostik:** Analyse der Entwicklungsgeschichte des Produkts, der Technologie oder des Systems, um daraus Erkenntnisse für die zukünftige Entwicklung abzuleiten.
- 3) Ideensynthese:** Generierung von Ideen basierend auf identifizierten Mustern, Kombination zu Konzepten und erste Risikoabschätzungen.
- 4) Entscheidungsfindung:** Verfeinerung der Konzepte zu detaillierten Evolutionsszenarien, um die zukünftige Entwicklung gezielt zu steuern.
- 5) Unterstützung des Evolutionsprozesses:** Umsetzung der abgeleiteten Szenarien in die Praxis.

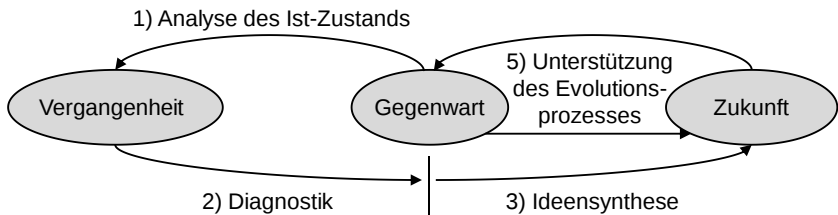


Abbildung 2.16: Die fünf Phasen von Directed Evolution in Bezug zu Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft (Zeihsel et al., 2013). Eigene Darstellung.

Widerspruchorientierte Innovationsstrategie – WOIS

Ebenfalls auf ARIZ baut die widerspruchorientierte Innovationsstrategie – WOIS nach Linde & Hill (1993) auf. Ziel von WOIS ist die Entwicklung von Innovationen durch kompromissloses Überwinden von Widersprüchen (Linde et al., 1999). WOIS nutzt Widersprüche gezielt, um diese zu durchbrechen und so eine Abkürzung aus der „evolutionären Spirale“ fortlaufender Optimierung zu nehmen (Linde et al., 1999). WOIS ist in drei Phasen gegliedert (Linde et al., 1999):

- **Orientierungsphase:** Analyse des Problems und des übergeordneten Ziels; Untersuchung von Markt, Bedarfen, System und Umgebung; Prozess- und Produktanalyse; Stand der Technik; Generationenanalyse; Evolutionstrends und Ableitung von Systemparametern sowie Problemfeld-Matrix.
- **Widerspruchsphase:** Identifikation und Analyse von Entwicklungsbarrieren anhand von Widersprüchen, Definition von Entwicklungsaufgaben ohne Kompromisse.
- **Lösungsphase:** Formulierung der Widerspruchsaufgabe; Anwendung bekannter Lösungsprinzipien, Effekte und Standards; Variation und Kombination von Basislösungen zur Erfüllung der Anforderungen.

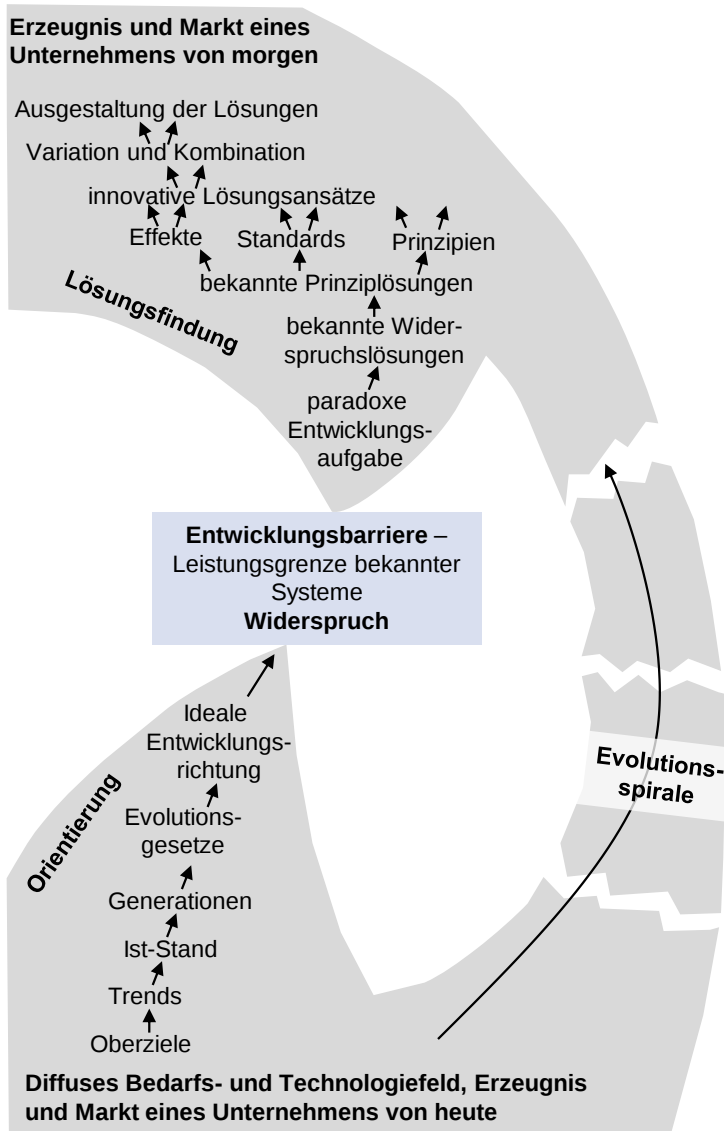


Abbildung 2.17: Durchbrechen der evolutionären Spirale mit WOIS (Linde et al., 1996). Eigene Darstellung.

2.4.3 Datenbasierte Evolutions-motivierte Ansätze

Ansätze in dieser Kategorie – die **Autogenetische Konstruktionstheorie**, **Technische Vererbung** und **zeitabhängige Netzwerkmodelle** – integrieren im Sinne des Advanced Engineerings datenbasierte Methoden und automatisieren zum Teil Produktentwicklungsaktivitäten.

Autogenetische Konstruktionstheorie

Die Vision der Autogenetischen Konstruktionstheorie nach Vajna und Wegner (1997) und Vajna et al. (2005) „ist die Übertragung des Evolutionsprozesses von der Natur auf technische Systeme“ (Vajna et al., 2005). Die Produktentwicklung als Ganzes wird analog zur natürlichen Evolution als komplexes Optimierungsproblem verstanden, für dessen Lösung sich evolutionäre Algorithmen eignen (Lachmayer et al., 2014). In Tabelle 2.3 sind die Elemente der Technischen Vererbung, die analog zur natürlichen Evolution verstanden werden, und deren Definition aufgeführt.

Tabelle 2.3: Definition von Elementen der Technischen Vererbung analog zu Elementen der natürlichen Evolution nach (Mozgova et al., 2015, S. 5–6), Übersetzung nach Rapp (2021).

Element	Definition
Technische Evolution	Technische Evolution ist ein Prozess der Steuerung, schrittweisen und kontinuierlichen Veränderung von technischen Systemen, Produkten und Prozessen sowie von Modellen mit dem Ziel der Anpassung an Einflüsse und Anforderungen.
Individuum	Das Individuum ist das kleinste betrachtete technische System, Produkt, Prozess oder Modell in einer Population.
Generation	Die Generation ist eine Gruppe von Individuen mit gleichem Entwicklungsstand.
Population	Die Population besteht aus allen Generationen von Individuen eines technischen Systems, Produkts und Prozesses sowie eines Modells zum aktuellen Zeitpunkt.
Technische Vererbung	Technische Vererbung ist die Übertragung der gesammelten und verifizierten Informationen aus der Produktion und Nutzung auf die nächste Produktgeneration.
Selektion	Auswahlprozess basierend auf mehreren Kriterien eines Anforderungsprofils.
Mutation	Ein Prozess mit gezieltem oder nicht gezieltem Charakter zur Erzeugung von Varianten mit daraus resultierenden veränderten Eigenschaften.

Wissen aus vorherigen Generationen und externen Vorbildobjekten wie weiteren technischen Artefakten oder Katalogen wird über Startobjekte in den Optimierungsprozess eingebracht (Vajna & Wegner, 1997). Grundlage für die Beschreibung des Optimierungsproblems ist dabei ein parametrisches Produktmodell und ein Anforderungsprofil (Mozgova et al., 2015). Ausgehend von dieser Problembeschreibung werden angelehnt an Phänomene der natürlichen Evolution durch technische Vererbung und Mutation neue Varianten erzeugt und in der Selektion basierend auf einem Anforderungsprofil ausgewählt (Mozgova et al., 2015). Das Ergebnis ist eine Menge äquivalenter, jedoch nicht ähnlicher, einzigartiger Lösungen, die den aktuellen Anforderungen und Bedingungen am besten entsprechen (Vajna et al., 2011). In den letzten Jahren wurde vor allem das Paradigma der Technischen Vererbung („Technical Inheritance“) weiter erforscht.

Das Paradigma der **Technischen Vererbung** nutzt die Analogie zur biologischen Vererbung über Populationen und Generationen. Die technischen „Individuen“ weisen durch Fertigung, Montage und unterschiedliche Nutzungsbedingungen spezifische Merkmalsausprägungen auf (Lachmayer et al., 2014). In Analogie zur biologischen Vererbung werden diese Informationen systematisch in die nächste Generation „vererbt“. Technische Vererbung wird nach Lachmayer et al. (2014) definiert als die Übertragung gesammelter und verifizierter Informationen aus Produktion und Nutzung eines Produkts auf die nächste Generation.

Ermöglicht wird Technische Vererbung durch mechatronische Maschinenelemente mit integrierter Sensorik, sogenannte Gentelligente Komponenten, die Betriebs- und Zustandsdaten über den gesamten Produktlebenszyklus erfassen, diese Daten für Wartungs-/Weiterverwendungsentscheidungen nutzen und in die Entwicklung der nächsten Produktgeneration weitergeben (Lachmayer et al., 2016). Die hierfür erforderliche, konsistente Verknüpfung von Daten mit den jeweiligen Individuen bedingt geeignete Datenmanagement-Lösungen (z.B. PLM, siehe Kapitel 2.2.4), die die Sammlung, Kombination und Kommunikation der Informationen in die Entwicklung unterstützen (Scheidel et al., 2017).

Der Radträger mit integrierter Sensorik in Abbildung 2.18 stellt ein Beispiel für eine Gentelligente Komponente dar (Lachmayer et al., 2014). Bei der Gestaltung Gentelligenter Komponenten ist die Frage der Sensorplatzierung zentral. Für die Festlegung von Anzahl, Position und Messprinzipien von Sensoren passend zu den relevanten Lastfällen wurde von Galfione et al. (2025) und Meyer zu Westerhausen et al. (2024) methodische Unterstützung entwickelt.

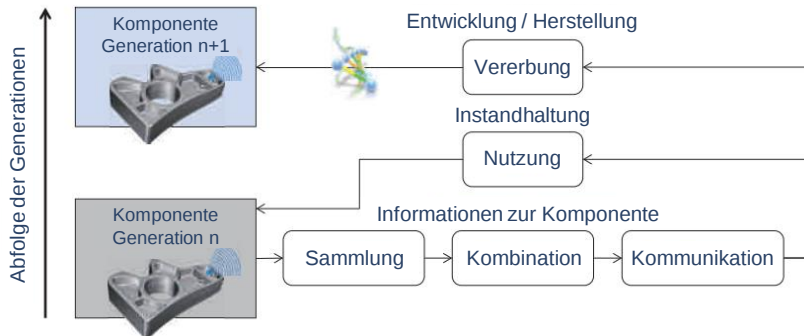


Abbildung 2.18: Radträger mit integrierter Sensorik als Beispiel für eine Gentelligente Komponente und Anwendungsfall der Technischen Vererbung. Übersetzte Darstellung nach Lachmayer et al. (2014).

In der Entwicklung eignen sich für die Erzeugung optimierter Varianten generative, parametrisierte Konstruktionsumgebungen wie der Generative Parametric Design Approach (GPDA) nach Sauthoff & Lachmayer (2014) der die Optimierung des Designs innerhalb eines durch Schnittstellen und Randbedingungen definierten Lösungsraums ermöglicht. Angelehnt an die natürliche Evolution lassen sich mit genetischen Algorithmen Varianten generieren, bewerten und eine für die nächste Generation optimierte Lösung auswählen (Sauthoff & Lachmayer, 2014; Lachmayer et al., 2013). In Abbildung 2.19 wird der Prozess der technischen Vererbung über drei Produktgenerationen hinweg dargestellt.

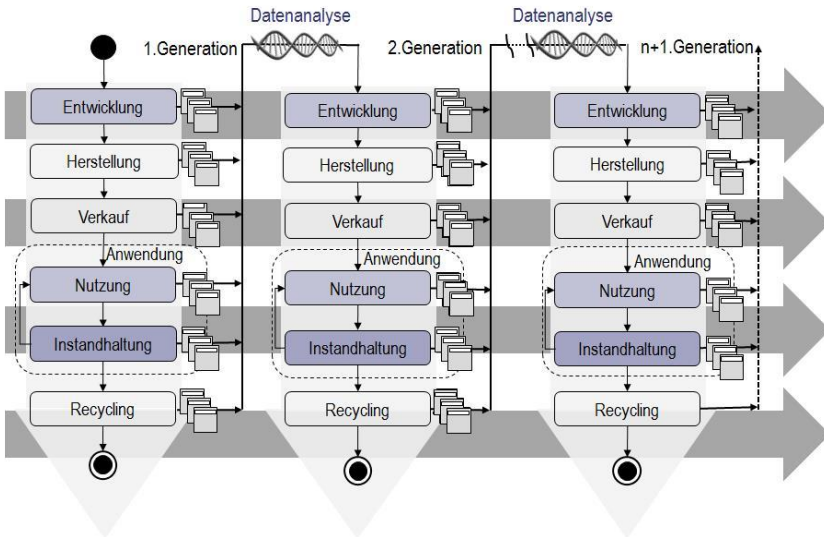


Abbildung 2.19: Generationsübergreifende Betrachtung einer technischen Vererbung (Gottwald, 2016).

Zeitabhängige Netzwerkmodelle

Eine weitere Art datenbasierter, Evolutions-motivierter Ansätze beschreibt die Evolution von Produktgenerationen und Familien mithilfe von zeitabhängigen **Netzwerkmodellen** der Systemstruktur. Die Netzwerkmodelle, wie in Abbildung 2.20, sind Graphen, deren Knoten die Subsysteme und deren Kanten die Beziehungen zwischen den Subsystemen beschreiben (Li et al., 2022).

Li et al. (2022) analysieren so die Evolution von Produktstruktureigenschaften (Komplexität, Wichtigkeit, Robustheit) über mehrere Produktgenerationen mithilfe eines zeitabhängigen Netzwerkmodells, das in Abbildung 2.21 generisch dargestellt wird. Sie zeigen am Beispiel des Apple iPhone auf, dass die Gesamtsysteme über Generationen strukturell einfacher werden, während Kernkomponenten an Komplexität und Einfluss gewinnen.

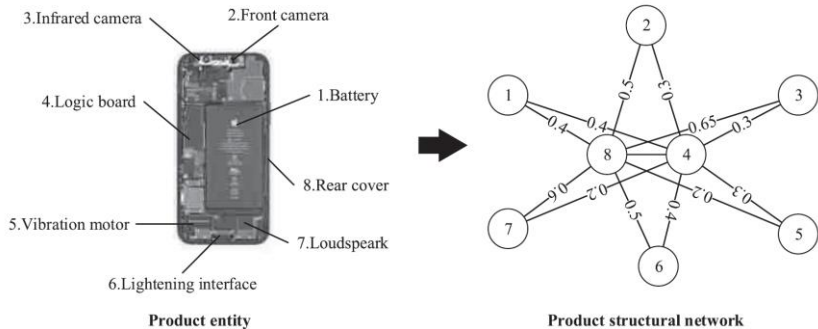


Abbildung 2.20: Netzwerkmodell der Systemstruktur einer iPhone-Produktgeneration. Das Kantengewicht wird über die Art der Bauteilverbindung bestimmt. Reproduced from Li et al. (2022), Towards the evolution characteristics of product structural properties based on the time-dependent network, Journal of Engineering Design, © copyright 2022, reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, <https://www.tandfonline.com>.

Biswas et al. (2022) schlagen ein **prognoseorientiertes Modell zur Evolution von Produktfamilien** vor. Sie kombinieren dazu ein dynamisches Beschreibungsmodell für die Evolution von Produktfamilien mit datengetriebenen Methoden (Grey Relational Analysis und Fuzzy AHP) zur Identifikation einflussreicher Produktmerkmale aus vergangenen Generationen und ein künstliches neuronales Netz zur Prognose der Merkmalsausprägung in zukünftigen Generationen.

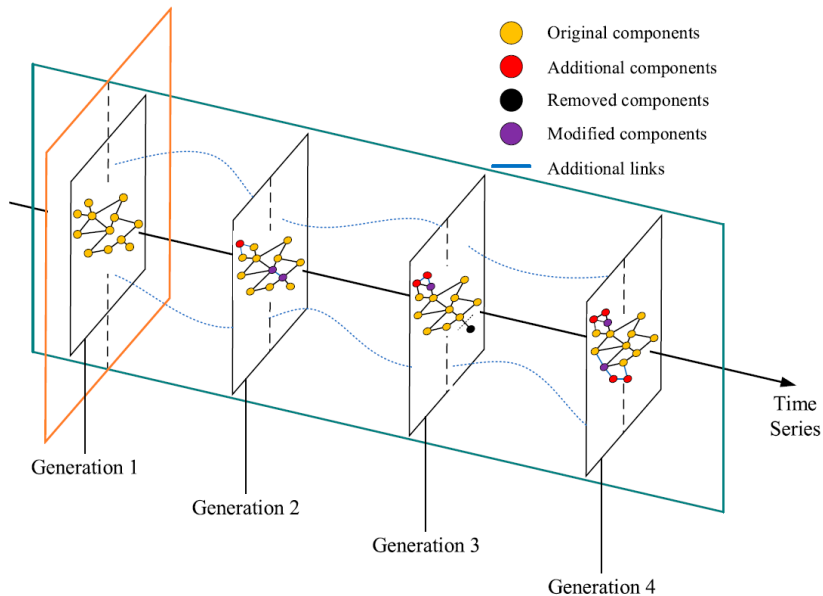


Abbildung 2.21: Zeitabhängiges Netzwerkmodell für generationsübergreifende Systemstrukturen. Reproduced from Li et al. (2022), Towards the evolution characteristics of product structural properties based on the time-dependent network, Journal of Engineering Design, © copyright 2022, reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, <https://www.tandfonline.com>.

2.5 Fazit zum Stand der Forschung

Kapitel 2.1 verdeutlicht, dass die Produktentwicklung als Teil der Produktentstehung ein zentraler Akteur ist, um durch Produkte mit hohem Innovationspotenzial, niedrigen Kosten, niedrigem Risiko und weiteren Zielgrößen wie Qualität und Nachhaltigkeit den Unternehmenserfolg sowie den Fortschritt und Wohlstand in der Gesellschaft zu sichern. Für hohes Innovationspotenzial sind die drei Elemente einer Innovation – Produktprofil, Invention und Markteinführung – entscheidend (vgl. Kapitel 2.1.3).

Um mit der Komplexität des dynamischen Produktumfelds, der Produkte und der Produktentwicklungsprozessen umgehen zu können, benötigt der Mensch Modelle

für das Umfeld (Kapitel 2.1.2), für die systemtheoretische Beschreibung von Produkten (vgl. Kapitel 2.2.1) und für die Beschreibung von Produktentwicklungsprozessen (vgl. Kapitel 2.2.2). Produktentwicklung kann dabei als Problemlösungsprozess verstanden werden, in dem Produktentwickelnde auf methodische Unterstützung angewiesen sind. Ein grundlegendes Phänomen der Produktentwicklung, das in methodischer Unterstützung lange Zeit nicht ausreichend berücksichtigt wurde, ist, dass neue technische Systeme immer auf Basis von Elementen bestehender Systeme entwickelt werden (vgl. Kapitel 2.2.3). Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung baut auf dieser Beobachtung auf und beschreibt Produktentwicklung ausgehend von zwei empirisch begründeten Grundhypothesen: 1) Neue Systemgenerationen werden basierend auf einem Referenzsystem entwickelt und 2) basierend auf den Elementen des Referenzsystems werden die Subsysteme einer neuen Systemgeneration mit Übernahmevariation, Ausprägungsvariation und Prinzipvariation entwickelt. Weiterhin werden technische Systeme in Generationen entwickelt.

In Kapitel 2.3 wurden die theoretischen Konstrukte der Synthetischen Evolutionstheorie (MS) und der Erweiterten Synthese (EES) dargestellt und verglichen. Um Evolution zu beschreiben, müssen analoge Ansätze demnach die Konstrukte zu Anpassungsmechanismus und Wechselwirkung mit der Umwelt, Informationsweitergabe an die nächste Generation, Variationsmechanismus, generationsübergreifender Evolution und Makroevolution berücksichtigen. Durch Variation, den Bezug zu Referenzen und die Beschreibung von Systemgenerationen integriert das Modell der SGE bereits einige dieser zentralen Konstrukte.

Die in Kapitel 2.4 vorgestellten, durch die Evolutionstheorie motivierten Ansätze zeigen, dass die Analogie zur natürlichen Evolution in der Entwicklungsmethodik auch jenseits des Modells der SGE bereits mehrfach erfolgreich genutzt wurde. Musterbasierte Evolutions-motivierte Ansätze (vgl. Kapitel 2.4.1) beschreiben auf verschiedenen Abstraktionsebenen erfolgreiche Lösungsmuster aus der Vergangenheit, um dieses Wissen für die Entwicklung zukünftiger Produkte zugänglich zu machen und sind dabei prinzipiell ähnlich zu etablierten Muster-Ansätzen aus der Konstruktionsmethodik. Methodische Evolutions-motivierte Ansätze (vgl. Kapitel 2.4.2) stellen planmäßige Vorgehensweisen zur Verfügung, um diese Muster gezielt in der Produktentwicklung einzusetzen. Datenbasierte Evolutions-motivierte Ansätze (vgl. Kapitel 2.4.3) nutzen Methoden, Prozesse und Tools des Advanced Engineerings, um neues Wissen über die Evolution technischer Systeme zu generieren und Produktentwicklung nach dem Vorbild der natürlichen Evolution zu gestalten. Mit Ausnahme der Autogenetischen Konstruktionstheorie nach Vajna und Wegner (1997) und Vajna et al. (2005) und der Technischen

Vererbung nach (Lachmayer et al., 2014) erfolgt die Analogiebildung zur Evolutionstheorie selektiv hinsichtlich einzelner Aspekte. Die Autogenetische Konstruktionstheorie und die Technische Vererbung nutzen eine systematische Analogiebildung zu Elementen der natürlichen Evolution.

3 Forschungsbedarf und Zielsetzung

In Kapitel 3.1 wird der Forschungsbedarf basierend auf dem Stand der Forschung und der Motivation der Arbeit hergeleitet. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3.2 die Zielsetzung und die Arbeitsthese der Arbeit formuliert und in Kapitel 3.3 durch Forschungsfragen und Prämissen operationalisiert.

3.1 Forschungsbedarf

Unternehmen sehen sich heute mit steigendem Kosten- und Innovationsdruck konfrontiert (Smetana et al., 2025; Stern & Jaberg, 2010), was effektivere und effizientere Produktentstehungsprozesse erfordert (Isaksson et al., 2019; Schoemaker et al., 2018). Um mit dem durch Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität gekennzeichneten VUKA-Umfeld des 21. Jahrhunderts umzugehen, benötigen Produktentwickelnde neue methodische Unterstützung (Dumitrescu et al., 2021).

Ein Ansatz, um Produkte mit hohem Innovationspotenzial zu entwickeln und dabei gleichzeitig Kosten und Risiken gering zu halten, ist die systematische Produktplanung und -entwicklung basierend auf dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung (vgl. Kapitel 2.1) (Albers & Rapp, 2022; Rapp, 2021). Kosten und Risiken neuer Systemgenerationen können durch die Entwicklung von Subsystemen mit Übernahmevariation und die Nutzung unternehmensinterner Referenzen reduziert werden (Albers, Rapp et al., 2017). Um Innovationspotenzial durch Produktprofile mit neuem Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen zu generieren (vgl. Kapitel 2.1), müssen andere Subsysteme einer neuen Systemgeneration mit Ausprägungs-, Prinzipvariation und/oder durch die Aufnahme unternehmensexterner Referenzen ins Referenzsystem entwickelt werden (Albers & Rapp, 2022; Rapp et al., 2018). Eine grundlegende Fragestellung bei der Entwicklung neuer Systemgenerationen ist daher, welche Referenzen und welche Variationsarten für technische Systeme und deren Produktprofile gewählt werden müssen, um das Innovationspotenzial zu maximieren und Kosten und Risiken zu reduzieren. Für den Erfolg einer neuen Systemgeneration ist dabei entscheidend, dass sie passend für das zukünftige Umfeld entwickelt wird, in dem neben Kunden- und Anwenderbedarfen auch weitere mikro- und makroökonomische Umfeldfaktoren erfolgsentscheidend sind (Arthur, 2009; Fink & Siebe, 2011; Hauschildt et al., 2023). Um die Auswahl von Variationen und

Referenzen zu unterstützen, wird Wissen über die Zusammenhänge von Umfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation benötigt.

Obwohl zahlreiche Fallstudien zum Modell der SGE existieren (z. B. Albers, Bursac et al., 2017; Albers, Hirschter et al., 2020; Kuebler et al., 2024; Rapp, 2021; Tusch et al., 2025), fehlt bislang eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile sowie Innovation. Insbesondere wurde bisher kein zusammenhängender Datensatz veröffentlicht, der diese Aspekte integriert und für die Entwicklung von methodischer Unterstützung nutzbar macht.

Demnach besteht ein **Forschungsbedarf hinsichtlich der Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation**, um darauf aufbauend die Entwicklung von methodischer Unterstützung zur Entwicklung von Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und niedrigem Risiko zu ermöglichen. Um diesen Forschungsbedarf zu adressieren, nutzt diese Arbeit die in Kapitel 1 motivierte Analogie zur Evolutionstheorie. Lachmayer et al. (2014) zeigen mit dem Prozess der technischen Vererbung das Potenzial systematischer Analogiebildung zur Evolutionstheorie in der Entwicklungsmethodik auf, haben mit der Nutzungsphase und der Beschreibung von Produktentwicklung als ganzheitliches Optimierungsproblem jedoch einen anderen Fokus. Andere Ansätze in der entwicklungsmethodischen Forschung greifen lediglich einzelne Aspekte der Evolutionstheorie auf.

Die systematische Anwendung der zentralen Konstrukte der Evolutionstheorie (siehe Kapitel 2.3) – Anpassungsmechanismus und Wechselwirkung mit der Umwelt, Informationsweitergabe an die nächste Generation, Variationsmechanismus, generationsübergreifende Evolution und Makroevolution – zur Beschreibung und Analyse der Evolution technischer Systeme bietet das Potenzial, Zusammenhänge und Muster zu identifizieren. Diese können wiederum Grundlage für neue methodische Unterstützung für die Entwicklung zukünftiger Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial bei gleichzeitig niedrigen Kosten und niedrigem Risiko sein (Pfaff, Kempf et al., 2022).

3.2 Zielsetzung und Arbeitsthese

Zielsetzung: Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, explorativ Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE nach Albers sowie Innovation zu identifizieren und zu erklären.

Mit den Ergebnissen zu den Zusammenhängen sollen Produktentwickelnde bei der Entwicklung von Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und niedrigem Risiko unterstützt werden. Um die Entwicklung von Methoden zu ermöglichen, sollen alle entstehenden Forschungsdaten und Ergebnisse im Sinne des Open Science Paradigmas (European Commission, 2025) auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar gemacht werden. Die Ergebnisse sollen zudem anschlussfähig an das ASE – Advanced Systems Engineering sein. Sowohl die Beschreibung der Zusammenhänge als auch der Forschungsansatz sind durch die Evolutionsanalogie motiviert, was in einer Arbeitsthese zusammengefasst wird:

Arbeitsthese: Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation können analog zur Evolutionstheorie beschrieben und untersucht werden.

Diese Arbeitsthese dient als Leitlinie für die Entwicklung des Forschungsvorgehens (Kapitel 4) und des Beschreibungsmodells (Kapitel 5) und wird am Ende der Arbeit diskutiert.

3.3 Forschungsfragen und Prämissen

Aus dem Forschungsbedarf, der Zielsetzung und der Arbeitsthese werden die folgenden Forschungsfragen (FF) abgeleitet. Forschungsfrage FF2 baut auf den Ergebnissen zu Forschungsfrage FF1 auf und Forschungsfrage FF3 auf den Ergebnissen von Forschungsfrage FF2.

FF1: Welche Elemente und Relationen sind für ein Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme erforderlich?

FF2: Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation und wie lassen sich diese Zusammenhänge erklären?

FF3: Wie kann das Wissen über diese Zusammenhänge in der Produktentwicklung für die Entwicklung von technischen Systemen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und niedrigem Risiko angewendet werden?

Auf Grundlage der Literatur (vgl. Kapitel 2.4.1) wird angenommen, dass **Musterbasierte Ansätze** geeignete Ansätze zur Beantwortung der Forschungsfrage FF3 sind:

Prämisse 1: Musterbasierte Ansätze sind grundsätzlich geeignet, Produktentwickelnde bei der Lösungsfindung zu unterstützen. Sie bieten eine geeignete Grundlage für die Entwicklung von methodischer Unterstützung für die Produktentwicklung.

Darüber hinaus wird auf Basis der Vorarbeiten zum Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.2) angenommen, dass bestimmte Tendenzen zur Wirkung von Variationsarten und Charakteristika von Referenzsystemelementen (RSE) auf **Kosten und Risiko** gelten (vgl. Kapitel 2.2.2):

Prämisse 2:

- Ein hoher Neuentwicklungsanteil innerhalb einer Systemgeneration führt tendenziell zu höheren Entwicklungsrisiken und -kosten.
- Ein hohes Wissensdefizit zu einem RSE erhöht tendenziell ebenfalls Risiko und Kosten. Dieses Wissensdefizit steigt, je weiter die Herkunft des RSE vom Entwicklungsteam entfernt liegt.

Diese Tendenzen sind beobachtbare Zusammenhänge, erheben jedoch keinen Anspruch auf absolute Gültigkeit. So kann beispielsweise eine Prinzipvariation auch den Wechsel von einem komplexen zu einem einfacheren, eindeutigeren und sichereren Lösungsprinzip umfassen, was zu niedrigeren Kosten und einem niedrigeren Risiko führen kann. Für das **Innovationspotenzial** einer Systemgeneration ist bislang keine vergleichbare Tendenz bekannt. Zur Untersuchung des Innovationspotenzials wird basierend auf etablierten Vorgehensweisen der Innovationsforschung (Kapitel 2.1.3) Prämisse 3 angenommen:

Prämisse 3: In der Vergangenheit beobachtete und induktiv hergeleitete Zusammenhänge für erfolgreiche und gescheiterte Innovationen gelten grundsätzlich auch für die zukünftige Entwicklung.

Diese Annahme bietet die Grundlage für die Ableitung von Mustern zur Unterstützung der Entwicklung von Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial.

4 Forschungsvorgehen

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen dargelegt. Dazu werden in Kapitel 4.1 der grundlegende induktive Forschungsansatz und in Kapitel 4.2 das Forschungsdesign erläutert. In Kapitel 4.2.1 wird auf die Forschungsmethode der Fallstudien und in Kapitel 4.2.2 auf die Forschungsmethode der fallübergreifenden Analyse eingegangen.

4.1 Forschungsansatz

Wie in der Arbeitsthese und der Einleitung beschrieben, wird auch der Forschungsansatz dieser Arbeit durch die Evolutionsanalogie motiviert. Analog zum Mechanismus der natürlichen Selektion („Survival of the fittest“) können auch in der Evolution technischer Systeme erfolgreiche Innovationen von gescheiterten Inventionen nur retrospektiv und für ein bestimmtes Umfeld unterschieden werden (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018; Arthur, 2009; Bauer, 2006). Darwins Forschungsansatz war induktiv und theoriebildend und baute auf eigenen Naturbeobachtungen und teilweise auf Sammlungen konservierter Organismen auf (Darwin, 1859/2003). Darwin untersuchte einzelne Arten in ihrer jeweiligen Umwelt und verglich diese Fälle systematisch miteinander, z. B. Galápagos-Finken und Festlandvögel. Die vorliegende Arbeit folgt ebenfalls einem **induktiven, theoriebildenden** Forschungsansatz mit dem Ziel, Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation zu identifizieren und zu erklären. Als Forschungsmethode kommen Fallstudien zur Evolution technischer Systeme über mehrere Systemgenerationen und eine fallübergreifende Analyse zum Einsatz, um Heuristiken, Muster und weitere Erkenntnisse zu den Zusammenhängen für die spätere Anwendung in der Produktentwicklung induktiv herzuleiten. Die Auswahl dieses Ansatzes wird im Folgenden erläutert.

Yin (2018) definiert eine **Fallstudie** als „[...] eine empirische Untersuchung, die ein zeitgenössisches Phänomen innerhalb seines realen Kontextes untersucht, insbesondere dann, wenn die Grenzen zwischen Phänomen und Kontext nicht eindeutig sind“ (S. 15, eigene Übersetzung). Woodside und Wilson (2003, S. 493) verstehen Fallstudienforschung weiter gefasst als „[...] eine Untersuchung, die sich darauf konzentriert, das Individuum zu beschreiben, zu verstehen, vorherzusagen und/oder zu steuern (d. h. Prozess, Tier, Person, Haushalt, Organisation, Gruppe,

Branche, Kultur oder Nationalität“ (eigene Übersetzung). Demnach ist das zentrale Merkmal der Fallstudienforschung die Fokussierung der Forschungsfragen, der Theorie und der Untersuchungen auf das Individuum. Nach Blessing & Chakrabarti (2009) beinhalten Fallstudien in der entwicklungsmethodischen Forschung häufig Daten aus einem realen Anwendungskontext und können sich auf einen oder mehrere Fälle beziehen. Die Datenerhebung kann dabei in Echtzeit oder retrospektiv stattfinden. Methoden zur retrospektiven Datenerhebung sind beispielsweise Dokumente (Fallhistorien, Archivanalysen), Produktdaten, Fragebögen/Umfragen sowie Interviews. Woodside & Wilson (2003) sehen die **fallübergreifende Analyse** als geeignet für die Theoriesynthese und -prüfung, was sie anhand mehrerer Beispielstudien demonstrieren. Yin (2018) unterscheidet dabei zwischen fallbasierter, iterativer und variablenbasierter Theoriesynthese.

Fallbasierte iterative Theoriesynthese ist stark qualitativ und induktiv geprägt (Yin, 2018). Theorie wird direkt aus den Daten heraus entwickelt, was dieses Vorgehen für explorative Forschung prädestiniert. Eisenhardt (1989) prägte die Methodik zur fallbasierten, iterativen Theoriesynthese und empfiehlt das in Tabelle 4.1 gezeigte Vorgehen in acht Schritten.

Tabelle 4.1: „Process of Building Theory from Case Study Research“, übersetzt und zusammengefasst nach Eisenhardt (1989, S. 533).

Schritt	Beschreibung
1: Einstieg	Definition einer klaren Forschungsfrage und ggf. Identifikation erster theoretischer Konstrukte (a priori constructs).
2: Fall-auswahl	Auswahl von Fällen, die sowohl Ähnlichkeiten (zur Kontrolle externer Variablen) als auch Unterschiede (zur Theoriebildung) aufweisen.
3: Erhebungs-instrumente	Kombination verschiedener Datenquellen (z. B. Interviews, Dokumente, Beobachtungen) und ggf. Einsatz mehrerer Forscher*innen zur Perspektivenvielfalt.
4: Feldzugang	Datenerhebung und erste Analyse erfolgen parallel; flexible Anpassung der Erhebungsmethoden bei neuen Erkenntnissen.
5: Daten-analyse	Kombination von fallinternen (within-case) und fallübergreifenden (cross-case) Analysen, um Muster zu identifizieren.
6: Hypothesen-bildung	Entwicklung theoretischer Aussagen auf Basis der identifizierten Muster; iteratives Testen und Verfeinern.
7: Einbettung in Literatur	Abgleich der Hypothesen mit bestehender Theorie zur Erhöhung der Tiefe und Validität.
8: Abschluss	Beendigung der Datenerhebung, wenn theoretische Sättigung erreicht ist.

Corbin und Strauss (1990) stellen den fallbasierten, iterativen Charakter von Datenerhebung, Codierung und Datenanalyse weiter heraus, um eine „Grounded Theory“ zu entwickeln. Bei der Anwendung der Grounded Theory in der Fallstudienforschung betont Allan (2003), dass ein systematisches und rigoroses Vorgehen erforderlich ist, was einen hohen Zeit- und Ressourcenaufwand bedeutet.

Variablenbasierte Theoriesynthese ist stärker quantitativ und deduktiv geprägt und zielt darauf ab, Zusammenhänge zwischen Variablen zu identifizieren, zu testen und zu verallgemeinern (Yin, 2018). Grundlage dafür sind messbare Konstrukte. Für variablenbasierte Theoriesynthese in der entwicklungsmethodischen Forschung schlägt Cash (2018) einen Zyklus zur Theoriesynthese und -prüfung mit fünf sich wiederholenden Schritten in einer Spirale vor, der in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

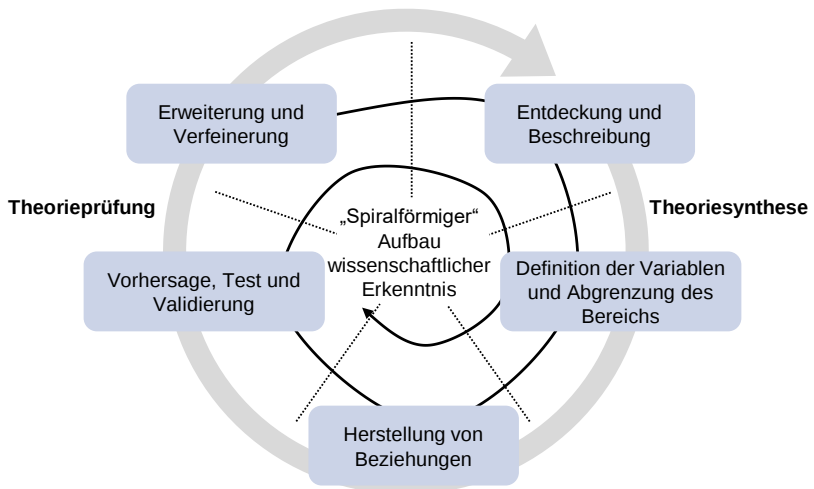


Abbildung 4.1: Der Zyklus der Theoriesynthese und -prüfung, der den „spiralförmigen“ Aufbau wissenschaftlicher Erkenntnis zeigt (Cash, 2018, S. 88). Eigene Darstellung.

Für die explorative Zielsetzung dieser Arbeit eignet sich ein induktiver, theoriebildender Forschungsansatz. Für den Aufbau eines Datensatzes und der explorativen Identifikation und Erklärung von Zusammenhängen eignet sich Fallstudienforschung mit einem fallbasierten, iterativen Ansatz zur Theoriesynthese. Der hohe Formalisierungsgrad des Modells der SGE (siehe Kapitel 2.2.3) in Kombination mit Modellen zur Beschreibung des Produktumfelds (siehe Kapitel 2.1.2) sowie retrospektiver Bewertung des Markterfolgs (siehe Kapitel 2.1.3) bietet das Potenzial, bestimmte Phänomene der Evolution technischer Systeme

variablenbasiert zu beschreiben, weshalb stellenweise auch variablenbasierte Theoriesynthese zum Einsatz kommen soll.

4.2 Forschungsdesign und Forschungsmethoden

Das Forschungsdesign operationalisiert den Forschungsansatz und verbindet die Forschungsfragen mit der Forschungsmethode, den Ergebnissen und der Struktur dieser Arbeit. Abbildung 4.2 stellt das Forschungsdesign tabellarisch dar.

Forschungsfrage	Forschungsmethode	Ergebnis	Kap.
FF1: Welche Elemente und Relationen sind für ein Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme erforderlich?	Analogiebildung zwischen natürlicher Evolution und der Evolution technischer Systeme	Vergleich zentraler Konstrukte	5.1
		Beschreibungsmodell	
	Entity-Relationship-Modellierung	Datenmodell	5.2
FF2: Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne der SGE sowie Innovation und wie lassen sich diese Zusammenhänge erklären?	Retrospektive, literaturbasierte Fallstudien zur Evolution technischer Systeme	Fallstudienkapitel	6.1
		Fallstudien-Datensatz	6.2
FF3: Wie kann das Wissen über diese Zusammenhänge in der Produktentwicklung für die Entwicklung von technischen Systemen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und Risiken angewendet werden?	Fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese , kombiniert fallbasiert und variablenbasiert. Bei der Formulierung der Ergebnisse wird die spätere Anwendbarkeit mitberücksichtigt.	Anwendungsorientiert formulierte Theoriebausteine (Heuristiken, Muster, weitere Erkenntnisse) und deren Einordnung in das Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme	7

Abbildung 4.2: Forschungsdesign der Arbeit – Verbindung der Forschungsfragen mit den Forschungsmethoden, den Ergebnissen und der Struktur der Arbeit. Der Farbverlauf zwischen FF2 und FF3 visualisiert deren gemeinsame Bearbeitung in der fallübergreifenden Analyse und dem zugehörigen Ergebnisteil.

Nach Blessing & Chakrabarti (2009) beginnt jedes entwicklungsmethodische Forschungsvorhaben mit einer literaturbasierten Klärung des Forschungsgegenstands („Research Clarification“) und der Formulierung eines realistischen und sinnvollen Forschungsziels. Die Klärung des Forschungsgegenstands wird in den Kapiteln 1, 2 und 3 dieser Arbeit beschrieben.

Forschungsfrage FF1: *Welche Elemente und Relationen sind für ein Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme erforderlich?* leitet sich aus der Zielsetzung und der Arbeitsthese ab. Zur Beantwortung werden in Kapitel 5.1 die Konstrukte aus dem Stand der Forschung zu Produktumfeld, Innovation und SGE den zentralen Konstrukten der Evolutionstheorie vergleichend gegenübergestellt. Diese Analogiebildung ist Grundlage für die Entwicklung des Beschreibungsmodells für die Evolution technischer Systeme, das die analogen Konstrukte zu einem theoretischen Rahmenwerk integriert. Das Beschreibungsmodell wird in Kapitel 5.2 mithilfe der Entity-Relationship-Modellierungsmethode nach Chen (1976) in ein Datenmodell überführt, das die Datenstruktur für den Aufbau des Fallstudien-Datensatzes beschreibt. Wie in Abbildung 4.2 angedeutet, wurde das Datenmodell und damit einhergehend die Struktur des Datensatzes iterativ weiterentwickelt.

Zur Beantwortung von **Forschungsfrage FF2:** *Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation und wie lassen sich diese Zusammenhänge erklären?* werden angelehnt an die Methode der theoriebildenden Fallstudienforschung nach Eisenhardt (1989) 12 Fallstudien zur Evolution technischer Systeme durchgeführt, die Ergebnisse je Fall in Fallstudientexten und Visualisierungen zusammengefasst und fallübergreifend analysiert. Die Forschungsmethode für die einzelnen Fallstudien wird in Kapitel 4.2.1 detailliert erläutert. Zur Theoriesynthese wird ein fallbasierter, iterativer Ansatz (Corbin und Strauss, 1990; Eisenhardt, 1989) mit einem variablenbasierten Ansatz (Cash, 2018) kombiniert. Die Forschungsmethode zur Datenanalyse und Theoriesynthese wird in Kapitel 4.2.2 dargelegt.

Forschungsfrage FF3: *Wie kann das Wissen über diese Zusammenhänge in der Produktentwicklung für die Entwicklung von technischen Systemen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und niedrigem Risiko angewendet werden?* wird dabei parallel zu Forschungsfrage FF2 unter Annahme der Prämissen 1, 2 und 3 beantwortet, indem bei der Formulierung der Theoriebausteine bereits die spätere Anwendung in der Produktentwicklung berücksichtigt wird.

4.2.1 Aufbau des Fallstudien-Datensatzes

Die Datenerhebung in den einzelnen Fallstudien erfolgt retrospektiv und literaturbasiert auf Grundlage des Beschreibungs- und Datenmodells. Im Folgenden wird von Fallstudien nach der Definition von Woodside und Wilson (2003) gesprochen, in denen das Beschreiben und Verstehen der Evolution eines einzelnen Falls jeweils im Vordergrund steht. Ein Fall in dieser Arbeit umfasst die Evolution eines technischen Systems und dessen Produktprofil in seinem Umfeld und die Bewertung des Markterfolgs über mehrere Systemgenerationen und ggf. Produktvarianten. Eine erste Datengrundlage je Fallstudie wurde in studentischen Abschlussarbeiten erzeugt, die durch den Hauptreferenten und den Autor dieser Arbeit betreut wurden. Diese erste Datengrundlage wurde in zwei Iterationszyklen – bei der Ausarbeitung der Fallstudienkapitel und der fallübergreifenden Analyse – erweitert.

Da das Modell der SGE über Domänen und Branchen hinweg anwendbar ist (Albers & Rapp, 2022), wurden auch die Fallstudien über Branchen und Produktkategorien hinweg verteilt. Auswahlkriterien für die Fallstudien waren:

- Der Anteil physischer Subsysteme soll überwiegen, zur Sicherstellung der Relevanz für den Maschinenbau.
- Die Quellenlage soll für die retrospektive Datenerhebung über mehrere Systemgenerationen geeignet sein.

Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die zwölf durchgeführten Fallstudien.

Tabelle 4.2: Überblick über die zwölf Fallstudien.

Titel (Anbieter: Produkt)	Kurztitel	Branche	Zeitraum
Apple: iPhone	iPhone	Smartphones	2007-2023
Xiaomi: Mi Ultra	Mi Ultra	Smartphones	2020-2024
Toyota: Getriebe des Hybrid Synergy Drive	THS-G	Automotive	1997-2020
Volkswagen: Doppelkupplungsgetriebe	VW DCT	Automotive	2003-2016
Google: Glass	Google Glass	Wearable	2014-2019
Vorwerk: Thermomix	Thermomix	Haushaltsgeräte	1971-2019
Sony: PlayStation	PlayStation	Unterhaltungselektronik	1994-2020
BYD: Traktionsbatterie	BYD Batterie	Automotive	2008-2020
Ultimate Ears: Boom	UE Boom	Bluetooth-Lautsprecher	2013-2022
SEW: Fahrerloses Transportsystem	SEW DTS	Maschinenbau	2018-2024
SpaceX: Falcon	Falcon	Luft- und Raumfahrt	2008-2019
ArianeGroup: Ariane	Ariane	Luft- und Raumfahrt	1998-2024

Tabelle 4.3 zeigt die fünf Schritte des Vorgehens zur Erstellung des Fallstudien-Datensatzes.

Tabelle 4.3: Vorgehen für den Aufbau des Fallstudien-Datensatzes.

Schritt	Vorgehen für den Aufbau des Fallstudien-Datensatzes
1	Auswahl der Systemgenerationen , die im Rahmen der Fallstudie untersucht werden sollen und ggf. Ordnung nach Produktlinien, -Familien und -Varianten in einem „Stammbaum“.
2	Erstellung eines Systemmodells und Rekonstruktion des Produktprofilclaims der ersten zu untersuchenden Systemgeneration .
3	Analyse der Variationen des technischen Systems und des Produktprofils sowie der Entwicklung des Produktumfelds und des Markterfolgs je Systemgeneration.
3.1	Variation des technischen Systems: Für die Systemgenerationen werden die RSE und die Variationsarten je Subsystem bestimmt. Grundannahme für Systemgenerationen $G_{i>1}$ ist, dass die RSE aus Vorgängergenerationen stammen, sofern keine davon abweichenden Informationen gefunden werden. In einigen Fällen wurde ein Subsystem einer Vorgängergeneration als RSE für die Bestimmung der Variationsart herangezogen, obwohl ein linienexternes ¹ oder unternehmensexternes RSE identifiziert wurde. Die Entscheidung wurde jeweils dann getroffen, wenn das linienexterne oder unternehmensexterne RSE eher als Inspirationsquelle denn als Grundlage für die Entwicklung betrachtet wurde.
3.2	Variation des Produktprofils: Für die Variation des Produktprofils wird ein rekonstruierter Produktprofilclaim, wie von Pfaff et al. (2024) vorgeschlagen, als Stellvertreter-Variable verwendet, um den Analyseaufwand handhabbar zu machen. Zusätzlich wird die Variation von Anwender-, Kunden und Anbieternutzen betrachtet, in der Analyse aufgrund zu hoher Komplexität aber nicht weiter berücksichtigt.
3.3	Entwicklung des Produktumfelds: Ziel war die Identifikation von für die Evolution relevanten Umfeldfaktoren und deren Entwicklung. Die Analyse erfolgte mittels teiloffener Codierung innerhalb der Kategorien mikroökonomisch, makroökonomisch und unternehmensintern. Aufgrund der Datenlage war nicht für jede Fallstudie eine detaillierte Umfeldanalyse möglich.
4	Bewertung des Markterfolgs je nach verfügbaren Daten qualitativ oder quantitativ.
5	Zusammenfassung der Ergebnisse im Fallstudienkapitel , im Fallstudien-Datensatz und in einer zentralen Visualisierung der Evolution des technischen Systems.

¹ „linienextern“ bezeichnet RSE von außerhalb der Produktlinie (siehe Kapitel 5.1)

Die Forschungsmethode leitet sich direkt aus dem Beschreibungs- und Datenmodell der Evolution technischer Systeme ab, das in Kapitel 5 ausführlich hergeleitet und diskutiert wird. Die Informationen in den Fallstudien wurden überwiegend durch Literaturanalysen und Online-Recherchen erhoben. Dabei wurden wissenschaftliche Publikationen, graue Literatur (z.B. Marketingmaterialien, Geschäftsberichte) sowie Internetquellen (z.B. Teardowns, Produktrezensionen) berücksichtigt. Die jeweiligen Quellen sind direkt im Datensatz unter den entsprechenden Systemgenerationen aufgeführt und werden in den Fallstudienkapiteln (exemplarisch Kapitel 6.1 und Anhang A) nur auszugsweise dargelegt. Die Fallstudienkapitel geben einen Überblick über die Fallstudien. Der Datensatz wird in Kapitel 6.2 vorgestellt und diskutiert, das zugrunde liegende Datenmodell in Kapitel 5.2. Eine frühere Version des Datensatzes wurde vorab in einem Repositorium (<https://doi.org/10.5281/zenodo.14628595>) veröffentlicht und im Rahmen von Albers, Pfaff, Thümmel et al. (2025) genutzt. In dieser Dissertation wird eine inhaltlich erweiterte und kuratierte Datensatz-Version verwendet, die bislang unveröffentlicht ist und nach Abschluss des Promotionsverfahrens als neue Version veröffentlicht wird.

4.2.2 Datenanalyse und Theoriesynthese

Zentral für die Datenanalyse und die Theoriesynthese ist das Beschreibungsmodell für die Evolution technischer Systeme (Kapitel 5.1), das sowohl die Perspektive für die Datenanalyse als auch das theoretische Rahmenwerk für die Synthese und Einordnung der Theoriebausteine bietet. Um die Erkenntnisse zu den Zusammenhängen von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation greifbar und anwendbar zu formulieren, wurden **drei Kategorien von Theoriebausteinen** herausgearbeitet: Heuristiken, Muster und weitere Erkenntnisse. Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Fallstudien-Datensatz lässt unter anderem aufgrund der Anzahl und Verteilung der Datenpunkte sowie der verwendeten Skalenniveaus lediglich qualitative Aussagen über Wechselwirkungen und möglichen Kausalbeziehungen zu. Quantitative Korrelationsanalysen sind nach aktuellem Stand nicht sinnvoll. Dieser Umstand wird in Kapitel 6.2 ausführlich diskutiert.

Das Vorgehen zur Datenanalyse und Theoriesynthese lässt sich, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, in vier Stadien unterteilen. Die Stadien wurden überwiegend sequenziell durchlaufen, es fanden jedoch wiederholt Iterationen in vorangegangene Stadien statt.

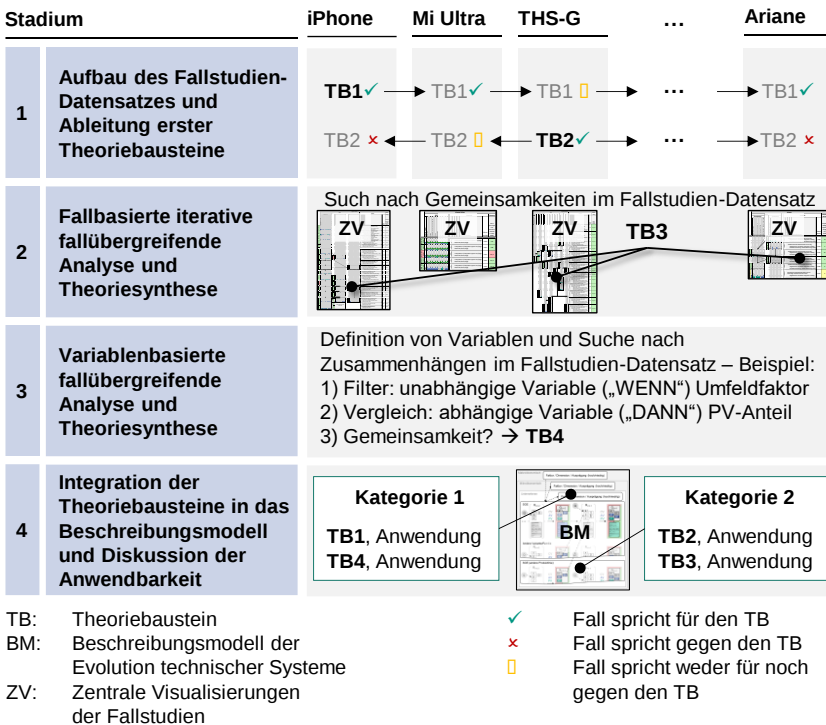


Abbildung 4.3: Vorgehen für die fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese anhand beispielhafter Theoriebausteine (TB1-4).

Stadium 1 und Stadium 2 beschreiben die **fallbasierte iterative Analyse und Theoriesynthese**. In **Stadium 1** werden bereits beim Aufbau des Fallstudien-Datensatzes fallbasiert und iterativ Theoriebausteine erarbeitet. Im Zuge der Erstellung der Fallstudien werden mögliche Theoriebausteine, die in einzelnen Fallstudien oder durch den Vergleich weniger Fallstudien aufkamen, niedergeschrieben und sukzessive mit den bisher analysierten und später analysierten Fällen verglichen. In **Stadium 2** werden die Fallstudienkapitel und aus dem Fallstudien-Datensatz abgeleitete Visualisierungen (z. B. die zentralen Visualisierungen der Fallstudien) als Sichten auf die einzelnen Fallstudien genutzt, um weitere Gemeinsamkeiten zu identifizieren. Gefundene Gemeinsamkeiten werden weiter zu Theoriebausteinen abstrahiert.

In **Stadium 3** findet die **variablenbasierte Analyse und Theoriesynthese** statt. Durch das Beschreibungsmodell sind bereits viele Variablen bekannt, die Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation beschreiben – beispielsweise Umfeldfaktoren mit Dimensionen und Ausprägungen sowie Variationsanteile. Zusätzlich dazu werden weitere neue und aggregierte Größen als Variablen für die Untersuchung definiert. Der Datensatz wird nun systematisch nach möglichen unabhängigen Variablen (Ursache, „WENN“) gefiltert und Zusammenhänge zu möglichen abhängigen Variablen (Wirkung, „DANN“) identifiziert. Gefundene Zusammenhänge werden weiter zu Theoriebausteinen abstrahiert.

In **Stadium 4** werden die einzelnen Theoriebausteine in Kategorien zusammengefasst und in das Beschreibungsmodell zur Evolution technischer Systeme und damit auch den Stand der Forschung eingeordnet. Abschließend wird die Anwendbarkeit der Theoriebausteine in der Produktentwicklung und mögliche Auswirkungen auf Entwicklungszielgrößen (FF3) diskutiert. Im Folgenden werden die drei Kategorien von Theoriebausteinen näher beschrieben. Diese können alle nach Prämisse 1 als „Muster“ verstanden werden.

Heuristiken

Eine Heuristik ist nach VDI 2221 „meist auf individuellen Erfahrungen beruhender, bewährter Vorgehensplan zur Lösung von Problemen“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 6). Die in dieser Arbeit abgeleiteten Heuristiken beinhalten demnach einen Problem- bzw. Situationsbezug „WENN...“ und eine Lösungsbeschreibung „DANN...“. Teilweise werden die Heuristiken um ein „UM...ZU“ oder zusätzlichen Kommentar ergänzt, wenn das zu erreichende Ziel – hohes Innovationspotenzial, niedrige Kosten und niedriges Risiko – nicht selbsterklärend ist.

WENN *Beschreibung der Entwicklungssituation* **DANN** *Beschreibung der Lösung* **UM** *eine Systemgeneration mit hohem Innovationspotenzial, niedrigen Kosten und niedrigem Risiko zu entwickeln*.

H02

Proaktive (Über-)Erfüllung von rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen

WENN produktbezogene rechtliche oder politische Rahmenbedingungen härter werden, **DANN** können davon betroffene Subsysteme und Produktprofile mit PV neuentwickelt werden, **UM** so statt bloßer Konformität auch Wettbewerbsvorteile und damit Innovationspotenzial zu generieren.

Die so formulierten Heuristiken beschreiben damit identifizierte Zusammenhänge in der Evolution technischer Systeme in einer anwendungsorientierten Form. Im Beispiel H02 wird ein Zusammenhang zwischen Umfeldfaktoren und Variationen für das Produktprofil und/oder das technische System beschrieben, der potenziell zu hohem Innovationspotenzial und niedrigen Kosten und niedrigem Risiko führen kann. Eine Einschätzung zur Validität und Übertragbarkeit der jeweiligen Heuristik wird über die Auftretenshäufigkeit in den Fallstudien gegeben. Bei auftretendem „WENN...“-Teil muss zwischen den vier Fällen in Tabelle 4.4 unterschieden werden.

Tabelle 4.4: Fallunterscheidung für die Auftretenshäufigkeit der Heuristiken.

Fall	WENN	DANN	erfolgreich?	Interpretation
I	Ja	Ja	Ja	Fall unterstützt die Heuristik
II	Ja	Nein	Nein	Indifferent
III	Ja	Ja	Nein	Fall spricht gegen die Heuristik
IV	Ja	Nein	Ja	Fall spricht gegen die Heuristik

Eine Auswertung der Auftretenshäufigkeit wird tabellarisch zu jeder Heuristik gezeigt. Heuristiken, die nur auf einem Fall basieren aber trotzdem durch den Autor als relevant eingeschätzt wurden, sind farblich eindeutig als Einzelfall-Heuristik gekennzeichnet:

H00 Fallübergreifende Heuristik

H00 Einzelfall-Heuristik

Bei der Auftretenshäufigkeit über die Fallbeispiele wird zusätzlich zwischen $G_{i=1}$ und $G_{i>1}$ Systemgenerationen unterschieden. Links steht die $G_{i=1}$, rechts die $G_{i>1}$, wie am Beispiel von H02 ersichtlich:

H02		Proaktive (Über-)Erfüllung von rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen										
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I			1	1					2			1
III								1				
IV		1										

Es werden jeweils nur die Fälle I-IV in den Zeilen aufgeführt, die auftraten. Im Beispiel H02 kam Fall II nicht vor.

Muster

Als Muster werden wiederholt in der Evolution technischer Systeme auftretende Abfolgen von Variationen von Produktprofil und/oder technischem System verstanden. Für die Beschreibung der Muster wird die in Formel 4.1 dargestellte Schreibweise verwendet.

... ...	Trennt Variationsoperatoren für aufeinanderfolgende Systemgenerationen	
CV, AV, PV	Variationsoperatoren	
{ }	Referenzsystem	
{→}	Variation basiert auf RSE aus Vorgängergeneration $G_{i=n-1}$	
{i-x}	Variation basiert auf RSE aus Vorgängergeneration $G_{i=n-x}$	
{int, esb, edb, le}	Variation basiert auf internem RSE, externem RSE aus der gleichen Branche, externem RSE aus einer anderen Branche, linienexternem ² RSE	4.1
V, {}	Variationsart oder Herkunft des RSE im Muster nicht spezifiziert	
[...]	Beliebige Variationsabfolge	
.../...	Logisches ODER – das Muster kommt mit beiden Ausprägungen vor	
: ... :	Abfolge zwischen den Trennzeichen wiederholt sich	

M03.3 ist ein Beispiel für ein Variationsmuster auf Subsystemebene:

M03.3	PV nach mehreren CV – neue Lösungsprinzipien für (quasi) standardisierte Subsysteme
: {→} CV : {*} PV/ {le}*V	

Eine Einschätzung zur Validität und Übertragbarkeit der jeweiligen Muster wird über die Auftretenshäufigkeit in den Fallstudien gegeben. Variationsabfolgen, die sich in weiteren Studien als potenzielle Muster herausstellen, in der fallübergreifenden

² Die Unterscheidung der RSE nach interner und linienexterner Herkunft wird in Kapitel 5.1 erläutert

Analyse aber noch nicht bestätigt werden konnten, werden farblich als potenzielle Muster gekennzeichnet:

M00 Muster

M00 Potenzielles Muster

Weitere Erkenntnisse

In die dritte Kategorie fallen Erkenntnisse über die Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation, die sich nicht in die Kategorie Muster oder Heuristik einordnen lassen. Auch hier wird über die tabellarische Auflistung der Auftretenshäufigkeiten eine Einschätzung der Validität und Übertragbarkeit gegeben und zwischen fallübergreifenden und Einzelfall-Erkenntnissen unterschieden.

E00 Fallübergreifende Erkenntnis

E00 Einzelfall-Erkenntnis

5 Beschreibung der Evolution technischer Systeme

Als Grundlage für das weitere Vorgehen der Arbeit soll in Kapitel 5.1 ein Beschreibungsmodell für die Evolution technischer Systeme entwickelt werden und so Forschungsfrage FF1: *Welche Elemente und Relationen sind für ein Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme erforderlich?* beantwortet werden. Das Beschreibungsmodell soll Konstrukte aus dem Stand der Forschung zu Produktumfeld, Innovation und SGE – Systemgenerationsentwicklung, die analog zu den zentralen Konstrukten der natürlichen Evolution sind, in ein theoretisches Rahmenwerk zur Evolution technischer Systeme integrieren. Dazu werden die zentralen Konstrukte der Evolutionstheorie in einem Vergleich den zentralen Konstrukten von Innovation und Produktentwicklung aus dem Stand der Forschung gegenübergestellt und schrittweise zu einem Beschreibungsmodell für die Evolution technischer Systeme integriert.

In Kapitel 5.2 wird das Beschreibungsmodell über die Entity-Relationship-Modellierungsmethode nach Chen (1976) weiter formalisiert und in ein Datenmodell überführt. Das Datenmodell soll die Datenstruktur für den Aufbau eines fallübergreifend analysierbaren und erweiterbaren Fallstudien-Datensatzes zur Evolution technischer Systeme bieten.

5.1 Analogiebildung und Entwicklung des Beschreibungsmodells

Teile der im Folgenden dargestellten Ergebnisse zur Analogiebildung wurden auf einer Fachkonferenz (Pfaff, Kempf, et al., 2022) vorgestellt. Das Beschreibungsmodell entstand iterativ und wurde in (Pfaff, Eberhardt, et al., 2022; Pfaff, et al., 2023; Albers, Pfaff, Thümmel, et al., 2025) in früheren Entwicklungsständen publiziert. Der in dieser Dissertation dargestellte Modellstand geht über diese Vorarbeiten hinaus und ist bislang unveröffentlicht.

5.1.1 Zentrum der Betrachtung – Technisches System und Produktprofil

In der natürlichen Evolution steht der Organismus als Phänotyp im Zentrum der Betrachtung und interagiert fortlaufend mit seiner Umwelt. In der Evolution technischer Systeme stehen technische Systeme (vgl. Kapitel 2.2.1) mit deren Produktprofil im Zentrum (vgl. Kapitel 2.1.3), die als Systemgenerationen im Sinne des Modells der SGE verstanden werden können (vgl. Kapitel 2.2.3) und ebenfalls in Wechselwirkung mit ihrem Umfeld stehen (vgl. Kapitel 2.1.2). Abbildung 5.1 zeigt die Systemgeneration, deren Subsysteme und das Produktprofil der Systemgeneration als zentrale Modellelemente. Nach dem strukturalen Konzept der Systemtheorie der Technik erfüllen Systeme Funktionen durch Elemente und deren Relationen. Für das Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme wurde das Systemmodell an dieser Stelle pragmatisch verkürzt – Relationen zwischen Subsystemen und Funktionen werden nicht explizit modelliert.

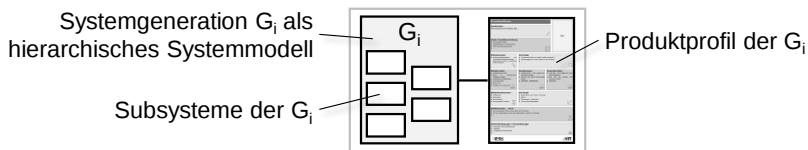


Abbildung 5.1: Systemgeneration G_i als hierarchisches Systemmodell mit zugehörigem Produktprofil als zentrale Modellelemente zur Beschreibung der Evolution technischer Systeme.

5.1.2 Anpassungsmechanismus und Wechselwirkungen mit der Umwelt

In Analogie zur Evolutionstheorie kann der Kampf um einen Platz im Markt als Selektion im Sinne des „survival of the fittest“ – dem Überleben der am besten angepassten Individuen – verstanden werden. Aus dieser Selektion gehen schließlich erfolgreiche Innovationen und gescheiterte Inventionen hervor (vgl. Kapitel 2.1.3). Technische Systeme und deren Produktprofile müssen im sich stetig verändernden Umfeld von Recht, Politik, Gesellschaft, Umwelt und Markt von Produktentwickelnden weiter- und neuentwickelt werden, um Fortschritt zu ermöglichen und sich gegenüber dem Wettbewerb durchzusetzen (vgl. Kapitel 2.1.3). Das sich verändernde Umfeld übt so analog zum Selektionsdruck einen Innovationsdruck aus und ist Ursache für die Weiter- und Neuentwicklung technischer Systeme und deren Produktprofile. Dabei beeinflussen technische

Systeme bzw. deren entwickelnde und produzierende Unternehmen analog zur Reziproken Kausalität der EES ihre Branchenumwelt. Das Umfeld kann in ein unternehmensinternes, ein unternehmensexternes mikroökonomisches („Branchenumfeld“) und ein unternehmensexternes makroökonomisches Umfeld unterteilt werden, wobei das mikroökonomische Umfeld vom Unternehmen beeinflusst werden kann („Reziproke Kausalität“), das makroökonomische Umfeld nicht (vgl. Kapitel 2.1.2).

Zentraler Umfeldfaktor für den Anpassungsmechanismus in der Evolution technischer Systeme sind sich ändernde Kunden- und Anwenderbedarfe (vgl. Kapitel 2.1.3). Produktprofile sollen diese Bedarfe für die Produktentwicklung modellhaft abbilden. Für das Beschreibungsmodell wurde die Entscheidung getroffen, an dieser Stelle pragmatisch zu verkürzen und Kunden- und Anwenderbedarfe bis auf wenige, explizit modellierte Ausnahmen nur auf Seiten des Produktprofils und nicht zusätzlich im mikroökonomischen Umfeld als Faktor zu berücksichtigen. Diese Verkürzung beruht auf der Annahme, dass die Produktprofile die tatsächlichen Bedarfe abbilden. Für die Fallstudien bedeutet das, dass nachweislich nicht zu den Bedarfen passende Produktprofile hervorgehoben werden müssen (z. B. G₁^{Google Glass, Explorer Ed.}). Eine weitere pragmatische Verkürzung im Modell ist, dass die Markteinführung nicht extra abgebildet wird, sondern die als SGE verstandene Produktentwicklung im Zentrum steht. Geschäftsmodelle werden im unternehmensinternen Umfeld berücksichtigt.

Abbildung 5.2 zeigt die Elemente und Relationen, die mit der Analogie zum Anpassungsmechanismus und zur Wechselwirkung mit der Umwelt neu hinzugekommenen sind. Ein fundamentaler Unterschied im Anpassungsmechanismus ist der Mensch im Mittelpunkt der Produktentstehung (Albers, 2010), der als Teil des Handlungssystems das technische System entwickelt und produziert. Die Wechselwirkungen können daher nicht als direkte Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Umfeldfaktoren zu Entwicklungsaktivitäten verstanden werden, was durch die gestrichelten Pfeile angedeutet wird.

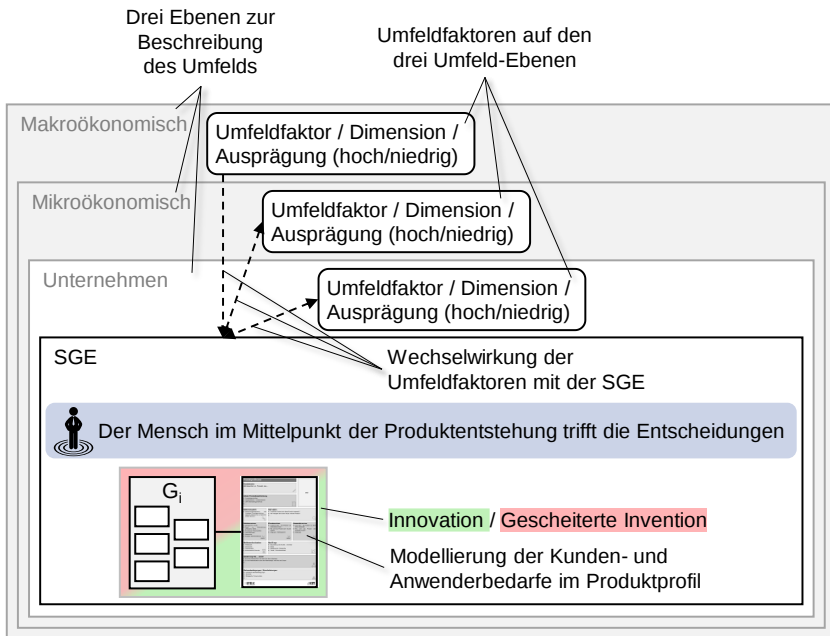


Abbildung 5.2: Umweltfaktoren auf den drei Umfeld-Ebenen beeinflussen die Systemgenerationsentwicklung. Die Systemgeneration stellt sich als Innovation oder gescheiterte Invention heraus.

5.1.3 Informationsweitergabe an die nächste Generation

Im Modell der SGE erfolgt die Weitergabe von Information an die nächste Systemgeneration über die Aufnahme von Elementen in das Referenzsystem, was analog zur Weitergabe von Information über den Mechanismus der Vererbung gesehen werden kann, und anschließender Überführung in die neue Systemgeneration durch Variation (vgl. Kapitel 2.2.3). Ein fundamentaler Unterschied liegt in der Herkunft der Information: Während Information in der natürlichen Evolution immer von spezifischen Individuen der Elterngeneration stammt, wird das Referenzsystem in der Produktentwicklung aus unternehmensinternen und -externen Quellen befüllt. Je nach Herkunft des Referenzsystemelements könnte die Informationsweitergabe als rein genetisch analog zur MS oder eher inklusiv analog zur EES verstanden werden. Bei interner Herkunft sind meistens explizite Zielsysteminhalte, Erfahrungswissen und

Betriebsdaten verfügbar (inklusive Vererbung), während bei externer Herkunft ein größeres Wissensdefizit besteht (genetische Vererbung) (Albers, Rapp et al., 2017).

5.1.4 Variationsmechanismus

Die Variation der weitergegebenen und im Referenzsystem enthaltenen Information wird im Modell der SGE mit den drei Variationsarten Übernahmevariation (CV), Ausprägungsvariation (AV) und Prinzipvariation (PV) beschrieben. Variiert werden RSE zu Subsystemen der Systemgeneration in der Entwicklung. Diese Variationsarten werden systematisch und zielgerichtet bestimmt und können über mehrere Systemgenerationen geplant werden. Variation in der natürlichen Evolution läuft im Detail grundsätzlich unterschiedlich ab: Durch zufällige (MS) bzw. mit Bias in der Entwicklung versehener (EES) Rekombination und Mutation. Ein weiterer Unterschied bezieht sich auf die variierte Entität: Dem Modell der SGE liegen die System- und Modelltheorie zugrunde. Demnach sind das Referenzsystem und dessen Elemente sowie die Systemgeneration in Entwicklung und deren Subsysteme Modelle und beispielsweise der Detaillierungsgrad variiert je nach Modellzweck. Variation in der Genetik wird immer auf Ebene der DNA und der Gene betrachtet.

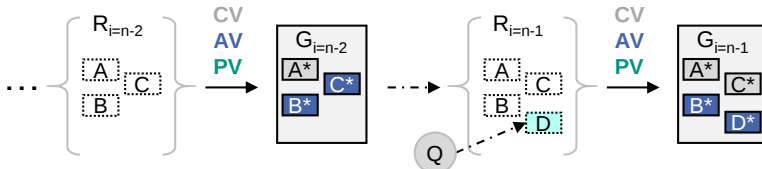
Wie in der natürlichen Evolution können in der Evolution technischer Systeme neue Subsysteme und Elemente hinzukommen oder wegfallen. Im Folgenden wird die Modellierung dieses Phänomens des Hinzukommens und Wegfallens auf explizit modellierten Systemebenen und Ebenen darunter diskutiert.

Hinzukommen bzw. Wegfallen von Subsystemen auf explizit modellierten Systemebenen

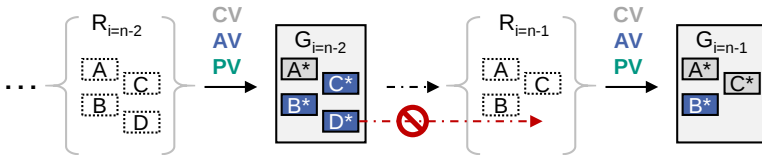
Auf den explizit modellierten Systemebenen kann das Hinzukommen von Subsystemen über die Aufnahme von RSE in das Referenzsystem die Abbildung dieser durch Variation auf die neue Generation modelliert werden. Das Wegfallen von Subsystemen kann über die nicht-Weitergabe von RSE oder die nicht-Variation von RSE modelliert werden. Abbildung 5.3 visualisiert diese Art der Modellierung anhand des Hinzukommens bzw. Wegfallens eines Subsystems von der $G_{i=n-2}$ zur $G_{i=n-1}$. Mit dieser Art der Modellierung ändert sich im Beispiel die Menge aller Subsysteme S_i der G_i und die Anzahl der Subsysteme $|S_i|$ von der $G_{i=n-2}$ zur $G_{i=n-1}$. Würden von der $G_{i=n-2}$ zur $G_{i=n-1}$ gleich viele Subsysteme hinzukommen und wegfallen, würde sich $|S_i|$ nicht ändern. Dieser Grenzfall zeigt, dass nicht nur die Veränderung von $|S_i|$, sondern jeder einzelne Fall von hinzukommenden oder

wegfallenden Subsystemen auf der explizit modellierten Systemebene diskutiert werden muss.

Hinzukommen: In $R_{i=n-1}$ wurde ein neues RSE D aufgenommen, das als Basis für die Entwicklung von D^* der $G_{i=n-1}$ diente.



Wegfallen: Subsystem D^* der $G_{i=n-2}$ wurde nicht in $R_{i=n-1}$ aufgenommen.



Wegfallen: Subsystem D^* der $G_{i=n-2}$ wurde in $R_{i=n-1}$ aufgenommen aber keine Variation für RSE D von $R_{i=n-1}$ nach $G_{i=n-1}$ durchgeführt.

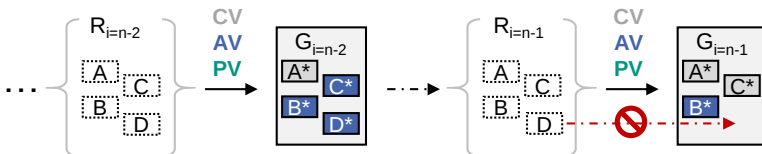


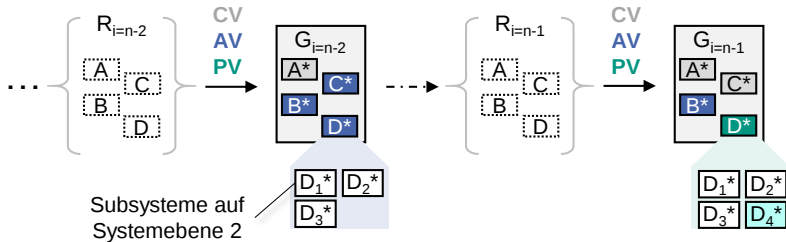
Abbildung 5.3: Hinzukommen bzw. Wegfallen von Subsystemen auf explizit modellierten Systemebenen.

Nicht Explizit modellierte Ebene: Modellierung über die Variationsart des Supersystems

Für die Modellierung hinzukommender und wegfallender Subsysteme auf nicht explizit modellierten Systemebenen wird das Beschreibungsmodell entlang der zum Zeitpunkt der Arbeit geltenden Definitionen des Modells der SGE pragmatisch verkürzt. Fallen Subsysteme innerhalb der explizit modellierten Subsysteme – also Sub-Subsysteme – weg, oder kommen hinzu, kann dies nach der in Kapitel 2.2.3 eingeführten Definition in beiden Fällen als Prinzipvariation interpretiert werden.

Abbildung 5.4 visualisiert diese Art der Modellbildung anhand des Hinzukommens bzw. Wegfallens eines Subsystems in Subsystem D von der $G_{i=n-2}$ zur $G_{i=n-1}$.

Hinzukommen: Von der $G_{i=n-2}$ zur $G_{i=n-1}$ kommt zum Subsystem D ein Subsystem hinzu



Wegfallen: Von der $G_{i=n-2}$ zur $G_{i=n-1}$ fällt im Subsystem D ein Subsystem weg

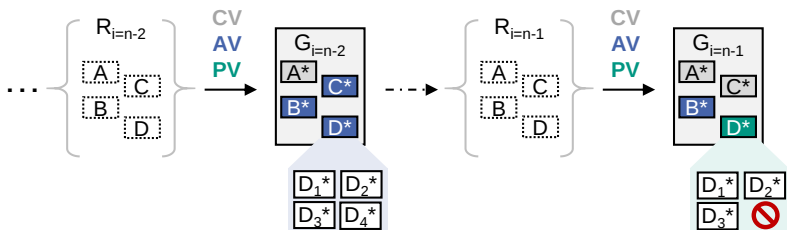


Abbildung 5.4: Nicht Explizit modellierte Ebene: Modellierung über die Variationsart des Supersystems.

Mit dieser Art der Modellierung ändert sich auf der betrachteten Systemebene weder S_i noch $|S_i|$. Das Hinzukommen bzw. Wegfallen eines Subsystems auf der zweiten Systemebene wird durch PV abgebildet. Diese Art der Modellierung stellt damit eine Verkürzung dar: Mit der PV eines Subsystems kann sich dessen Komplexität¹ durch das Hinzukommen von Elementen erhöhen, durch das Wegfallen von Elementen verringern oder bei geändertem Lösungsprinzip mit gleicher Anzahl von Elementen gleichbleiben. Es wird also lediglich abgebildet, dass sich das Subsystem prinzipiell

¹ Die Komplexität eines technischen Systems wird hier nach Ehrlenspiel & Meerkamm (2017) abhängig von der Varietät (Anzahl und Unterschiedlichkeit der Elemente) und Konnektivität (Anzahl und Vielfalt der Relationen zwischen den Elementen) verstanden.

weiterentwickelt hat. Unterhalb der explizit modellierten Systemebene wird die Veränderung der Architektur nicht betrachtet.

Eine Möglichkeit, um diese Verkürzung auf Systemebenen unterhalb der explizit modellierten Ebene zu umgehen, ist die fraktale Anwendung des Modells der SGE. Dies würde bedeuten, dass für die in Abbildung 5.4 dargestellten Fälle das Systemmodell für das betrachtete Subsystem D um eine Ebene weiter detailliert werden würde. Für eine derart fraktale Anwendung des Modells der SGE müsste Formel 2.2 zur Berechnung der Variationsanteile einer Systemgeneration angepasst werden, da diese aktuell nur für eine Systemebene gilt. Eine Möglichkeit wäre, die Subsysteme auf Ebene 2 (im Beispiel D_1^* etc.) ebenfalls auf Ebene 1 zu berücksichtigen und mit einem Gewichtungsfaktor zu versehen, sodass das Gesamtgewicht des ursprünglichen Subsystems (im Beispiel D^*) an den Variationsanteilen des Gesamtsystems gleichbleibt.

In Abbildung 5.5 werden die Elemente und Relationen dargestellt, die für die Beschreibung des Variationsmechanismus und der Informationsweitergabe an die nächste Generation benötigt werden.

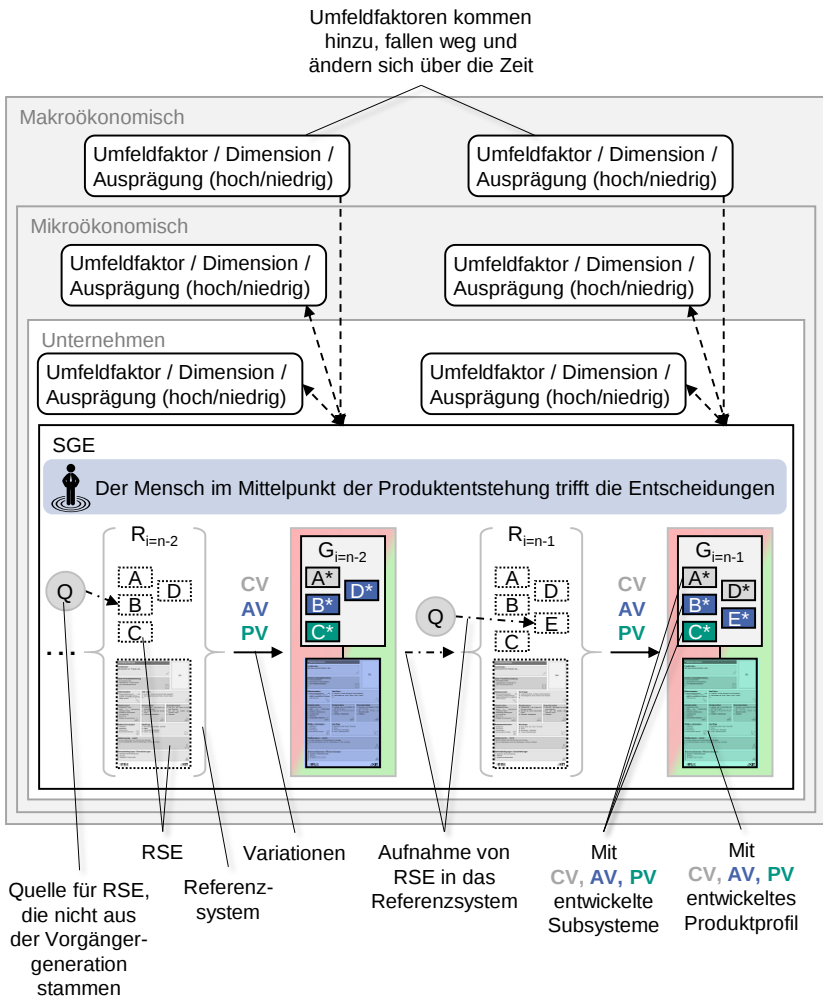


Abbildung 5.5: Grundhypothesen des Modells der SGE und Weiterentwicklung von Umfeldfaktoren im Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme.

5.1.5 Generationsübergreifende Evolution

Sowohl die natürliche Evolution als auch die Evolution technischer Systeme läuft in Generationen ab und die Umweltbedingungen bzw. Umfeldfaktoren ändern sich kontinuierlich (vgl. Kapitel 2.1.3). In der Evolution technischer Systeme kommen die Variationsarten in allen denkbaren Anteilen vor. Neue Lösungsprinzipien durch PV und/oder externe RSE können prinzipiell in jeder Generation und auch in allen Subsystemen „sprunghaft“ parallel auftreten und erfolgreich sein. Nach der MS verläuft die Anpassung an neue Umweltbedingungen in der natürlichen Evolution graduell über viele Generationen ohne Sprünge, da die Anpassungsraten durch den zufälligen und ungerichteten Variationsmechanismus und die natürliche Selektion beschränkt sind. Nach der EES sind auch Sprünge möglich, aber nicht die Regel. Verschiedene Innovationsportfolio-Ansätze (vgl. Kapitel 2.1.3) und die klassische Einteilung in Neu-, Anpassungs- und Varianten-Konstruktion nach Pahl und Beitz (Pahl et al., 2007) unterscheiden ähnlich der Kategorien Graduell vs. Sprung auch Kategorien nach Neuheitsgrad. Das Beschreibungsmodell für diese Arbeit verwendet für die technische Neuheit eine differenziertere Betrachtung über die Variationsanteile und die Herkunft der RSE.

5.1.6 Makroevolution

Analog zur Betrachtung höherer biologischer Organisationsebenen (Individuum, Population, Art/Spezies, ...) lassen sich technische Systeme auf unterschiedlichen Organisationsebenen betrachten. Hier können die Ebenen des Portfolio-Beschreibungsmodells von Schlegel et al. (2023) herangezogen werden: Produktlinien, -Familien und -Varianten (vgl. Kapitel 2.2.3). Variationen auf höheren Ebenen können demnach analog zur MS mit denselben Mechanismen für Variation und Informationsweitergabe beschrieben werden. Abbildung 5.6 integriert die Konstrukte zur Makroevolution in das Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme.

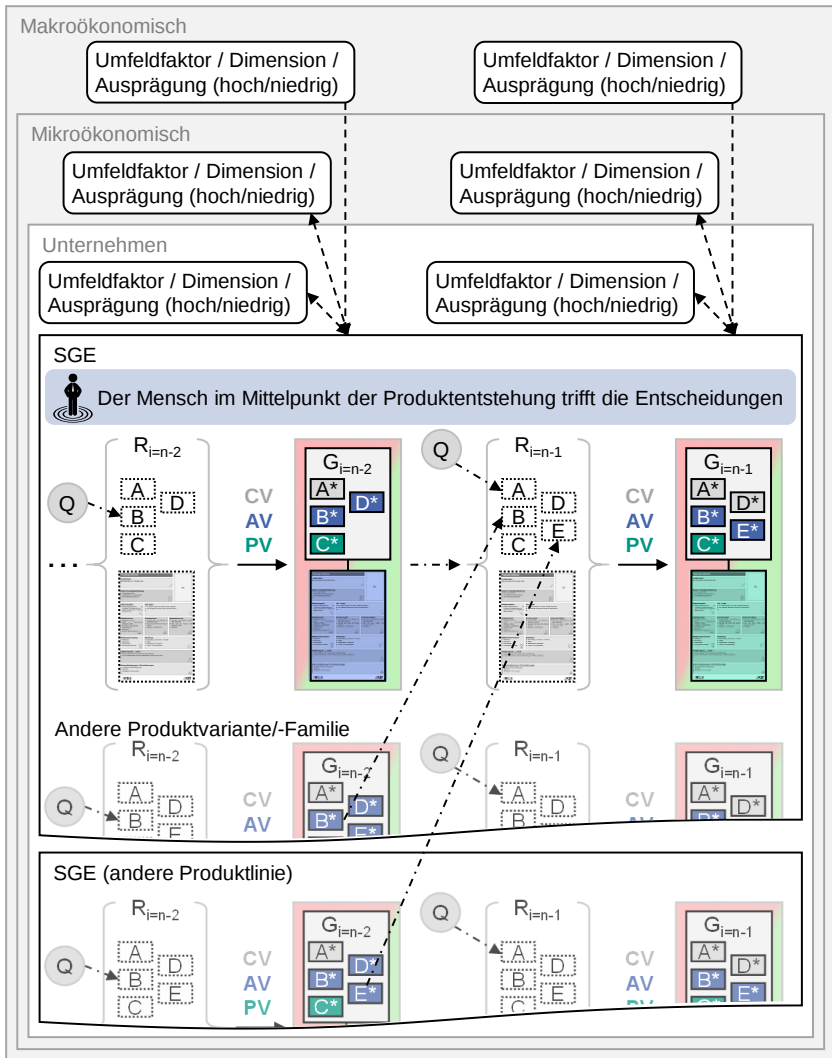


Abbildung 5.6: Makroevolution über Produktlinien, -Familien und -Varianten.

Weiterhin stellt sich die Frage, wann ein Lösungsprinzip für das technische System im Zentrum der Evolutions-Betrachtung als „**neues Lösungsprinzip**“ bezeichnet werden kann. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, sind tatsächlich „neue“ Lösungsprinzipien, insbesondere im Maschinenbau, äußerst selten, da diesen physikalische Prinzipien zugrunde liegen. Für eine betrachtete Systemgeneration können neue Lösungsprinzipien im Modell der SGE zum einen durch Prinzipvariation eines RSE eingeführt werden. Zum anderen können auch durch Übernahme- oder Ausprägungsvariation entwickelte Subsysteme neue Lösungsprinzipien in eine Systemgeneration einführen, wenn ein RSE aus einer anderen Quelle als der Vorgängergeneration ein neues Lösungsprinzip mit sich bringt. Es ist naheliegend, ein so durch unternehmensexterne RSE eingeführtes Lösungsprinzip für das technische System im Zentrum der Evolutions-Betrachtung als „neu“ einzustufen. In dieser Arbeit wurden zusätzlich Lösungsprinzipien aus internen RSE als „neu“ bezeichnet, deren Herkunft außerhalb der Produktlinie des Systems im Zentrum der Evolutions-Betrachtung lag („linienextern“). Diese Unterteilung beruht auf der Annahme, dass die Evolution der technischen Systeme zweier Produktlinien (beispielsweise Apple iPad und iPhone oder Logitech Bluetooth-Lautsprecher und Kopfhörer) sowohl aus Unternehmens- als auch aus Kunden- und Anwender-Sicht ausreichend unabhängig voneinander verlaufen, um Lösungsprinzipien aus einer anderen Produktlinie als „neu“ für die Evolution des jeweiligen technischen Systems zu betrachten. Diese Entscheidung kann auch mit einer Analogie zur Reproduktionsbarriere (vgl. Kapitel 2.3.1) begründet werden, wonach zwei Produktlinien sich ähnlich zu zwei Arten verhalten würden.

Innerhalb von Produktlinien wurde eine weitere Unterscheidung der **Herkunft von RSE** eingeführt. RSE können aus Vorgängergenerationen der gleichen Produktvariante oder hinsichtlich Preises und Leistung höher oder niedriger eingeordneten Produktvarianten stammen. In der Evolution von Produktvarianten können RSE innerhalb einer Produktlinie aus der gleichen Variante, höher oder niedriger eingeordneten Varianten stammen. Dabei können die Varianten, die als Quelle für RSE dienen, einer Vorgänger-Systemgeneration oder der gleichen Systemgeneration zugeordnet sein.

Tabelle 5.1 erweitert Tabelle 2.2 um eine Spalte zu analogen Konstrukten zur Evolution technischer Systeme und fasst so die Analogiebildung zusammen.

Tabelle 5.1: Vergleich der zentralen Konstrukte der MS und der EES, zusammengefasst aus Laland et al. (2015), mit den analogen Konstrukten der Evolution technischer Systeme.

	Synthetische Evolutionstheorie (MS)	Erweiterte Synthese (EES)	Evolution technischer Systeme
Anpassungsmechanismus und Wechselwirkung mit der Umwelt	Die natürliche Selektion wählt die am besten an die Umwelt angepassten Individuen aus und ist die alleinige kausale Ursache für Evolution.	Organismen beeinflussen aktiv ihre Umweltbedingungen, die wiederum die evolutionäre Entwicklung beeinflussen (Reziproke Kausalität).	Technische Systeme und deren Produktprofile müssen sich analog zur natürlichen Selektion unter Innovationsdruck im Umfeld behaupten. Entwicklung erfolgt aktiv durch den Menschen. Unternehmen gestalten ihr mikroökonomisches Umfeld analog zur Reziproken Kausalität aktiv mit.
Informationsweitergabe an die nächste Generation	Information wird nur durch genetische Vererbung weitergegeben. Entwicklung des Phänotyps erfolgt „ programmiert “.	Auch Verhalten, soziale Strukturen und Umweltwirkungen werden durch inklusive Vererbung weitergegeben. Entwicklung des Phänotyps erfolgt konstruktiv .	Informationen für die Entwicklung einer Systemgeneration stammen aus internen und externen Quellen. Die Aufnahme ins Referenzsystem entspricht einer Vererbung. Interne RSE werden eher inklusiv, externe eher genetisch vererbt.
Variationsmechanismus	Zufällige genetische Variation durch Rekombination und Mutation.	Variationstendenz in der Entwicklung (Developmental Bias)	Variation erfolgt gezielt durch Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation (CV, AV, PV) auf Subsystemebene.
Generationsübergreifende Evolution	Gradualismus : Evolution verläuft kleinschrittig über viele Generationen.	Variable Änderungsraten : Auch sprunghafte Anpassungen sind möglich.	Technische Systeme und deren Produktprofile werden in Generationen entwickelt. Variationen kommen in verschiedensten Anteilen vor.
Makroevolution	Makroevolution wird durch Prozesse der Mikroevolution erklärt.	Zusätzliche Faktoren wie Developmental Bias und ökologische Vererbung fördern Makroevolution.	Variation und Informationsweitergabe gelten auch auf höheren Ebenen des Produktportfolios.

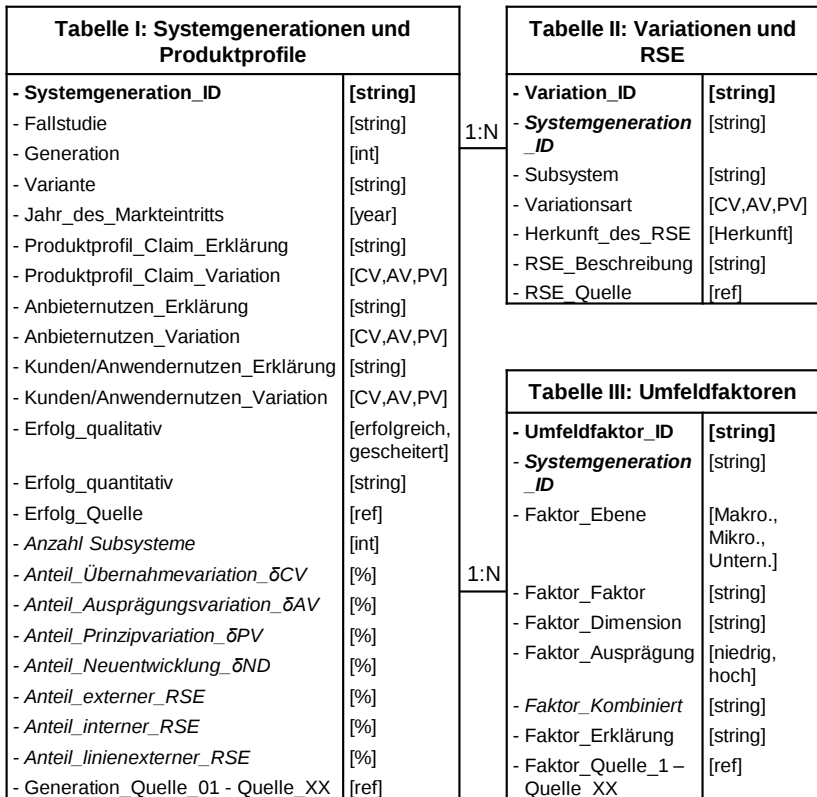
5.2 Datenmodell

Das Datenmodell entstand iterativ und wurde auf einer Fachkonferenz (Albers, Pfaff, Thümmel, et al., 2025) in einem früheren Entwicklungsstand publiziert. Der in dieser Dissertation dargestellte Modellstand geht über diese Vorarbeit hinaus und ist bislang unveröffentlicht.

Datenmodelle bilden die Grundlage für die Entwicklung von Informationssystemen (Gadatsch, 2019). Ein wesentlicher Vorteil abstrakter Datenmodelle liegt in ihrer Unabhängigkeit von konkreten Datenbanksystemen oder Programmiersprachen, was sie besonders geeignet für theoriebildende Forschung macht. Ein bewährtes Datenmodell ist das Entity-Relationship-Modell (ERM) nach Chen (1976), das auf drei zentralen Elementtypen basiert:

- **Entitätstypen** repräsentieren abstrakte Aspekte der realen Welt und bilden die Objekte des Erkenntnisinteresses ab – z. B. einzelne Stakeholder oder technische (Sub-)Systeme.
- **Beziehungstypen** beschreiben die Beziehungen zwischen Entitätstypen, etwa physische, strukturelle, kausale oder zeitliche Zusammenhänge.
- **Attribute** können sowohl Entitäten als auch Beziehungen zugeordnet werden und dienen der detaillierten Beschreibung. Die konkreten Ausprägungen dieser Attribute werden als Attributwerte bezeichnet.

Dieser Modellierungsansatz wurde gewählt, da er weit verbreitet ist, ein hohes Abstraktionsniveau für konzeptionelle Überlegungen bietet und anschlussfähig an die in der Software-Entwicklung verwendete Unified Modeling Language (UML) (Kleuker, 2013) und damit auch an die im Systems Engineering verwendete Systems Modelling Language (SysML) ist, die ihrerseits auf UML aufbaut. Für die Überführung des Beschreibungsmodells der Evolution technischer Systeme in ein Datenmodell wurden die Systemgeneration mit deren Produktprofil, die Variationen mit Referenzsystemelement und Subsystem sowie einzelne ausgeprägte Umfeldfaktoren als zentrale Entitäten festgelegt. Die Entitäten Produktprofil und Systemgeneration werden in einer Entität zusammengefasst, da zwischen ihnen immer eine 1:1 Beziehung besteht. Die jeweiligen Referenzsysteme und strukturalen Systemmodelle für die Systemgenerationen werden über die Variations-Entität und die Zuordnung der Variationen zu den Systemgenerationen abgebildet. Jede Entität wird im Fallstudien Datensatz durch eine Tabelle mit Spalten für die Attribute repräsentiert. Abbildung 5.7 zeigt das Datenmodell mit Entitäten, Attributen und Relationen.

**Abkürzungen**

CV: Übernahmevariation
 AV: Ausprägungsvariation
 PV: Prinzipvariation
 RSE: Referenzsystem-
 element

Komm: Kommentar
 ID: Identifikator

Makro: Makroökonomisch
 Mikro: Mikroökonomisch
 Untern: Unternehmen

Datenbanknotation**Primärschlüssel****Fremdschlüssel**

Attribut
 Abgeleitetes Attribut

Datentypen

[string] Zeichenkette
 [int] Ganzzahl
 [ref] Quellenangabe
 [%] Prozentwert
 [year] Jahreszahl

Werte für [Herkunft]

int_i-x: x. Vorgängergenreation
 int: linienextern, intern
 int_vl: niedrigere Variante
 int_vh: höhere Variante
 esb: extern, gleiche Branche
 edb: extern, andere Branche
 er: extern, Forschung

Abbildung 5.7: Datenmodell mit drei Tabellen und den Beziehungen zwischen den Tabellen.

Tabelle I: Systemgenerationen und Produktprofile listet alle in den Fallstudien untersuchten Systemgenerationen auf und enthält die Informationen zu Produktprofilen, Markterfolg und relevanten Quellen. **Tabelle II: Variationen und Referenzsystemelemente** dokumentiert die Variation der Subsysteme inklusive der zugeordneten Referenzsystemelemente. Jeder Systemgeneration aus Tabelle I können N Variationen aus Tabelle II zugeordnet sein, wobei N der Anzahl der modellierten Subsysteme der jeweiligen Systemgeneration entspricht. **Tabelle III: Umfeldfaktoren** enthält die relevanten Umfeldfaktoren mit Faktorebene, Dimension, Ausprägung, Erklärung und Quelle. Jeder Systemgeneration aus Tabelle I können N Umfeldfaktoren zugeordnet sein, wobei N der Anzahl der für die jeweilige Systemgeneration modellierten Umfeldfaktoren entspricht.

Die Datenstruktur mit wenigen, aber attributreichen Entitäten ergab sich aus der iterativen Entwicklung des Datenmodells während der Fallstudien und der fallübergreifenden Analyse sowie aus der praktischen Umsetzung in Microsoft Excel, bei der eine geringe Anzahl von Tabellen vorteilhaft war.

Für jede Fallstudie wurde eine zentrale Visualisierung als Sicht auf den Datensatz erstellt, die alle grundlegenden Aspekte des Beschreibungsmodells der Evolution technischer Systeme generationsübergreifend darstellt. In Abbildung 5.8 ist exemplarisch ein Auszug aus der zentralen Visualisierung der Fallstudie Thermomix dargestellt. Die Spalte „SGE“ bietet einen Überblick darüber, mit welchen Variationsarten das Produktprofil und die Subsysteme über die Systemgenerationen hinweg entwickelt wurden und aus welchen Quellen die Referenzsystemelemente in das Referenzsystem aufgenommen wurden. Für Fallstudien mit mehreren untersuchten Produktvarianten veranschaulicht dieser Abschnitt die Variantenentwicklung sowie die Weitergabe von RSE über Varianten hinweg. Die Spalte „Umfeld“ zeigt das Jahr der Markteinführung und die Umfeldfaktoren auf den Ebenen Makroökonomisch, Mikroökonomisch und Unternehmen, jeweils mit ihren Dimensionen und Ausprägungen. Die Daten zum „Markterfolg“ – je nach verfügbaren Daten in einigen Fallstudien nur qualitativ – sind auf der rechten Seite dargestellt.

SGE										Umfeld				Markt- erfolg		
Produktprofil-Claim Gehäuse Antriebssystem Heizplatte Mixtopf Mixmesser Bedienschnittstelle Dampfgaraufsatz Waage Anbindung zur Kochplattform	G6 (TM31)	↓ edb	↓ A	↓ P	↓ P	↓ P	↓ P	↓ P	↓ A	↓ A	Makroökonomisch	Mikroökonomisch	Unternehmen	Umfeldfaktoren	Markteintritt	Verkaufte Einheiten, Anzahl oder Umsatz
G7 (TM5)	↓ P	↓ P	↓ A	↓ A	↓ A	↓ A	↓ P	↓ A	↓ P	↓ P	↓ edb	Gesellschaft /Gleichstellung der Geschlechter /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /niedrig Kunde /Netzwerk und Community /hoch Markt /Wachstumsrate /hoch Produktentwicklung /Kundenorientierung /hoch	2004	5 Mio. verkaufte Einheiten		
G8 (TM6)	↓ A	↓ A	↓ C	↓ A	↓ A	↓ A	↓ A	↓ C	↓ A	↓ A	↓ A	Gesellschaft /Gleichstellung der Geschlechter /hoch Gesellschaft /Bedeutung gesunder Lebensstil /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Gesellschaft /Produktbedeutung /hoch Krise /Positiver Effekt auf Nachfrage /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Kunde /Netzwerk und Community /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Markt /Wachstumsrate /hoch Geschäftsmodell /Vertriebskanäle /hinzugefügt Geschäftsmodell /Plattform Produktentwicklung /Kundenorientierung /hoch Strategie /Schutz durch IP-Strategie /hoch	2019	8009,3 Mio. € Umsatz 2019- 2023		

Variationen

C: Übernahmevariation
A: Ausprägungsvariation
P: Prinzipvariation

Herkunft der RSE

↓: RSE ist Subsystem der Vorgängergeneration
edb: extern, andere Branche

Abbildung 5.8: Auszug aus der zentralen Visualisierung der Fallstudie Thermomix (wird im Text erklärt).

5.3 Zwischenfazit

Leitlinie dieser Arbeit ist die Arbeitsthese, dass Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation analog zur Evolutionstheorie beschrieben und untersucht werden können. In Kapitel 5 wurde untersucht, wie die Evolution technischer Systeme analog zur Evolutionstheorie beschrieben werden kann und dadurch Forschungsfrage **FF1: Welche Elemente und Relationen sind für ein Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme erforderlich?** beantwortet.

In Kapitel 5.1 wurden dazu die zentralen Konstrukte zu Produktumfeld, Innovation und SGE – Systemgenerationsentwicklung aus dem Stand der Forschung den zentralen Konstrukten der Evolutionstheorie gegenübergestellt und schrittweise zu einem Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme integriert. Erstes Kernergebnis von Kapitel 5.1 ist die **vergleichende Gegenüberstellung** der zentralen Konstrukte zu Anpassungsmechanismus und Wechselwirkung mit der Umwelt, Informationsweitergabe an die nächste Generation, Variationsmechanismus, generationsübergreifenden Evolution und Makroevolution in Tabelle 5.1. Diese Analogiebetrachtung bildet die Grundlage für die Entwicklung des Beschreibungsmodells. Zweites Kernergebnis ist das in Abbildung 5.6 dargestellte **Beschreibungsmodell** der Evolution technischer Systeme.

Durch die Analogiebetrachtung und das Beschreibungsmodell konnte gezeigt werden, dass Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation theoretisch analog zur Evolutionstheorie beschrieben werden können – mit dem fundamentalen Unterschied, dass der Mensch im Mittelpunkt der Produktentstehung als Teil des Handlungssystems das technische System entwickelt und produziert und keine direkten Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Umfeldfaktoren zu Entwicklungsaktivitäten wie in der sich selbst regulierenden natürlichen Evolution bestehen. Das Beschreibungsmodell wurde an mehreren Stellen pragmatisch verkürzt. Diese Verkürzungen stellen Limitationen dar und können Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschung sein:

- Wechselwirkungen zwischen Subsystemen und zwischen RSE im Referenzsystem werden nicht explizit modelliert.
- Das Beschreibungsmodell wird in dieser Arbeit nur für eine Systemebene angewendet. Nach Albers & Rapp (2022) geht Prinzipvariation eines Subsystems immer mit Ausprägungsvariation auf darunterliegenden Subsystemebenen einher. Nach Rapp et al. (2020) nimmt der PV-Anteil mit höherem Detaillierungsgrad der Modellierung ab. Dadurch wird der

PV-Anteil systematisch überbewertet. Umgekehrt gilt dies für Architekturänderungen und das Wegfallen bzw. Hinzukommen von Subsystemen: Wie in 5.1.4 diskutiert, werden diese nur auf der modellierten Systemebene sichtbar und darunter mit Prinzipvariation modelliert.

- Es wird lediglich die Systemstruktur des technischen Systems modelliert. Das Modell lässt sich theoretisch auf weitere Abstraktionsebenen, wie Funktionen und Eigenschaften, sowie weitere Zielsystemelemente zusätzlich zum Produktprofil, erweitern (vgl. Albers, Hirschter et al., 2020).
- Der Einfluss der Evolution von technischen Systemen anderer Unternehmen, beispielsweise Wettbewerbern, wird über Umfeldfaktoren und RSE modelliert. Diese Zusammenhänge könnten durch echte parallele Modellierung noch detaillierter untersucht werden und so das Modell von der Beschreibung der Evolution eines technischen Systems auf beispielsweise ganze Branchen erweitert werden.

Drittes Kernergebnis ist das **Datenmodell**, das über die Entity-Relationship-Modellierungsmethode nach Chen (1976) aus dem Beschreibungsmodell abgeleitet wurde. Es besteht aus den drei Tabellen Systemgenerationen und Produktprofile, Variationen und Referenzsystemelemente sowie Umfeldfaktoren. Das Datenmodell wurde für die Excel-basierte Umsetzung in dieser Arbeit entwickelt und sollte für den Aufbau einer SQL-basierten relationalen Datenbank weiter normalisiert werden. Das Datenmodell ist anschlussfähig an SysML und datenbasierte Ansätze des ASE – Advanced Systems Engineering.

Das Beschreibungsmodell dient im Folgenden für die Fallstudien in Kapitel 6 als Analyseperspektive und für die fallübergreifende Analyse in Kapitel 7 als theoretisches Rahmenwerk für die Theoriesynthese und die Integration der Theoriebausteine in einen Gesamtzusammenhang. Das Datenmodell bietet die Datenstruktur für den Aufbau eines fallübergreifend analysierbaren und erweiterbaren Fallstudien-Datensatzes zur Evolution technischer Systeme im nächsten Kapitel.

6 Retrospektive Fallstudien zur Evolution technischer Systeme

Trotz zahlreicher Fallstudien zum Modell der SGE existiert noch kein zusammenhängender Datensatz, der die Beantwortung der Forschungsfrage **FF2**: *Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation und wie lassen sich diese Zusammenhänge erklären?* ermöglicht (vgl. Kapitel 3.1). Aufbauend auf dem Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme und dem Datenmodell aus Kapitel 5, die diese Zusammenhänge abbilden, soll in diesem Kapitel ein solcher Datensatz aufgebaut werden. Dazu werden die in Tabelle 4.2 aufgelisteten retrospektiven, literaturbasierten Fallstudien zur Evolution technischer Systeme durchgeführt. Die Forschungsmethode für den Aufbau des Fallstudien-Datensatzes wurde in Kapitel 4.2.1 detailliert beschrieben.

In Kapitel 6.1 wird die Fallstudie Apple: iPhone exemplarisch dargestellt, um die Vorgehensweise zu veranschaulichen. Da die vorliegende Arbeit den Schwerpunkt auf die fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese legt, werden die übrigen 11 Fallstudienkapitel in den Anhang A dieser Arbeit ausgelagert, um die Lesbarkeit zu erhöhen.

Kapitel 6.2 gibt einen Überblick über den Fallstudien-Datensatz. Die Erstellung der Fallstudienkapitel und der Aufbau des Fallstudien-Datensatzes stellt auch gleichzeitig Stadium 1 des Vorgehens zur Datenanalyse und Theoriesynthese dar, in dem erste Theoriebausteine abgeleitet und fortlaufend abgeglichen wurden. Um Dopplungen zu vermeiden, werden diese Theoriebausteine gemeinsam mit den Ergebnissen aus den Stadien 2, 3 und 4 in Kapitel 7 vorgestellt.

6.1 Exemplarisch vorgestellte Fallstudie – Apple: iPhone

Die erste Systemgeneration des iPhone wurde am 09. Januar 2007 vom damaligen Apple CEO Steve Jobs vorgestellt und war ab dem 29. Juni 2007 in den USA erhältlich (Apple Inc., 2007). Folgender Produktprofil-Claim wurde für die G_1^{iPhone} rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das den Nutzen eines Mobiltelefons, eines iPods und eines Internet-Kommunikationsgeräts in einem kleinen, leichten und intuitiv bedienbaren Handheld-Gerät vereint.

Bis zum September 2024 wurden 37 Produktvarianten vorgestellt, die in der Fallstudie zu 26 Systemgenerationen geclustert und eingeteilt in drei Produktvarianten (High-end, Mid-range, Low-end) untersucht wurden. Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen einer Co-betreuten Abschlussarbeit (Goetz, 2022)¹ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Ein Teil der Ergebnisse wurde in einem früheren Stand auf einer Fachkonferenz (Pfaff et al., 2023) veröffentlicht. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

6.1.1 Systemmodell für das iPhone

Die Systemgenerationen des iPhones wurden mit **13 Subsystemen** auf einer Ebene modelliert. Abbildung 6.1 zeigt exemplarisch anhand der G_{11}^{iPhone} , ^x die Zuordnung einzelner Komponenten zu den Subsystemen. Der Software-Anteil wurde vereinfacht als ein Subsystem modelliert. Der Chipsatz („Apple Logic Board“) wurde auf die zentrale Recheneinheit (Central Processing Unit – CPU) und die für *Mobildfunk und Konnektivität* verantwortlichen Chips aufgeteilt.

¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

	Legende
1	Batterie
2	Kamera
3	Gehäuse
4	Mobilfunk und Konnektivität
5	Anschlüsse
6	CPU
7	Display
8	Physische Bedienelemente
9	Sensoren
10	Software
11	Speicher
12	Lautsprecher
13	Vibrationsmotor



Abbildung 6.1: Systemmodell für die Fallstudie Apple iPhone anhand der G₁₁_{iPhone, X} (Goldheart, 2017, <https://de.ifixit.com/Teardown/iPhone+X+Teardown/98975>, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>).

6.1.2 Überblick über die Evolution des iPhone

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie gibt einen Überblick über die untersuchten Systemgenerationen und Produktvarianten und ist auf Abbildung 6.2, Abbildung 6.3, Abbildung 6.4, Abbildung 6.5, Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7 aufgeteilt.

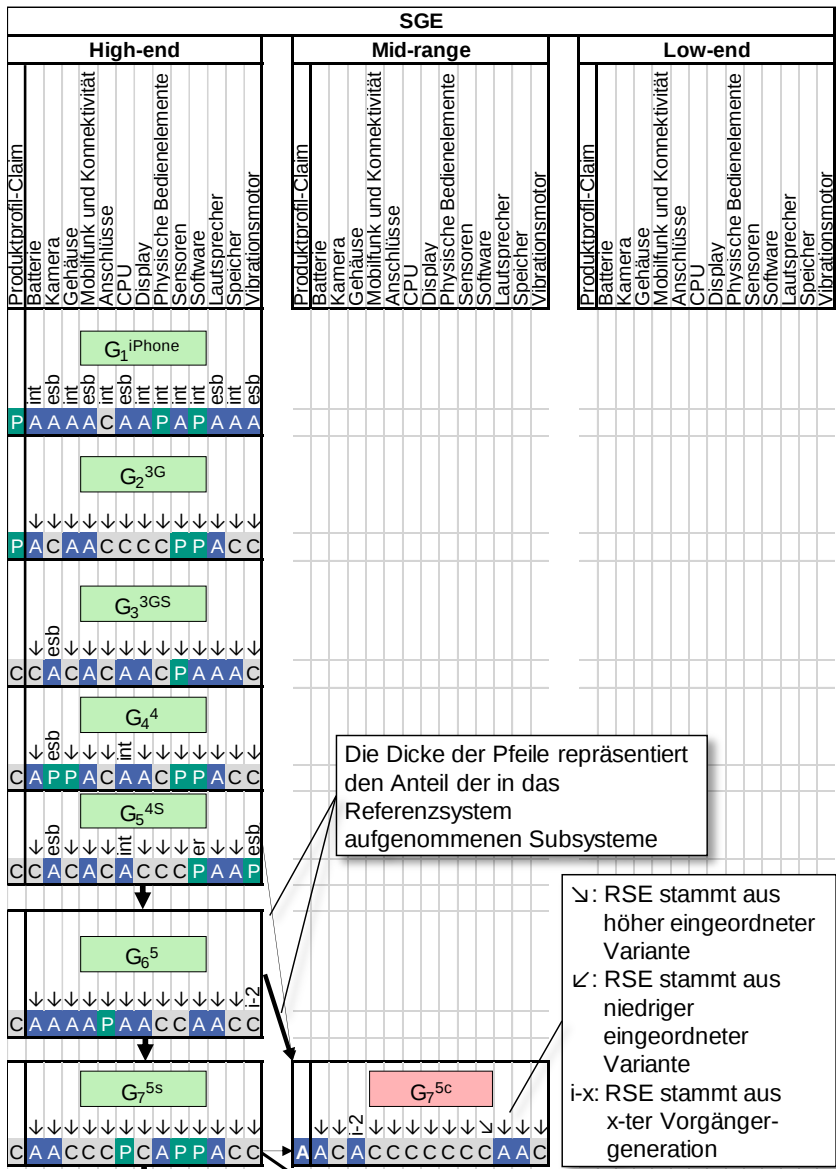


Abbildung 6.2: Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 1 links.

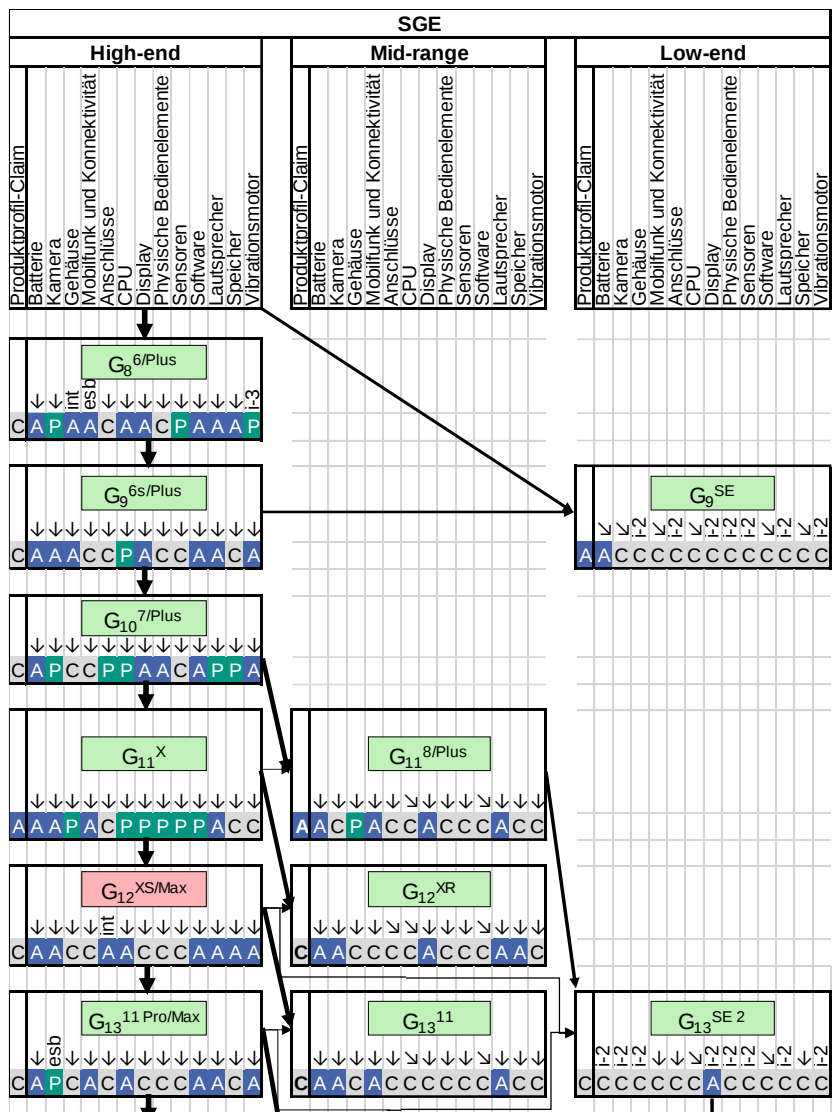


Abbildung 6.4: Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 2 links.

	Makroökonomisch	Mikroökonomisch	Unternehmen		Markt eintritt	Verkaufte Einheiten in allen Varianten [Mo.]
				Umfeldfaktoren		
▶	Technologie /Verfügbarkeit neuer Standards /hoch	Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	Kunde /Trend zu größeren Displays /hoch	Nachfrage /Wachstumsrate /hoch	2014	222,44
▶	Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	Kunde /Kritik an vorheriger Generation /hoch	Nachfrage /Wachstumsrate /hoch	Produktentwicklung /Kundenorientierung /hoch	2015 (2016 SE)	214,4
▶	Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	Nachfrage /Wachstumsrate /hoch	Geschäftsmodell /Offenes Ökosystem /niedrig		2016	215,6
▶	Technologie /Verfügbarkeit neuer Standards /hoch	Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	Kunde /Kritik an vorheriger Generation /hoch	Nachfrage /Niveau /hoch	2017	217,5
				Akquisition /RSE für neue Technologie /hoch		
▶	Technologie /Verfügbarkeit neuer Fertigungstechnologie /hoch	Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	Kunde /Trend zu größeren Displays /hoch	Nachfrage /Niveau /hoch	2018	185,9
▶	Technologie /Verfügbarkeit neuer Standards /hoch	Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	Nachfrage /Niveau /hoch		2019 (2020 SE)	194,7

Abbildung 6.5: Zentrale Visualisierung der Fallstudie iPhone Teil 2 rechts.

Architektur und Produktvarianten

Ab der $G_{7^{5s \& 5c}}$ wurden immer mindestens zwei Produktvarianten pro Jahr in den Markt eingeführt. In der Studie wurden die ab der $G_{8^{6/Plus}}$ als kleineres und größeres Modell erschienenen High-End-Varianten („Plus“, ab $G_{12^{iPhone}}$ „Max“) zusammengefasst. Ebenso wurden die verschiedenen Größen der mittleren Varianten (ohne Zusatz und „mini“) ab der $G_{14^{12 Pro/Max \& 12/mini}}$ zusammengefasst. Speicher- und Farb-Varianten oder Varianten für unterschiedliche geographisch segmentierte Märkte wurden nicht explizit modelliert. Für eine detailliertere Portfolio-Betrachtung könnte dafür eine Produktfamilien-Ebene eingeführt werden, die der Produktvarianten-Ebene in dieser Fallstudie entsprechen würde. Die Architektur der Systemgenerationen veränderte sich in der modellhaften Betrachtung nicht. Es kamen weder neue Subsysteme hinzu, noch wurden Subsysteme entfernt.

Markterfolg

Alle Systemgenerationen des iPhone wurden bis auf die Varianten $G_{7^{5c}}$ und die $G_{12^{XS/Max}}$ als **erfolgreich** eingestuft. Die Verkaufszahlen stiegen von 6,13 Mio. verkauften Einheiten² für die $G_{1^{iPhone}}$ kontinuierlich auf 222,44 Mio. für die $G_{8^{iPhone, 6/Plus}}$. Die erste niedriger eingeordnete Variante $G_{7^{5c}}$ verkaufte sich nicht den Erwartungen entsprechend (Jacobsen, 2017) und wurde daher als nicht erfolgreich eingeordnet. In den darauffolgenden Systemgenerationen erwies sich eine angepasste Varianten-Strategie als erfolgreich. Von der $G_{9^{6s \& 6s Plus \& SE}}$ bis zur $G_{11^{X \& 8/Plus}}$ blieben die Verkaufszahlen bei über 200 Mio. Einheiten. Die $G_{12^{XS \& XS/Max \& XR}}$ und $G_{13^{11 Pro/Max \& 11 \& SE 2}}$ waren weniger erfolgreich und verkauften sich <200 Mio. Mal. Als **nicht erfolgreich** eingeordnet wurde neben der $G_{7^{5c}}$ die $G_{12^{XS/Max}}$. Die $G_{12^{XS/Max}}$ wurde durch den Erfolg der $G_{12^{XR}}$ kannibalisiert (Su, 2018) und Apple kommentierte in einem Aktionärsbrief, dass die Verkaufszahlen hinter den Erwartungen zurückgeblieben seien (Apple Inc., 2019). Mit der

² Apple veröffentlicht Verkaufszahlen für die gesamte Produktlinie iPhone je Quartal (IDC, 2024). Die Summen für die jeweiligen Systemgenerationen enthalten das Quartal, in dem der Verkaufsstart lag. In diesem Quartal bis Verkaufsstart verkaufte Einheiten der Vorgängergeneration und ab Verkaufsstart noch weiter verkaufte Einheiten der Vorgängergeneration sind in der Summe enthalten und fehlen in der Summe der Vorgängergeneration.

G₁₄^{12 Pro/Max & 12/mini} und den folgenden Systemgenerationen stiegen die Verkaufszahlen wieder auf über 200 Mio. Einheiten.

Umfeldfaktoren

Nach den identifizierten Umfeldfaktoren waren für die Evolution des iPhone aus dem mikroökonomischen Umfeld insbesondere Kundenkritik und sich ändernde Kundenbedürfnisse relevant. Durch das am Markt neue Produktprofil der G₁^{iPhone} schaffte Apple eine Nische im Mobiltelefon-Markt (West & Mace, 2007). Ab der G₃^{3GS} übernahmen auch Wettbewerber das Produktprofil. Makroökonomisch hatten technologische Fortschritte über neue Standards und Fertigungsprozesse, Regulierung und gesellschaftliche Entwicklungen Einfluss. Im internen Umfeld fielen der Wechsel von einem geschlossenen Ökosystem zu einem offenen Plattform-Geschäftsmodell für den App-Store in der G₂^{3G} und die gezielte Akquise von Unternehmen für G₁-Entwicklung und PV auf.

Produktprofil

Die Produktprofil-Claims des iPhone entwickelten sich nach dem Wechsel des Geschäftsmodells und damit einhergehend mit einer PV von der G₁^{iPhone} zur G₂^{3G} nicht mehr mit PV weiter. Lediglich im Zuge der angepassten Varianten-Strategie von der G₇^{5c} zur G₁₁^{X & 8/Plus} traten AVs der Produktprofil-Claims auf. So wurde mit der G₇^{5c} Individualisierung und ein niedrigerer Preis als zusätzlicher Nutzen eingeführt und mit der G₁₁^{8/Plus} eine nostalgisch anmutende Optik und Haptik als Nutzen ergänzt. Bei den High-End-Varianten sticht der Produktprofil-Claim der G₁₁^X heraus, die zum zehnjährigen Jubiläum als dezidiert innovativer Meilenstein deklariert wurde.

Referenzsystemelemente

In der Evolution des iPhone waren 12-mal in der High-End-Variante externe RSE aus der gleichen Branche Ausgangspunkt für Variation, insbesondere aus dem Wettbewerb. Der persönliche Assistent Siri wurde für die G₅^{4S} basierend auf externen Forschungsergebnissen entwickelt. Auch interne RSE aus anderen Produktlinien wie dem iPad (Tablet) oder dem Mac (Personal Computer) kamen achtmal in den High-End-Varianten nach der G₁^{iPhone} und 8-mal bei der G₁^{iPhone} vor. Die Low-End-Varianten bezogen ihre RSE aus den parallelen, höher eingeordneten Produktvarianten einer Systemgeneration, der direkten Vorgängergeneration und der Vor-Vorgängergeneration. Bei der Analyse der mittleren Produktvarianten wurde angenommen, dass diese basierend auf der High-End-Variante der Vorgängergeneration entwickelt wurden. Wenn in der High-End-Variante und den niedriger eingeordneten Produktvarianten derselben Generation neue

Lösungsprinzipien eingeführt wurden, wurde angenommen, dass die entsprechenden Subsysteme der günstigeren Modelle auf Basis von RSE aus der High-End-Variante entwickelt wurden.

Variationsanteile

Auch in der Verteilung der Variationsanteile über die Systemgenerationen und Produktvarianten, die in Abbildung 6.8 dargestellt ist, sticht die G_{11}^X mit dem höchsten PV-Anteil von $\delta_{PV} = 46\%$ heraus. Der Neuentwicklungsanteil und der PV-Anteil nahmen aperiodisch zu und wieder ab.

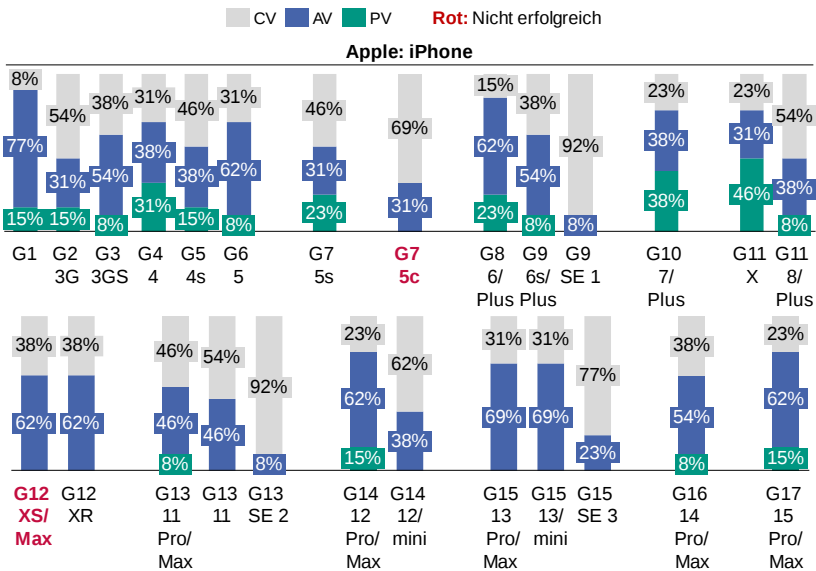


Abbildung 6.8: Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie iPhone. Innerhalb einer Systemgeneration sind die Produktvarianten abnehmend sortiert mit der High-End-Variante links.

Nach den in Abbildung 6.9 dargestellten Variationsanteilen je Subsystem lassen sich die Subsysteme des iPhone in Subsysteme, die im Laufe der Evolution mindestens eine PV erfahren haben und Subsysteme ohne PV unterteilen. Auch eine Unterteilung in häufig von Neuentwicklung betroffene Subsysteme (beispielsweise in mehr als 50 % der Systemgenerationen) und weniger häufig von Neuentwicklung betroffene Subsysteme ist möglich.

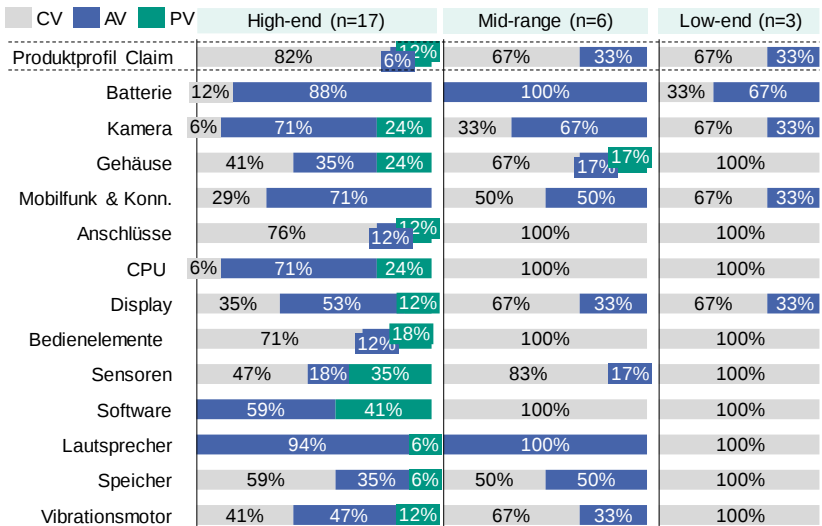


Abbildung 6.9: Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und des Produktprofil-Claims für die Fallstudie iPhone.

Variationen des technischen Systems im Detail

In der folgenden Aufzählung werden kurz für jedes Subsystem des iPhone die Variationen des technischen Systems erläutert und die bestimmten Variationsarten dargelegt:

- Die *Batterie* wurde über die Systemgenerationen in ihrer Kapazität und Gestalt optimiert und angepasst (AV).
- Mit Prinzipvariationen des Subsystems *Kamera* wurde in der G_4^4 eine zusätzliche Frontkamera, in der $G_8^{6/Plus}$ eine aktive optische Bildstabilisierung, in der $G_{10}^{7/Plus}$ ein Zweikamerasystem und in der $G_{13}^{11 Pro/Max}$ ein Dreikamerasystem eingeführt.
- Das *Gehäuse* des iPhone wurde in der G_4^4 von einem Gehäuse aus abgerundetem Kunststoff und Aluminium zu einem kantigeren Design mit Stahlrahmen und Glasboden weiterentwickelt (PV). Ab der $G_8^{6/Plus}$ wurde das Gehäuse einteilig, flacher und rundlicher, was dank des internen RSE aus dem iPad Air mit einer AV umgesetzt werden konnte. Die G_{11}^X nutzte ein Design mit Rahmen und Glasboden, um kabelloses, induktives Laden zu ermöglichen (PV). Das Gehäuse der $G_{14}^{12 Pro/Max}$ wurde wieder kantiger und mit einem Magneten („MagSafe“) ausgestattet (PV). Die $G_{16}^{14 Pro/Max}$ änderte das

Montage-Konzept des Gehäuses, das sich daraufhin beidseitig öffnen ließ (PV).

- *Mobilfunk und Konnektivität* wurden kontinuierlich mit der Einführung neuer Standards mit AV weiterentwickelt.
- Die Prinzipvariationen der *Anschlüsse* wurden durch den Wechsel vom 30-poligen auf den Lightning-Konnektor in der G_6^5 und den Wegfall der 3,5 mm Klinke in der $G_{10}^{7/Plus}$ markiert. Mit der $G_{17}^{15 Pro/Max}$ wurde von Lightning auf USB-C gewechselt, wofür bereits interne RSE aus anderen Produktlinien zur Verfügung standen (AV).
- Die *CPU* wurde von der G_1^{iPhone} bis zur G_3^{3GS} aufbauend auf Samsungs Einkern-ARM-Architektur weiterentwickelt (AV). In der G_4^4 wurde mit dem Apple A4 aus dem iPad erstmals eine eigene CPU eingesetzt. In der G_5^{4S} wurde ein Zweikern-Prozessor eingesetzt, der zuvor im iPad 2 in den Markt eingeführt wurde (AV). Mit der G_6^5 setzte Apple als erster Smartphone-Hersteller auf eine 64-Bit-Architektur (PV). Die $G_9^{6s/Plus \& SE}$ führte mit dem „M9 Motion“ einen Co-Prozessor ein (PV). Die $G_{10}^{7/Plus}$ verwendete erstmals einen Vierkern-Prozessor (PV). Die $G_{11}^{X \& 8/Plus}$ erweiterte auf sechs Kerne und einen Co-Prozessor für KI („Neural Engine“) (PV).
- Das Subsystem *Display* erfuhr in der G_{11}^X eine PV durch die Verwendung der OLED-Technologie und die Einführung der charakteristischen Aussparung („Notch“) am oberen Bildschirmrand. Mit der $G_{16}^{14 Pro/Max}$ wurde die Aussparung in das Display integriert („Dynamic Island“) (PV).
- In der G_{11}^X fiel im Subsystem *physische Bedienelemente* der in den vorigen Generationen charakteristische Home-Button weg (PV). In der $G_{17}^{15 Pro/Max}$ wurde der zuvor in allen Systemgenerationen vorhandene Mute-Switch zum frei belegbaren „Magic-Button“ weiterentwickelt (PV).
Im Laufe der Systemgenerationen kamen immer wieder neue *Sensoren* hinzu: GPS (G_2^{3G}), Magnetometer (G_3^{3GS}), Gyrosensor (G_4^4), Fingerabdrucksensor (G_7^{5s}), Barometer ($G_8^{6/Plus}$), Face-ID (G_{11}^X) und LiDAR ($G_{14}^{12 Pro/Max}$) aus dem iPad Pro.
- Die *Software* der G_2^{3G} ermöglichte durch den App Store ein neues Plattform-Geschäftsmodell (PV). Ab der G_4^4 nannte Apple sein Betriebssystem iOS und erweiterte es um Multitasking, iCloud und iMessage (PV). Weitere als PV klassifizierte Entwicklungen waren die Einführung von Siri (G_5^{4S}), neuem User-Interface (G_7^{5s}), Gestensteuerung und AR-Entwicklungsumgebung (G_{11}^X) und abermals ein grundlegend überarbeitetes User-Interface in der $G_{14}^{12 Pro/Max}$.
- Das Subsystem *Speicher* erfuhr in der $G_{10}^{7/Plus}$ eine PV durch die Verwendung von gestapelten Speicherzellen (3D-NAND-Speicher).
- Mit einer PV der *Lautsprecher* in der $G_{10}^{7/Plus}$ ertüchtigte Apple den Ohrhörerlautsprecher, um echten Stereoklang zu ermöglichen.

- Das Subsystem *Vibrationsmotor* wurde in der G_5^{4S} von einer einfachen rotierenden Unwucht zu einem runden Linearoszillator mit einer Feder geändert (PV). Die G_6^5 und G_7^{5S} nutzten wieder die rotierende Unwucht. Erst die $G_8^{6/Plus}$ griff das Prinzip wieder auf und entwickelte es zu einem aufwändigeren, quaderförmigen Oszillator mit zwei Federn weiter (PV), der ab der $G_9^{6S/Plus}$ als „Taptic Engine“ bekannt und kontinuierlich an den Bauraum der folgenden Systemgenerationen angepasst wurde (AV).

6.2 Resultierender Fallstudien-Datensatz

Dieses Kapitel gibt einen Gesamtüberblick über den Datensatz, der in Kapitel 7 fallübergreifend analysiert wird. In Kapitel 6.2.1 werden zentrale Charakteristika der Evolution der technischen Systeme in den 12 Fallstudien kurz beschrieben³. Eine ausführliche Beschreibung der Fallstudien befindet sich in Anhang A. In Kapitel 6.2.2 werden Eigenschaften des Datensatzes diskutiert, die in der fallübergreifenden Analyse berücksichtigt werden müssen.

6.2.1 Kurzbeschreibung der Fallstudien

Die Fallstudie **iPhone** untersucht die von 2007 bis 2024 erschienenen iPhone-Systemgenerationen geclustert in 26 Systemgenerationen und unterteilt in drei Produktvarianten (High-end, Mid-range, Low-end). Die mit 13 Subsystemen modellierte Architektur blieb bestehen. Das Produktprofil entwickelte sich nach der G_2^{3G} nicht mehr mit PV weiter. Bis auf die G_7^{5c} und die $G_{12}^{XS/Max}$ waren alle Systemgenerationen erfolgreich. Umfeldfaktoren wie Kundenkritik, technologische Standards und der Wechsel zu einem Plattform-Geschäftsmodell beeinflussten die Entwicklung. Subsysteme mit relativ hohem PV-Anteil waren Kamera, Gehäuse, CPU, Sensoren und Software. Unter den Systemgenerationen stach die G_{11}^X mit $\delta_{PV} = 46\%$ heraus.

Die Fallstudie **Mi Ultra** untersucht die von 2020 bis 2024 erschienenen fünf Systemgenerationen der Xiaomi Mi Ultra-Serie, die als High-End-Smartphones vermarktet wurden. Die mit 13 Subsystemen modellierte Architektur blieb bestehen. Wettbewerbsdruck und Nachfrage wurden als relevante Umfeldfaktoren identifiziert. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich primär durch Ausprägungsvariationen weiter, mit einer markanten PV in der G_{12}^{12S} Ultra durch die Kooperation mit Leica.

³ Die Zusammenfassung wurde durch Generative KI unterstützt, siehe Anhang C.

Bis auf die G_{12}^{12S} Ultra wurden alle Systemgenerationen als erfolgreich eingestuft. Es kamen fünf Prinzipvariationen in den Subsystemen Kamera, Display, Software und Vibrationsmotor vor.

Die Fallstudie **THS-G** untersucht die von 1997 bis 2020 erschienenen 20 Systemgenerationen des Toyota-Hybrid-Synergy-Drive-Hybridgetriebes (THS-G), unterteilt in sieben Produktvarianten von Kleinwagen bis Oberklasse. Die mit drei Subsystemen modellierte Architektur blieb bestehen. Umfeldfaktoren wie progressive CO_2 -Gesetzgebung, gesellschaftliche Entwicklungen und die Finanzkrise beeinflussten die Evolution maßgeblich. Alle Systemgenerationen wurden als erfolgreich eingestuft. In sieben Systemgenerationen wurden Subsysteme mit PV entwickelt, die in sechs Fällen mit einer PV des Produktprofils einhergingen. Dazu zählt die Einführung zusätzlicher Planetensätze, Kupplungen und Layoutänderungen wie die Einführung der standardisierten TNGA-Architektur in der $G_5^{\text{Komp, P610}}$.

Die Fallstudie **VW DCT** untersucht die von 2003 bis 2016 erschienenen fünf Systemgenerationen des Volkswagen Doppelkupplungsgetriebes (DCT), unterteilt in drei Produktvarianten für niedrige, mittlere und hohe Drehmomente. Die mit acht Subsystemen auf der ersten Ebene modellierte Architektur blieb weitgehend bestehen, abgesehen vom Wegfall der Rücklaufwelle in der $G_1^{\text{HT, DQ500}}$. Umfeldfaktoren wie die steigende Akzeptanz von Automatikgetrieben und hoher Wettbewerbsdruck beeinflussten die Evolution. Alle Systemgenerationen wurden als erfolgreich eingestuft. Auffällig ist der hohe PV-Anteil von $\delta_{\text{PV}} = 61\%$ in der $G_1^{\text{LT, DQ200}}$ durch ein geändertes Kupplungskonzept und Layoutänderungen. Weitere PV traten in der $G_1^{\text{HT, DQ500}}$ auf. Das grundlegende Produktprofil blieb bestehen.

Die Fallstudie **Google Glass** untersucht die von 2014 bis 2023 erschienenen vier Systemgenerationen der Google Glass, einem AR-Head-mounted-Display. Die mit neun Subsystemen modellierte Architektur blieb bestehen. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich von einem Augmented-Reality-Erlebnis für Privatanutzer ($G_1^{\text{Explorer Ed.}}$) mit PV zu Effizienzsteigerung in Unternehmensprozessen ($G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$). Umfeldfaktoren wie geringe gesellschaftliche Akzeptanz, Datenschutzbedenken und später steigender Wettbewerbsdruck beeinflussten die Evolution maßgeblich. Die ersten beiden und die vierte Systemgeneration wurden als nicht erfolgreich eingestuft, die $G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$ als erfolgreich. Auffällig sind PVs in den Subsystemen Anschlüsse und Lautsprecher sowie die Variation des Brillenrahmens und die mehrfache Einführung neuer CPU-Architekturen.

Die Fallstudie **Thermomix** untersucht die von 1971 bis 2019 erschienenen acht Systemgenerationen des Thermomix, einer multifunktionalen Küchenmaschine von

Vorwerk. Die mit sechs bis neun Subsystemen modellierte Architektur blieb in den ersten vier Generationen unverändert, bevor schrittweise neue Subsysteme wie Waage, Dampfgeräufsatz und Online-Anbindung hinzukamen. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich überwiegend durch AV mit der Integration zusätzlicher Kochfunktionen, die einzige PV trat in der G_7^{TM5} mit der Einführung des „Guided Cooking“ über ein Plattform-Geschäftsmodell auf. Umfeldfaktoren wie neue Kundenbedürfnisse, gesellschaftliche Entwicklungen und die Corona-Pandemie beeinflussten die Evolution maßgeblich. Alle Systemgenerationen wurden als erfolgreich eingestuft. Auffällig sind PVs in Gehäuse, Bedienschnittstelle und Mixtopf sowie die Einführung neuer Subsysteme.

Die Fallstudie **PlayStation** untersucht die von 1994 bis 2020 erschienenen fünf Systemgenerationen der Sony PlayStation, einer stationären Spielkonsole. Die mit zehn Subsystemen modellierte Architektur blieb über alle Generationen bestehen, jedoch traten in den Subsystemen CPU, GPU, Kühlsystem und I/O-Schnittstellen mehrere PVs auf. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich von der Ermöglichung von 3D-Gaming für Privatkunden (G_1^{PS1}) mit PV hin zu einem Plattform-Geschäftsmodell mit digitalen Diensten ab der G_3^{PS3} . Umfeldfaktoren wie hoher Wettbewerbsdruck, technologische Standards und die Corona-Pandemie beeinflussten die Evolution maßgeblich. Alle Systemgenerationen wurden als erfolgreich eingestuft. Auffällig ist, dass keine CV identifiziert wurden.

Die Fallstudie **BYD Batterie** untersucht die von 2008 bis 2024 erschienenen sechs Systemgenerationen der BYD Traktionsbatterien, die in verschiedenen Fahrzeugmodellen eingesetzt wurden. Die mit vier Subsystemen modellierte Architektur blieb bestehen, jedoch änderten sich Lösungsprinzipien stark, insbesondere durch den Wechsel von Modulbauweise zu Skateboard-Architektur und Cell-to-Pack-Design. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich von einer Batterie für Plug-in-Hybride (G_1^{F3DM}) mit PV hin zu Lösungen für vollelektrische Fahrzeuge (G_2^{e6}) und wurde in späteren Generationen durch AV weiterentwickelt. Umfeldfaktoren wie Förderpolitik, progressive Regulierung, gesellschaftliche Akzeptanz und neue Fertigungstechnologien beeinflussten die Evolution maßgeblich. Auffällig sind PVs in allen Subsystemen sowie ein sehr hoher PV-Anteil von $\delta_{PV} = 100\%$ in drei Systemgenerationen.

Die Fallstudie **UE Boom** untersucht die von 2013 bis 2022 erschienenen acht Systemgenerationen der UE Boom, einer Produktlinie tragbarer Bluetooth-Lautsprecher von Logitech. Die mit neun Subsystemen modellierte Architektur blieb über alle Generationen unverändert. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich nach der $G_1^{Boom 1}$ nicht mehr mit PV weiter, die Einführung neuer Produktvarianten (Megaboom, Wonderboom) führte zu AVs. Umfeldfaktoren wie sinkende Nachfrage

ab 2019 und die Corona-Pandemie beeinflussten die Evolution. Alle Systemgenerationen vor 2018 wurden als erfolgreich eingestuft, spätere als nicht erfolgreich. Auffällig ist, dass nach der $G_1^{\text{Boom 1}}$ immer nur einzelne Subsysteme mit PV entwickelt wurden und der CV-Anteil in den letzten Generationen stieg.

Die Fallstudie **SEW DTS** untersucht 14 Systemgenerationen der von SEW Eurodrive entwickelten fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTS, engl. Driverless Transport System (DTS)). Die mit sechs Subsystemen auf der ersten Systemebene modellierte Architektur blieb über alle Generationen bestehen. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich von gesteigerter Flexibilität und Autonomie durch die Integration einer Batterie (G_1) mit PV hin zu Standardisierung und Baukastenentwicklung (G_2) und wurde in späteren Generationen durch AV weiterentwickelt. Als relevanter Umfeldfaktor wurde die Strategieänderung hin zu Standardisierung identifiziert. Alle Systemgenerationen wurden als erfolgreich eingestuft. Auffällig ist ein übergreifend hoher CV-Anteil, ein bis zur G_4 steigender Neuentwicklungsanteil sowie PVs in den Subsystemen Antriebssystem und Ladungshandling.

Die Fallstudie **Falcon** untersucht die von 2008 bis 2019 erschienenen fünf Systemgenerationen der SpaceX Falcon-Trägerraketen. Die mit neun Subsystemen modellierte Architektur blieb über alle Generationen bestehen, jedoch traten PVs in den Subsystemen Motoren der Stufen 1 und 2, Reuse-Konzept und Navigation auf. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich von kosteneffizienten Starts für kleine Nutzlasten ($G_1^{\text{Falcon 1}}$) mit PV zu bemannten Raumfahrtmissionen ($G_4^{\text{Falcon 9 FT}}$) und wurde in allen Generationen weiterentwickelt. Umfeldfaktoren wie steigender Wettbewerbsdruck, regulatorische Anforderungen für bemannte Missionen und interne Faktoren wie hohe vertikale Integration beeinflussten die Evolution maßgeblich. Alle Systemgenerationen wurden als erfolgreich eingestuft. Auffällig sind PVs in den Motoren und im Reuse-Konzept sowie ein hoher AV-Anteil bei der Skalierung von kleinen zu großen Nutzlasten.

Die Fallstudie **Ariane** untersucht die von 1998 bis 2024 erschienenen sieben Systemgenerationen der Ariane-Trägerraketen. Die mit acht Subsystemen modellierte Architektur blieb über alle Generationen bestehen, jedoch traten PVs vor allem in den Motoren der Stufen 1 und 2 sowie im Fahrzeugdesign auf. Der Produktprofil-Claim entwickelte sich von einer zuverlässigen und leistungsstarken Trägerrakete ($G_5^{\text{Ariane 5G}}$) mit AV hin zu höherer Nutzlast in den „Evolution“-Varianten ($G_7^{\text{Ariane 5ECA}}$, $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$) und Kostensenkung ($G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$). Umfeldfaktoren wie steigender Wettbewerbsdruck und interne Standardisierung prägten die Evolution. Auffällig sind hohe PV-Anteile in den Generationen $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ und $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ sowie ein sehr hoher CV-Anteil von $\delta_{CV} = 100\%$ in der $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$.

6.2.2 Eigenschaften des Fallstudien-Datensatzes

Die zwölf Fallstudien wurden nach dem Datenmodell aus Kapitel 5.2 in einem Fallstudien-Datensatz zusammengefasst. Der Datensatz beinhaltet 112 Datenpunkte⁴ in der Tabelle Systemgenerationen und Produktprofile, 1195 Datenpunkte in der Tabelle Variationen und Referenzsystemelemente und 405 Datenpunkte in der Tabelle Umfeldfaktoren. Abbildung 6.10 (links) zeigt die Häufigkeit der Variationsarten über alle 1195 Variationen. Mit einem Anteil von 16,3 % an allen Datenpunkten hat der Datensatz insgesamt einen höheren PV-Anteil im Vergleich zu früheren Studien (Albers, Bursac et al., 2015). Abbildung 6.10 (Mitte) zeigt die Herkunft der Referenzsystemelemente (RSE), auf denen die Variationen basieren. Der Anteil unternehmensexterner Referenzen könnte in der Realität höher sein, da diese mit der literaturbasierten Forschungsmethode schwer zu identifizieren waren.

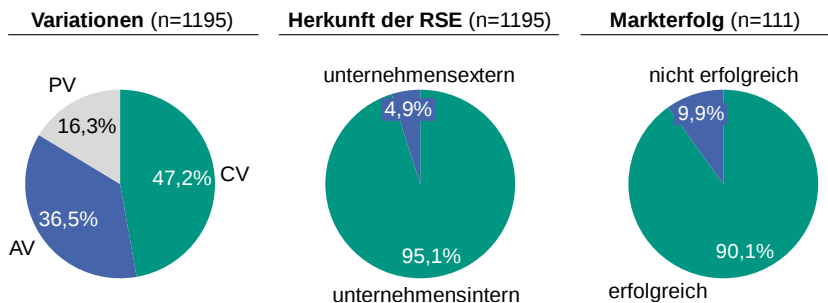


Abbildung 6.10: Häufigkeit der Variationsarten, Herkunft der RSE und Markterfolg über die Datenpunkte im Datensatz.

Abbildung 6.10 (rechts) zeigt, dass der Datensatz lediglich 9,9 % nicht erfolgreicher Systemgenerationen enthält. Durch dieses Klassen-Ungleichgewicht entsteht das Risiko eines „Survivor Bias“ in der Analyse und Theoriesynthese. Die Verteilung der Datenpunkte zu Variationen und zu Umfeldfaktoren über die Fallstudien in Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12 zeigen weitere Ungleichgewichte auf.

⁴ ohne die $G_1^{VW\ DCT, MT, DQ250}$ der Fallstudie VW DCT enthält der Datensatz 111 Datenpunkte. Die $G_1^{VW\ DCT, MT, DQ250}$ diente als Vergleichsbasis, für die selbst aber keine Variationsarten bestimmt werden konnten.

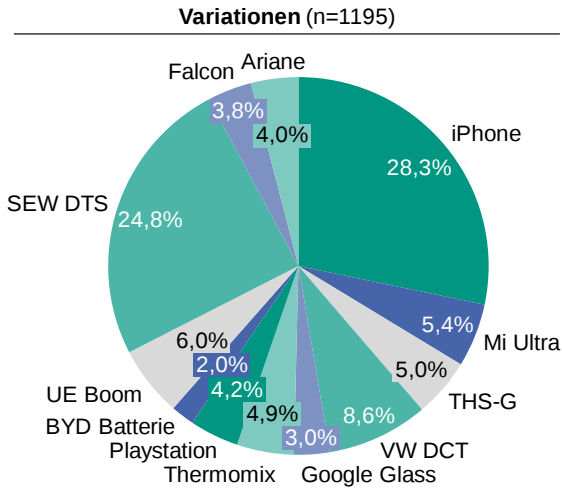


Abbildung 6.11: Verteilung der Datenpunkte zu Variationen über die Fallstudien.

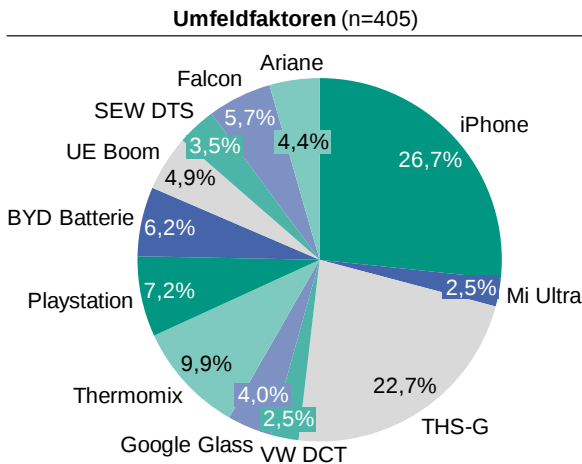


Abbildung 6.12: Verteilung der Datenpunkte zu Umfeldfaktoren über die Fallstudien.

Durch den unterschiedlichen Detaillierungsgrad der Systemmodelle, die der Analyse der Variationen zugrunde lagen, und der unterschiedlichen Anzahl

analysierter Systemgenerationen je Fallstudie (vgl. Tabelle 4.2) haben die Fallstudien einen unterschiedlichen Anteil an den Variations-Datenpunkten. So sind die Fallstudien iPhone und SEW DTS zusammengekommen für mehr als die Hälfte der Variations-Datenpunkte verantwortlich. Eine ähnliche Situation liegt bei der Verteilung der Umfeldfaktoren vor.

Diese Ungleichgewichte zwischen erfolgreichen und nicht erfolgreichen Systemgenerationen und der Verteilung der Datenpunkte müssen zusätzlich zu den in Kapitel 5.3 aufgeführten pragmatischen Verkürzungen des Beschreibungsmodells in der fallübergreifenden Analyse und Theoriesynthese berücksichtigt werden.

Viele Merkmale des Datenmodells wie die Variationsart, die Herkunft der RSE, die Umfeldfaktoren und die Erfolgsklassifikation sind nominalskaliert und ermöglichen häufigkeitsbasierte Analysen. Der Fallstudien-Datensatz bietet in Kombination mit den Fallstudienkapiteln eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den Fällen bei hoher inhaltlicher Tiefe in den einzelnen Fällen. Diese Eigenschaften sind besonders vorteilhaft für den im Folgenden verwendeten qualitativen, induktiven theoriebildenden Forschungsansatz.

7 Fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese

Kapitel 7 ist das zentrale Ergebniskapitel dieser Arbeit und hat zum Ziel, basierend auf dem Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme aus Kapitel 5 und dem Fallstudien-Datensatz mit den Fallstudien-Kapiteln aus Kapitel 6 die Forschungsfragen FF2 und FF3 zu beantworten und das zentrale Forschungsziel zu erreichen. Dazu werden in diesem Kapitel die Fallstudien fallübergreifend analysiert und die Erkenntnisse zu den **Zusammenhängen von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE nach Albers sowie Innovation** in Form von Theoriebausteinen synthetisiert und in das Beschreibungsmodell als theoretisches Rahmenwerk eingeordnet. Erste Ideen für Theoriebausteine aus der fallübergreifenden Analyse und Theoriesynthese wurden tabellarisch auf einer Fachkonferenz veröffentlicht (Albers, Pfaff, Thümmel et al., 2025). Die in dieser Dissertation dargestellten Theoriebausteine gehen sowohl in der Tiefe als auch in der Breite weit über diese Vorarbeit hinaus und sind bislang unveröffentlicht.

Die Forschungsmethode zur fallübergreifenden Analyse und Theoriesynthese umfasst die vier Stadien

- 1) Aufbau des Fallstudien-Datensatzes und Ableitung erster Theoriebausteine
- 2) Fallbasierte iterative fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese
- 3) Variablenbasierte fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese
- 4) Integration der Theoriebausteine in das Beschreibungsmodell und Diskussion der Anwendbarkeit

und wurde in Kapitel 4.2.2 detailliert beschrieben. Es werden drei Kategorien von Theoriebausteinen synthetisiert (vgl. Kapitel 4.2.2): **Heuristiken, Muster** und **weitere Erkenntnisse**. Abbildung 7.1 ordnet die Unterkapitel zu den Theoriebausteinen in das Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme aus Kapitel 5 ein. Diese Einordnung der Theoriebausteine in das Beschreibungsmodell resultiert aus Stadium 4 der Forschungsmethode für die fallübergreifende Analyse und ist damit ein zentrales Ergebnis der Theoriesynthese.

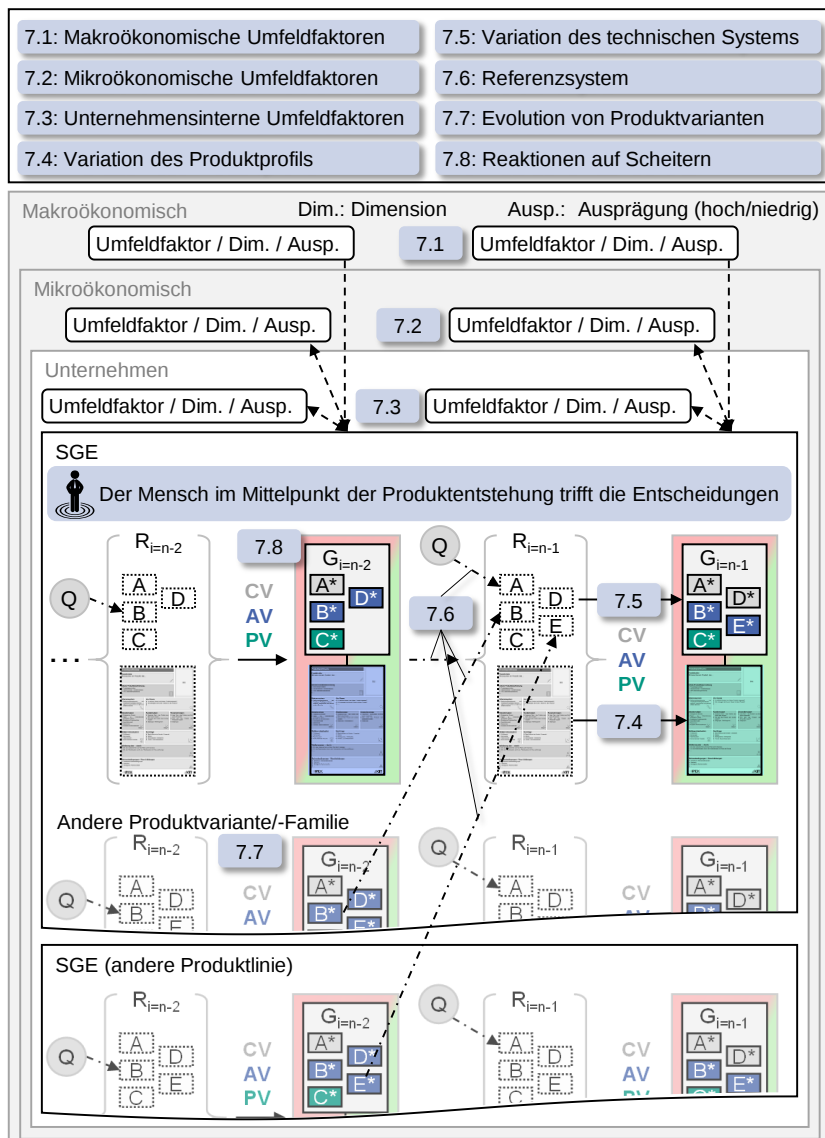


Abbildung 7.1: Einordnung der Unterkapitel zu den Theoriebausteinen in das Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme.

Um die **Anwendung der Theoriebausteine in der Produktentwicklung** (FF3) zu ermöglichen, beginnt jedes Teilkapitel mit einer Tabelle, die die jeweiligen Theoriebausteine auflistet und beschreibt, in welchen Entwicklungssituationen sie einen Mehrwert bieten können. Grundsätzlicher Anwendungsbereich ist die Frühe Phase der Produktentwicklung mit dem Integrationsbereich der Strategischen Produktentwicklung, insbesondere die generationsübergreifende Strategische Produktentwicklung, wobei auch explizit $G_{i=1}$ -Entwicklung berücksichtigt wird. Dementsprechend steht bei der Formulierung anwendungsorientierter Theoriebausteine die Unterstützung der Entwicklung von **Produktprofilen** und **Systemkonzepten** im Vordergrund (vgl. Kapitel 2.2.2). Für die anwendungsorientierte Formulierung der Theoriebausteine sind prinzipiell zwei Anwendungsszenarien in der Produktentwicklung denkbar:

- 1) **Reaktiv:** Die beschriebene Situation trat in einer Vorgängergeneration $G_{i=n-x}$ oder einer anderen Referenz im Markt auf. Heuristiken, Muster oder Erkenntnisse zur Evolution technischer Systeme werden als Reaktion darauf für die Entwicklung der $G_{i=n}$ oder $G_{i=n+x}$ angewandt.
- 2) **Proaktiv:** Zukünftige Umfeldentwicklungen und Entwicklungssituationen werden antizipiert. Heuristiken, Muster oder Erkenntnisse zur Evolution technischer Systeme werden proaktiv für die Entwicklung der $G_{i=n}$ oder $G_{i=n+x}$ angewandt.

Wobei $x \in \mathbb{N}$, $x > 0$ die Zusammenhänge für die jeweilige Entwicklungssituation auch für weiter zurückliegende Vorgängergenerationen und weiter in der Zukunft liegende Systemgenerationen beschreibt. Viele Theoriebausteine sind für beide Anwendungsszenarien anwendbar, was in den Teilkapiteln zugunsten der Übersichtlichkeit nicht weiter thematisiert wird.

Wie im Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme in Kapitel 5.1 bereits eingeführt, können **neue Lösungsprinzipien**, über die neuer Nutzen und damit Innovationspotenzial realisiert werden kann, über drei Wege in das technische System gelangen:

- über PV ausgehend von $G_{i=n-x}$
- über CV, AV, PV ausgehend von internen RSE anderer Produktlinien
- über CV, AV, PV ausgehend von externen RSE.

Auch hier wird im Folgenden nicht in jedem Theoriebaustein, der PV beinhaltet, zusätzlich von linienexternen RSE gesprochen, um die Lesbarkeit zu verbessern.

7.1 Makroökonomische Umfeldfaktoren

Makroökonomische Umfeldfaktoren können Innovationsdruck auf die Produktentwicklung ausüben, aber nicht einfach von Unternehmen beeinflusst werden. Dadurch können sie auch als Rahmenbedingungen im Sinne des Produktprofils verstanden werden. In der fallübergreifenden Analyse wurden Theoriebausteine induktiv abgeleitet – basierend auf wiederkehrenden Umfeldfaktoren, den damit verbundenen Variationen im Produktprofil und im technischen System sowie dem jeweiligen Markterfolg der betrachteten Systemgenerationen. Eine Übersicht dieser Theoriebausteine ist in Tabelle 7.1 dargestellt. Nicht im Fokus standen technologische Weiterentwicklungen – diese werden über Referenzsystemelemente in Kapitel 7.6 berücksichtigt.

Tabelle 7.1: Überblick über die Theoriebausteine zu makroökonomischen Umfeldfaktoren und deren Anwendung in der Produktentwicklung.

Nr.	Kap.	Beschreibung	Anwendung
H01	7.1.1	Auf niedrige Akzeptanz in der Gesellschaft mit PV reagieren	Die Theoriebausteine können dazu verwendet werden, den „Fit“ von Produktprofil und technischem System zum makroökonomischen Umfeld zu verbessern und damit das Innovationspotenzial zu erhöhen – sowohl proaktiv als auch reaktiv.
H02	7.1.2	Proaktive (Über-)Erfüllung von rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen	
H03		Umgehung von rechtlichen Rahmenbedingungen	
H04	7.1.3	Mitnahme gesellschaftlicher Entwicklungen durch AV	
E01		Positiver Einfluss gesellschaftlicher Entwicklungen auf die Nachfrage	
E02	7.1.4	Positiver oder negativer Einfluss von Krisen – je nach Produktprofil	

H Heuristik	H Einzelfall-Heuristik	E Weitere Erkenntnis
--------------------	-------------------------------	-----------------------------

7.1.1 Niedrige Akzeptanz in der Gesellschaft

Niedrige gesellschaftliche Akzeptanz wird von konkreter Kundenkritik (H05) unterschieden. Drei Systemgenerationen verteilt über drei Fallbeispiele, davon eine $G_{i=1}$ und zwei $G_{i>1}$, zeigten niedrige gesellschaftliche Akzeptanz. Aus niedriger gesellschaftlicher Akzeptanz resultierte eine niedrige Nachfrage mit negativer Auswirkung auf den Markterfolg und somit Innovationsdruck. In den drei Fällen

wurden mehrere Subsysteme und das Produktprofil mit PV neuentwickelt. Daraus wurde Heuristik H01 (Abbildung 7.2) abgeleitet.

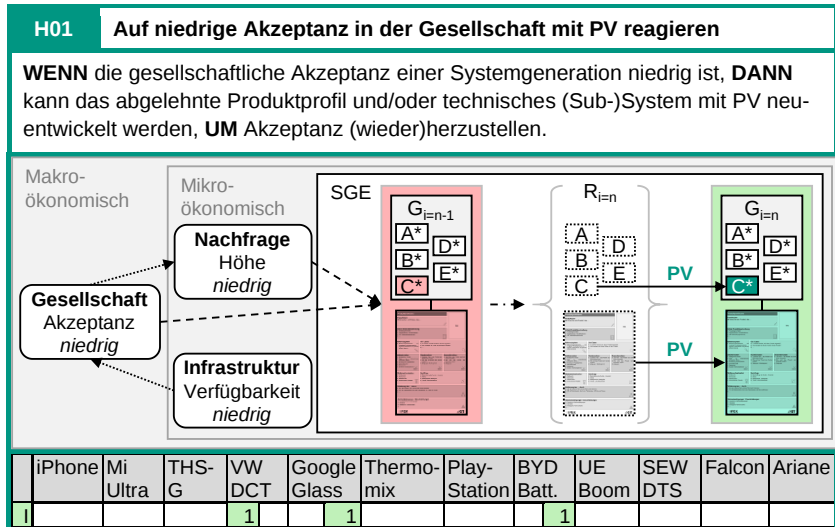


Abbildung 7.2: H01: Auf niedrige Akzeptanz in der Gesellschaft mit PV reagieren. In der Abbildung ist die reaktive Anwendung bezogen auf die die $G_{i=n-1}$ dargestellt.

In den Fallstudien VW DCT und BYD Batterie betraf die niedrige Akzeptanz jeweils die Technologien Automatikgetriebe in der Kompaktklasse und batterieelektrische Fahrzeuge für Privatanwender. Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H01 werden kurz zusammengefasst:

- VW DCT:** Mit der $G_1^{\text{VW DCT, MT, DQ250}}$ entwickelte VW sowohl das Produktprofil (Kombination der Vorteile von Handschaltgetrieben und Wandler-Stufenautomaten) als auch das Getriebekonzept hin zum Doppelkupplungsgetriebe mit PV weiter. Nicht akzeptierte RSE waren vorangegangene Wandler-Stufenautomaten in der Kompaktklasse.
- BYD Batterie:** Die $G_3^{\text{BYD Batterie, qinDM}}$ wurde als Reaktion auf die Ablehnung der $G_2^{\text{BYD Batterie, e6}}$ mit PV in allen analysierten Subsystemen entwickelt. Die niedrige Akzeptanz gegenüber E-Fahrzeugen wurde insbesondere von fehlender öffentlicher Ladeinfrastruktur hervorgerufen. Im Produktprofil wurde von einem Batteriesystem für ein rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug wieder zum Hybridkonzept der $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ umgestellt. Da die Produktprofil-Variation von einem internen RSE ausging, handelt es sich nach Definition „nur“ um eine

AV, verglichen mit der $G_2^{\text{BYD Batterie, e6}}$ kann die Änderung aber auch als PV interpretiert werden.

- **Google Glass:** Im Fall der Google Glass bezog sich die niedrige Akzeptanz und sogar Ablehnung auf das konkrete Produkt selbst, das allerdings eine neue Technologie (AR-HMD für den öffentlichen und alltäglichen Gebrauch) umsetzte. Google reagierte auf die Ablehnung der $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ und $G_2^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ ebenfalls mit einer PV des Produktprofils und änderte die Zielgruppe der $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$ von Privat- (B2C) auf Unternehmenskunden (B2B). Damit einhergehend wurden drei Subsysteme mit PV entwickelt.

7.1.2 Rechtliche und politische Rahmenbedingungen

Änderungen der produktbezogenen rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen, insbesondere Regulierung, Zielvorgaben und Subventionen bzw. Kaufanreize, hatten Einfluss auf die Evolution. Diese bezogen sich auf Gesamtsysteme, Subsysteme und Produktprofile. In acht Systemgenerationen verteilt über fünf Fallbeispiele, davon zwei $G_{i=1}$, kamen neue rechtliche und politische Rahmenbedingungen als Umfeldfaktor vor. Aus fünf erfolgreichen Systemgenerationen wurde H02 (Abbildung 7.3) abgeleitet. Zwei nicht erfolgreiche Systemgenerationen sprechen eingeschränkt gegen H02.

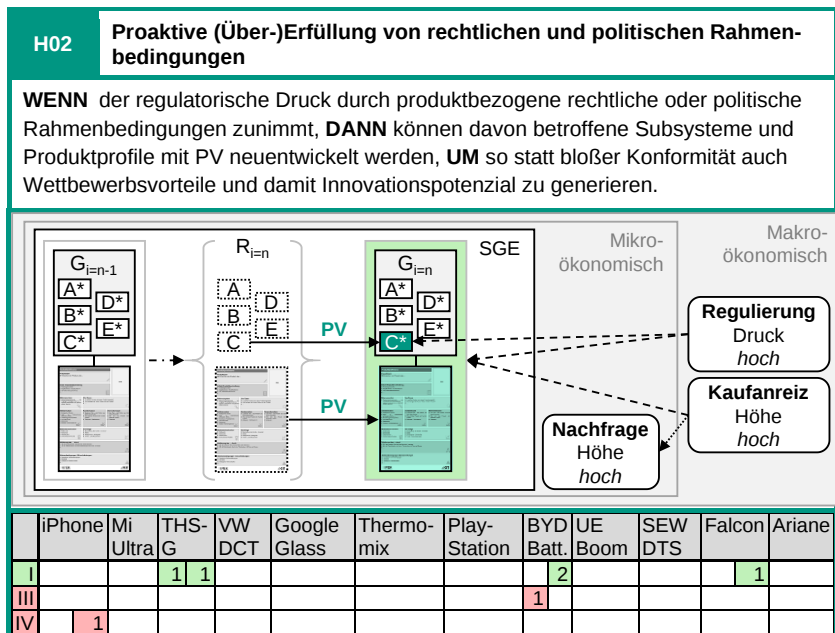


Abbildung 7.3: H02: Proaktive (Über-)Erfüllung von rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H02 werden kurz zusammengefasst:

- **BYD Batterie:** BYD richtete die SGE stets auf die produktbezogenen politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen aus, unter anderem auf die Härte der Regulierung durch Ratifizierung des Kyoto-Protokolls, Zielvorgaben der chinesischen Regierung für hybride und elektrische Fahrzeuge sowie ein

sich weiterentwickelndes Subventionssystem mit Kaufanreizen für Kunden (bspw. Steuererlass beim Kauf bestimmter Fahrzeuge) und Unternehmen (Prämien für erfolgreichen Verkauf kraftstoffeffizienter Fahrzeuge oder die Entwicklung energiedichter Batteriesysteme). Der erste Erfolg stellte sich erst mit der $G_2^{BYD, e6}$ ein. Die PV der Zelle in der G_4^{BYD} Batterie, qinpro von LiFePO4 zu energiedichtem und teurerem NCM wurde durch die Subventionen ermöglicht. Der Misserfolg der G_1^{BYD} Batterie, F3DM kann als „Validierung im Feld“ auf dem Weg zu den nachfolgenden, erfolgreichen Systemgenerationen verstanden werden, weshalb der Fall nicht unbedingt gegen die Heuristik spricht.

- **THS-G:** Für Toyota war es eine Erfolgsstrategie, sich früh auf die kommenden produktbezogenen politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen durch PV aufzustellen. Toyota verschob zudem die Markteinführung der $G_1^{THS-G, Komp, P110}$ auf 1997, um von der Wirkung des Kyoto-Protokolls zu profitieren (Nonaka & Peltokorpi, 2009) und führte die $G_6^{THS-G, Komp, P610}$ PHEV zwei Jahre vor dem Inkrafttreten der dritten Phase der Kalifornischen Zero-Emission-Vehicle (ZEV) Programms ein, das nicht Plug-In-Hybride stärker reglementierte (McConnell, Leard & Kardos, 2019).
- **Falcon:** Durch die Aufnahme von Personenbeförderung in das Produktprofil der Falcon nahm ab der $G_4^{SpaceX, Falcon 9 FT}$ der regulatorische Druck zu. Zur Erfüllung war keine PV notwendig, was dafürspricht, dass die Rahmenbedingungen bereits in früheren Systemgenerationen berücksichtigt wurden.
- **iPhone:** Ab der $G_{17}^{iPhone, 15 Pro/Max \& 15/min}$ wurde für die technische Umsetzung des Subsystems *Anschlüsse* der USB-C-Standard durch die EU vorgeschrieben. Dies war bereits früher absehbar, wurde dennoch durch Apple erst in der $G_{17}^{iPhone, 15 Pro/Max \& 15/min}$ durch AV interner RSE umgesetzt, was sich nicht negativ auf den Markterfolg auswirkte. Die G_{17}^{iPhone} stellt ein erfolgreiches, bewusstes Abweichen von H02 dar.

Google zeigte in der Google Glass eine Umgehungsstrategie, woraus H03 (Abbildung 7.4) abgeleitet wurde. Statt (Über-)Erfüllung umging Google mit dem Wechsel des Produktprofils von B2C auf B2B in der $G_3^{Google Glass, Enterprise Ed.}$ die für den öffentlichen Raum geltenden Verbote.

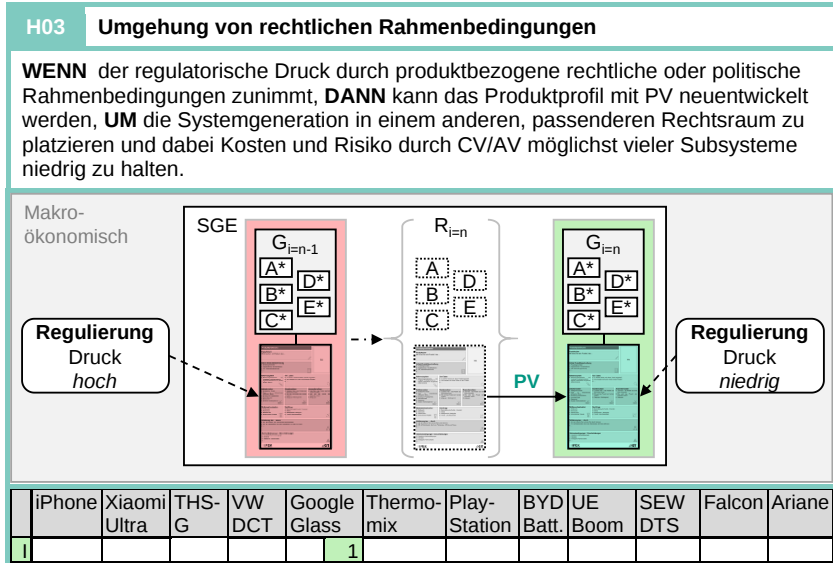


Abbildung 7.4: H03: Umgehung von rechtlichen Rahmenbedingungen. Die Abbildung zeigt die reaktive Anwendung.

7.1.3 Gesellschaftliche Entwicklungen

Gesellschaftliche Entwicklungen, wie die Wichtigkeit von Nachhaltigkeit oder Fortschritte bei der Gleichstellung von Mann und Frau, waren Umfeldfaktoren in vier Fallbeispielen.

iPhone: Durch die höhere Wichtigkeit von Datensicherheit in der G_{15} iPhone, 13 Pro/Max & 13 mini & SE 3 entstanden neue Bedarfe an die *Software*, denen Apple mit AV des Subsystems begegnete. Aufgrund der höheren Wichtigkeit von Nachhaltigkeit in der G_{14} 12 Pro/Max & 12 mini ergriff Apple Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz und bewarb diese als zusätzlichen Kunden- und Anwendernutzen. In beiden Fällen wurde der erweiterte Kunden- und Anwendernutzen durch intensive Marketing-Maßnahmen beworben. Daraus wurde H04 (Abbildung 7.5) abgeleitet:

H04 Mitnahme gesellschaftlicher Entwicklungen durch AV

WENN sich durch gesellschaftliche Entwicklungen neue Umfeldfaktoren ergeben, **DANN** können einzelne Subsysteme und Teile des Produktprofils dazu passend variiert werden, **UM** zusätzliches Innovationspotenzial durch Umfeld-Fit zu generieren und dabei Kosten und Risiken gering zu halten.

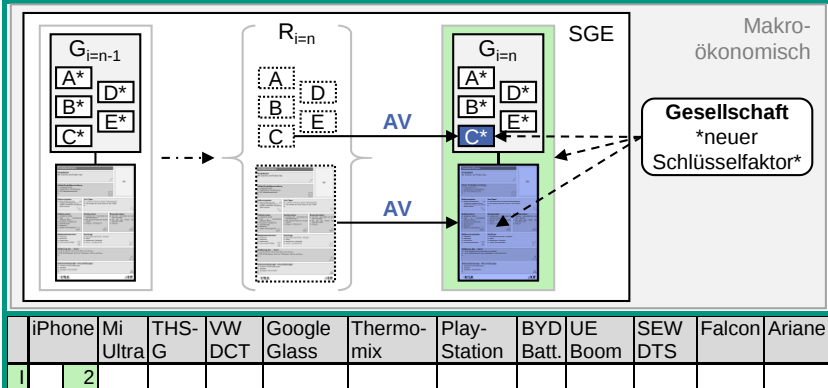


Abbildung 7.5: H04: Mitnahme gesellschaftlicher Entwicklungen durch AV. Die Abbildung zeigt die proaktive Anwendung.

In den Fallstudien **THS-G**, **Thermomix** und **PlayStation**, begünstigte der bereits bestehende Fit der Systemgenerationen und deren Produktprofile zu den gesellschaftlichen Entwicklungen die Nachfrage. Eine gezielte Anpassung ließ sich in diesen Fallbeispielen nicht feststellen. Erkenntnis E01 fasst diese Zusammenhänge zusammen.

E01 Positiver Einfluss gesellschaftlicher Entwicklungen auf die Nachfrage

Gesellschaftliche Entwicklungen können positiven Einfluss auf die Nachfrage nach Systemgenerationen mit passendem Produktprofil haben.

Anwendung: Es kann Innovationspotenzial generiert werden, wenn Produktprofile und technische Systeme gezielt an gesellschaftliche Entwicklungen angepasst werden (vgl. H04).

iPhone	Xiaomi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
		18			4	1	4				

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E01 werden kurz zusammengefasst:

- **THS-G:** Mit der höheren Wichtigkeit von Nachhaltigkeit stieg die Nachfrage nach ressourceneffizienten Fahrzeugen.
- **Thermomix:** Die Nachfrage nach hochpreisigen Küchengeräten stieg mit Fortschritten bei der Gleichstellung von Mann und Frau, der Wichtigkeit von gesunder Ernährung und der Wichtigkeit von Küchen als Statussymbol.
- **PlayStation:** Gaming als Massenphänomen über alle Altersklassen hinweg hatte einen positiven Einfluss auf die Nachfrage nach Spielekonsolen.

7.1.4 Einfluss von Krisen

Krisen wie die Finanzkrise 2008 oder die COVID-19-Pandemie wurden in vier Fallstudien als Umfeldfaktoren identifiziert. In drei Fällen hatten die Krisen, ähnlich wie gesellschaftliche Entwicklungen in E01, positive Auswirkungen auf die Nachfrage und damit den Erfolg. In einem Fall (UE Boom) war die Auswirkung negativ. Dieser Zusammenhang wird in E02 zusammengefasst.

E02 Positiver oder negativer Einfluss von Krisen – je nach Produktprofil											
Krisen können je nach Produktprofil einen positiven oder negativen Einfluss auf die Nachfrage nach Systemgenerationen haben.											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
		5			1	1		2			

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E02 werden kurz zusammengefasst:

- **THS-G:** Durch die Finanzkrise wurden kleinere Fahrzeuge mit geringerem Kraftstoffverbrauch ab 2008 bis Anfang der 2010er Jahre stärker nachgefragt.
- **Thermomix:** Die Nachfrage nach Küchengeräten in der G₈^{Thermomix, TM6} wurde durch Restaurantschließungen und Lockdowns während der COVID-19-Pandemie positiv beeinflusst.
- **PlayStation:** Die Nachfrage der G₅^{PlayStation, 5} wurde durch die Lockdowns in der COVID-19-Pandemie positiv beeinflusst. Dagegen entstand negativer Einfluss auf die Verfügbarkeit von Chips durch die Chipkrise 2020–2023.
- **UE Boom:** Die Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-19-Pandemie hatten einen negativen Einfluss auf die Nachfrage nach Outdoor-Bluetooth-Lautsprechern.

7.2 Mikroökonomische Umfeldfaktoren

Mikroökonomische Umfeldfaktoren beeinflussen die Produktentwicklung direkt. Im Gegensatz zu makroökonomischen Faktoren unterliegen sie einer reziproken Kausalität (vgl. Kapitel 5.1): Unternehmen passen ihre Produktprofile und technischen Systeme an die Veränderungen des mikroökonomischen Umfelds an und wirken gleichzeitig auf ihr Branchenumfeld ein. In der fallübergreifenden Analyse wurden Theoriebausteine induktiv abgeleitet, basierend auf wiederkehrenden mikroökonomischen Umfeldfaktoren, den damit verbundenen Variationen im Produktprofil und im technischen System sowie dem Markterfolg der Systemgenerationen. Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die Theoriebausteine.

Tabelle 7.2: Überblick über die Theoriebausteine zu mikroökonomischen Umfeldfaktoren und deren Anwendung in der Produktentwicklung.

Nr.	Kap.	Beschreibung	Anwendung
E03	7.2.1	Bedarfe wirken auf unterschiedlichen Ebenen der Evolution	Zuordnung von Bedarfen zu den relevanten Entitäten – Produktprofile und technische Systeme auf mehreren Portfolioebenen und Geschäftsmodelle
H05	7.2.2	Auf Kundenkritik unmittelbar mit Neuentwicklung reagieren	Fokus der Neuentwicklungsaufwände auf kundenrelevante Subsysteme
E04	7.2.3	Markteinführung in A) Nische mit niedrigem Wettbewerbsdruck und niedriger Nachfrage vs. B) hohem Wettbewerbsdruck und hoher Nachfrage	Fallunterscheidung insbesondere von $G_{i=1}$ Entwicklungssituationen in A) oder B) und darauf basierend Auswahl geeigneter Heuristiken H06-H10.
H06		Neue Nische als etablierter Anbieter mit wenig PV erschließen	$G_{i=1}$ -Entwicklung für E04 A)
H07		$G_{i=1}$ als etablierter Anbieter in umkämpfter Nische platzieren	$G_{i=1}$ -Entwicklung für E04 B)
H08		$G_{i=1}$ als Start-up in bestehender, aber wenig umkämpfter Nische platzieren	$G_{i=1}$ -Entwicklung spezifisch für Start-ups
H09		Niedrigen Wettbewerbsdruck der frühen Generationen für AV/PV nutzen	E04 A) in folgenden Systemgenerationen nutzen und Wettbewerbsposition ausbauen
H10		In der Nische bei steigendem Wettbewerbsdruck bestehen	Übergang von E04 A) zu E04 B)

H	Heuristik	H	Einzelfall-Heuristik	E	Weitere Erkenntnis
----------	-----------	----------	----------------------	----------	--------------------

Ähnlich zum makroökonomischen Umfeld werden zentrale Zusammenhänge zwischen SGE und mikroökonomischem Umfeld, beispielsweise der Einfluss von Wettbewerbsprodukten, im Beschreibungsmodell über Referenzsystemelemente abgebildet (siehe Kapitel 7.6).

7.2.1 Kunden- und Anwenderbedarfe

Wie in der Analogiebildung und Entwicklung des Beschreibungsmodells in Kapitel 5.1 bereits diskutiert, sind Kunden- und Anwenderbedarfe und die dazu passende Entwicklung von Produktprofilen und technischen Systemen einer der Grundzusammenhänge der Evolution technischer Systeme. Dieser wurde dementsprechend auch schon in vielen Arbeiten untersucht, wie beispielsweise von Kubin (2025) hinsichtlich der Spezifizierung von Zielen und Anforderungen für Produkte und von Schlegel et al. (2025) hinsichtlich der bedarfsorientierten Weiterentwicklung aller Ebenen des Produktportfolios. Im Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme werden Kunden- und Anwenderbedarfe vereinfacht im Produktprofil abgebildet, dessen Entwicklung in Kapitel 7.4 detailliert untersucht wird. Darüber hinaus waren die einzelnen Kunden- und Anwenderbedarfe in den Fallstudien so spezifisch, dass wenig fallübergreifende Erkenntnisse für spezifische Bedarfe abgeleitet werden konnten.

In den Fallstudien betrafen neue Bedarfe teilweise einzelne Subsysteme, übergreifend das Produktprofil und das technische System oder auch das Geschäftsmodell im unternehmensinternen Umfeld. Dieser Zusammenhang wird in E03 (Abbildung 7.6) dargestellt. Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E03 werden kurz zusammengefasst:

- **iPhone:** Ein Beispiel für einen Bedarf, der ein einzelnes Subsystem betraf, war der seit der G₆^{iPhone, 5} anhaltende Bedarf nach Smartphones mit größeren Displays. Eine weitreichendere Auswirkung hatte der Bedarf nach Individualisierung, dem durch die Entwicklung weiterer Produktvarianten ab der G₇^{iPhone, 5s & 5c} begegnet wurde.
- Ein Bedarf, der in mehreren Fallbeispielen (**Thermomix, iPhone, PlayStation**) gleichermaßen aufkam, war der Bedarf nach einer Plattform mit anderen Nutzern und Anbietern. Dieser ging in allen drei Fällen mit einer PV des Produktprofils und einer Weiterentwicklung des Geschäftsmodells einher.

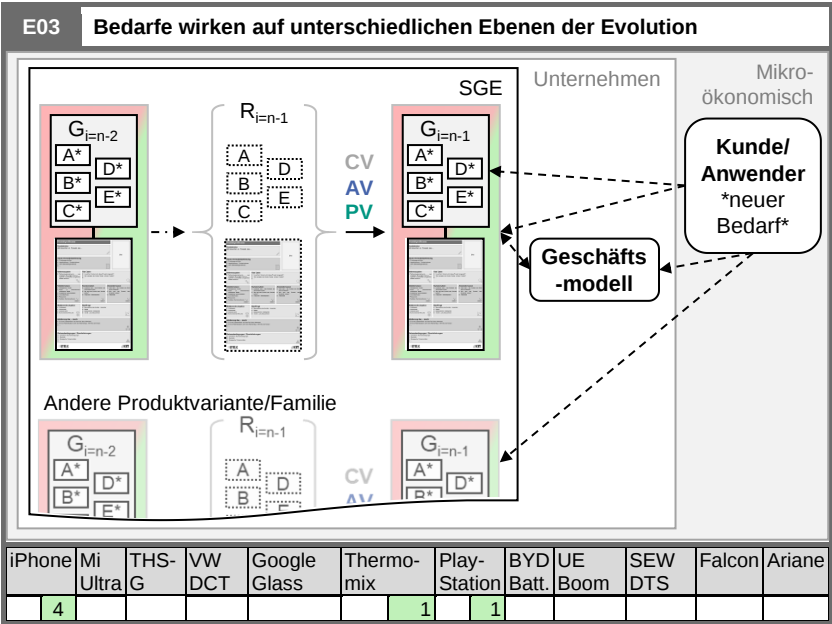


Abbildung 7.6: E03: Bedarfe wirken auf unterschiedlichen Ebenen der Evolution.

7.2.2 Kunden- und Anwenderkritik

Kritik von Kunden- und Anwendern an Subsystemen der Vorgängergeneration drückte unerfüllte oder nicht ausreichend erfüllte Bedarfe aus und kann wiederum selbst als Bedarf verstanden werden. In neun Systemgenerationen verteilt über vier Fallbeispiele wurde Kritik an der Vorgängergeneration als Umfeldfaktor identifiziert. Den Fallstudien könnten mit der in dieser Arbeit verwendeten Forschungsmethode noch viele weitere Kritikpunkte hinzugefügt werden. Ein vielversprechender Ansatz ist die KI-unterstützte Analyse von Online-Kundenreviews (Albers, Pfaff, Braumandl et al., 2025). Generell sollte sowohl bei Bedarfen als auch bei Kritik differenziert zwischen Kunden und Anwendern unterschieden werden, da auch zwischen Kunden- und Anwendern Zielkonflikte vorliegen können (siehe Kapitel 7.4) (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). In sieben der neun Systemgenerationen wurde erfolgreich mit Neuentwicklung der kritisierten Subsysteme reagiert, woraus H05 in Abbildung 7.7 abgeleitet wurde. Eine nicht erfolgreiche Systemgeneration und eine

trotz Nichtanwendung von H05 erfolgreiche Systemgeneration sprechen eingeschränkt gegen H05.

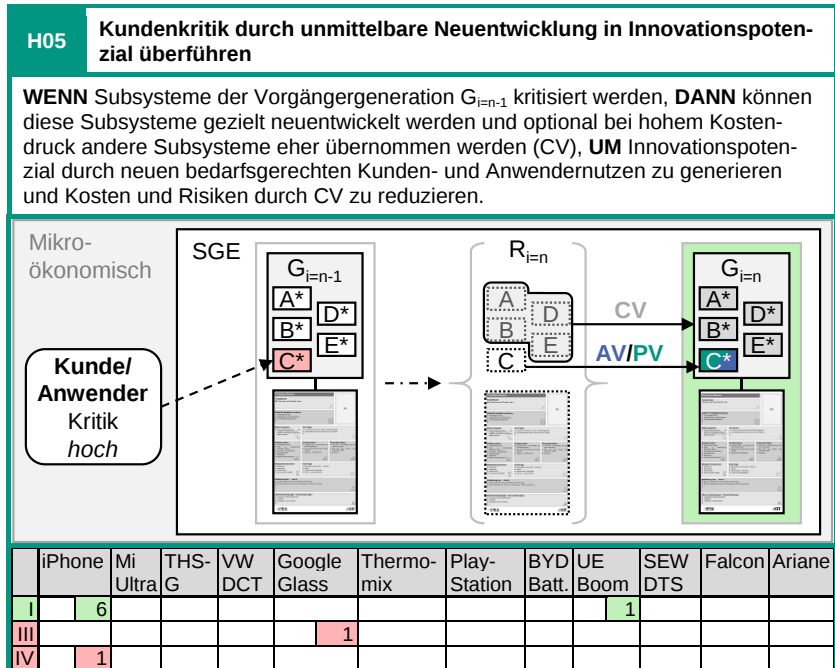


Abbildung 7.7: H05: Auf Kundenkritik unmittelbar mit Neuentwicklung reagieren.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H05 werden kurz zusammengefasst:

- iPhone:** In der $G_2^{\text{iPhone, 3G}}$ reagierte Apple auf Kritik an der *Software* bezüglich fehlender Funktionen für den Einsatz in Unternehmen und dem fehlenden GPS-Sensor mit PV in beiden Subsystemen. In weiteren Systemgenerationen wurde ebenfalls mit direkter Neuentwicklung reagiert: $G_3^{\text{iPhone, 3GS}}$ (fehlende Orientierungsmöglichkeit in der Karten-App → PV Gyrosensor), $G_5^{\text{iPhone, 4S}}$ (Empfangsprobleme → AV redundante Antenne in Netzwerk und Konnektivität), $G_9^{\text{iPhone, 6S/Plus}}$ (instabile Gehäuse „Bendgate“ → AV 7000er statt 6000er Aluminiumlegierung für das Gehäuse), $G_{11}^{\text{iPhone, X}}$ (Kritik am Wegfall des haptischen Homebuttons → Gesichtserkennung und Gestensteuerung, PV physische Bedienelemente, Sensoren, Software) und der $G_{15}^{\text{iPhone, 13 Pro/Max \& 13/mini \& SE 3}}$ (niedrige Batterielaufzeit → effizientere CPU, AV ausgehend von internem RSE). Bei der $G_{11}^{\text{iPhone, 8/Plus}}$ wurde dagegen weder auf die Kritik am geänderten Homebutton noch am Wegfall der 3,5 mm

Klinke reagiert. Trotzdem war die Systemgeneration erfolgreich. Apple nahm hier kurzfristige Unzufriedenheit in Kauf, um längerfristig ein neues Bedien- und Schnittstellenkonzept zu etablieren.

- **UE Boom:** In der $G_1^{\text{UE Boom, Wonderboom 1}}$ wurde die mit der $G_1^{\text{UE Boom, Megaboom 1}}$ durch einen Beschleunigungssensor eingeführte Klopffunktion der *Bedienschnittstelle* wieder entfernt. Grund dafür war, dass Kunden die Funktion als nicht intuitiv kritisierten und selten nutzten.
- **Google Glass:** Die $G_2^{\text{Google Glass, Explorer Ed. 2}}$ war trotz der PV des *Rahmens*, um diesen für Brillengläser mit Sehstärke oder UV-Filtern tauglich zu machen, nicht erfolgreich. Der negative Einfluss des schwachen Produktprofils wirkte offenbar stärker auf den Markterfolg als die positive Wirkung des beseitigten Kritikpunkts.

7.2.3 Nischenkonstruktion und $G_{i=1}$ -Entwicklung

In den Fallbeispielen wurde die Wettbewerbssituation über die qualitative Höhe des Wettbewerbsdrucks als Teil des Innovationsdrucks betrachtet. Als weiterer mikroökonomischer Umfeldfaktor wurde qualitativ die Höhe der Nachfrage herangezogen. Das Produktprofil beschreibt unter anderem, wie sich technische Systeme und deren Nutzen vom Wettbewerb differenzieren. In den Fallbeispielen konnten mithilfe von Zusammenhängen zwischen Wettbewerbsdruck, Nachfrage und der Entwicklung von Produktprofil und technischem System Parallelen zur Nischenkonstruktion der EES (vgl. Kapitel 2.3.2) festgestellt werden, bei der Organismen aktiv ihre Umwelt verändern und so die evolutionären Bedingungen für sich selbst und andere Arten beeinflussen. Der Nischenbegriff in dieser Arbeit ist breiter als der Nischenbegriff der klassischen Ökonomie („Marktnische“), der ein durch spezifische Bedarfe abgegrenztes Marktsegment eines Gesamtmarktes beschreibt (Pindyck & Rubinfeld, 2018). In dieser Arbeit soll eine Nische angelehnt an das Verständnis in der Biologie als Gesamtheit der Umweltbedingungen bzw. Umfeldfaktoren verstanden werden (Laland et al., 2015).

Situation im mikroökonomischen Umfeld bei $G_{i=1}$ -Entwicklung

Es wurde fallübergreifend untersucht, wie technische Systeme, ausgehend von der ersten Systemgeneration $G_{i=1}$, ihre Nische konstruierten. Dabei konnten die Fallstudien, in denen eine $G_{i=1}$ -Entwicklung analysiert wurde, in zwei Kategorien unterschieden werden, die in E04 (Abbildung 7.8) zusammengefasst werden.

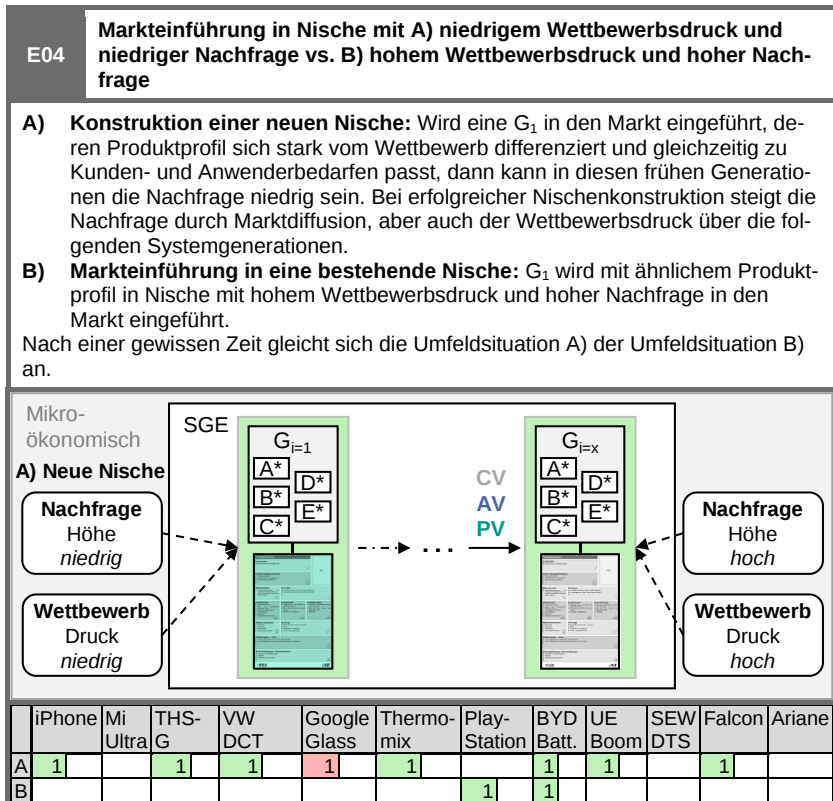


Abbildung 7.8: E04: Markteinführung in Nische mit hohem Wettbewerbsdruck und hoher Nachfrage vs. niedrigem Wettbewerbsdruck und niedriger Nachfrage. Die Abbildung zeigt Kategorie A, Referenzsysteme wurden nicht abgebildet.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E04 werden kurz zusammengefasst:

- iPhone:** Apple führte die $G_1^{\text{iPhone, iPhone}}$ 2007 in einen bereits gesättigten Mobiltelefonmarkt ein. Wettbewerber waren zuvor mit der Einführung ihrer „Smartphones“ gescheitert. Die $G_1^{\text{iPhone, iPhone}}$ wurde mit PV des Produktprofils und einem hohen Neuentwicklungsanteil entwickelt – dieses Konzept musste sich erst am Markt durchsetzen und eine neue Nische konstruieren. In der $G_2^{\text{iPhone, 3G}}$ wurden Produktprofil und Geschäftsmodell hin zu einer offenen Plattform stark angepasst (PV), was in der sich erst noch entwickelnden Nische unter niedrigem Wettbewerbsdruck möglich war. Über externe RSE wurden die Differenzierungsmerkmale der Wettbewerber (z. B. Kamera) angegriffen.

Spätestens ab der $G_4^{\text{iPhone, 4}}$ hatte sich ein hochkompetitiver Wettbewerb ausgebildet.

- **THS-G:** Mit der $G_1^{\text{THS-G, Komp, P110}}$ führte Toyota mit einem leistungsverzweigten Hybridantriebsstrang für den ersten selbstladenden Hybrid ein neues Produktprofil und ein technisches System mit hohem Neuentwicklungsanteil in den Markt ein und konstruierte so eine neue Nische. Bereits ab der $G_2^{\text{THS-G, Komp, P111}}$ sah sich Toyota in Konkurrenz mit Hybridkonzepten anderer Hersteller, steigerte den CV-Anteil und expandierte geografisch in neue Märkte.
- **VW DCT:** Die $G_1^{\text{VW DCT, MT, DQ250}}$ und das zugehörige Produktprofil eröffneten ebenfalls eine neue Nische und steigerten Akzeptanz und Nachfrage von Automatikgetrieben in Westeuropa. Die trockene Doppelkupplung der $G_1^{\text{VW DCT, LT, DQ200}}$ diente vielen anderen Getriebeherstellern als RSE (Kimmig et al., 2010, 154 f.). Darüber hinaus beeinflusste das VW DCT die gesamte Automatikgetriebeentwicklung auch bei anderen Herstellern maßgeblich (Naunheimer et al., 2019, S. 26).
- **Google Glass:** Die ersten beiden Generationen der Google Glass sind ein Beispiel für gescheiterte Nischenkonstruktion, in der mit neuem Produktprofil und technischem System keine Nachfrage und kein direkter Wettbewerb aufkam. Mit der Produktprofil-PV in der $G_3^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ zielte Google dagegen auf eine bereits besetzte Nische und war kurzfristig erfolgreich.
- **Thermomix:** Mit der $G_1^{\text{Thermomix, VM2000}}$ konstruierte Vorwerk durch ein sich klar differenzierendes Produktprofil und einen hohen Neuentwicklungsanteil eine Nische für hochintegrierte Küchenmaschinen, die lange unbesetzt blieb. Dies änderte sich in den 2010er Jahren während der Time-in-Market der $G_6^{\text{Thermomix, TM31}}$. Vorwerk reagierte mit PV in Produktprofil und technischem System hin zu einer vernetzten Küchenmaschine mit digitaler Plattform und passte die Patentstrategie zu stärkerem Schutz an.
- **PlayStation:** Mit der $G_1^{\text{PlayStation, PS1}}$ trat Sony in den bereits hochumkämpften Spielekonsolenmarkt ein. Dadurch konnte Sony RSE aus direkten Wettbewerbsprodukten nutzen. Zentral im Produktprofil war die Kostenführerschaft und 3D-Gaming als starke Differenzierung gegenüber dem Wettbewerb.
- **BYD Batterie:** Die BYD Batterie lässt sich in beide Kategorien einordnen. Auf den chinesischen Wettbewerb bezogen, in dem vor der $G_4^{\text{BYD Batterie, qinpro}}$ wenig Wettbewerber aktiv waren, lässt sich der Fall in Kategorie A einordnen. Auf den globalen Wettbewerb (vgl. Fallstudie THS-G) bezogen in Kategorie B. Die Entwicklung der Nachfrage war an die Entwicklung der Infrastruktur (vgl. H01) und der produktbezogenen rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen (vgl. H02) gekoppelt. BYD bewies einen „langen Atem“ und entwickelte sein Batteriesystem zu Beginn der Nischenkonstruktion unter niedriger Nachfrage und niedrigem Wettbewerbsdruck mit hohem Neuentwicklungsanteil weiter.

- **UE Boom:** Mit der $G_1^{\text{UE Boom, Boom 1}}$ konstruierte Logitech eine Nische für Outdoor-Bluetooth-Lautsprecher und führte in den folgenden Systemgenerationen mit wenig PV weitere Produktvarianten ein.
- **Falcon:** Mit der $G_1^{\text{SpaceX, Falcon 1}}$ trat SpaceX in einen bestehenden, aber zum Zeitpunkt des Markteintritts wenig umkämpften Markt mit niedriger Nachfrage ein, was eine Mischform von Kategorie A) und B) entspricht. SpaceX setzte mit Wiederverwendbarkeit und Kostenführerschaft auf PV im Produktprofil und früh viel Neuentwicklung im technischen System. Mit der $G_3^{\text{SpaceX, Falcon 9 v1.1}}$ stiegen der Wettbewerbsdruck und die Nachfrage. Durch Skalierung (AV), erhöhten CV-Anteil und weiterhin gezielte PV baute SpaceX seine Position aus und erschloss neue Marktsegmente.

Neue Nische mit G_1 erschließen

Aus den Fallstudien wurden Heuristiken für die Entwicklung von $G_{i=1}$ je nach Situation im mikroökonomischen Umfeld abgeleitet. In den Fallstudien **THS-G** und **BYD Batterie** gab es zudem makroökonomische rechtliche und politische Rahmenbedingungen, die die Entwicklung der $G_{i=1}$ begünstigten. In H06 (Abbildung 7.9) werden die Erkenntnisse zu den sechs Fällen zusammengefasst, in denen etablierte Anbieter mit Zugang zu vielen internen RSE erfolgreich neue Nischen konstruiert haben. Die $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ war als G_1 nicht erfolgreich, diente aber für die folgenden erfolgreichen Systemgenerationen als Referenz und spricht daher nur eingeschränkt gegen die Heuristik. Die $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ ist ein Beispiel für gescheiterte Nischenkonstruktion.

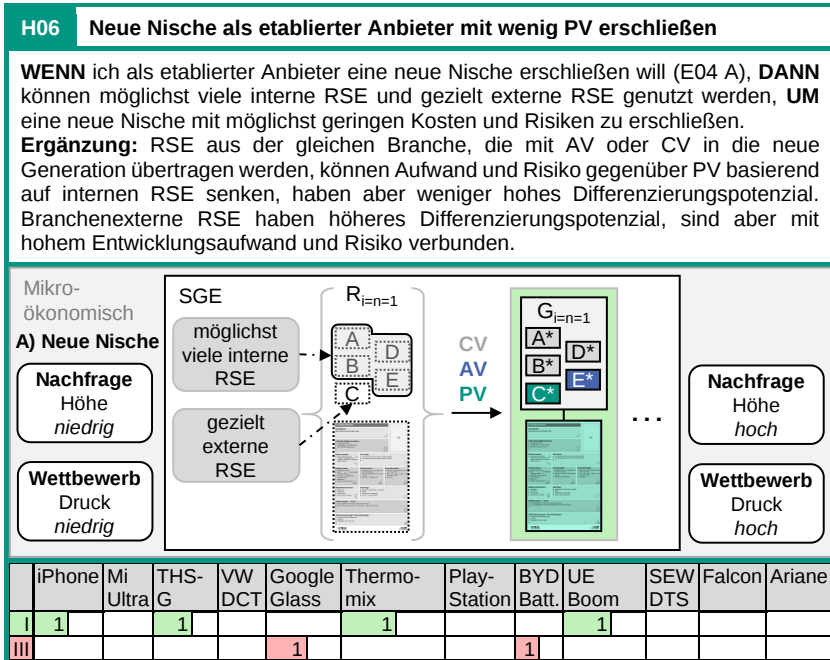


Abbildung 7.9: H06: Neue Nische als etablierter Anbieter mit wenig PV erschließen. Die Einflusspfeile der Umfeldfaktoren wurden nicht abgebildet.

Die G_1 PlayStation, PS1 wurde durch einen etablierten Anbieter in eine bereits hochumkämpfte Nische eingeführt (E04, B). Da es sich um den einzigen derartigen Fall handelte, ließ sich lediglich eine Einzelfall-Heuristik ableiten.

H07 G_1 als etablierter Anbieter in umkämpfter Nische platzieren

WENN ich als etablierter Anbieter eine $G_{i=n=1}$ in eine bestehende, bereits umkämpfte Nische einführen will (E04, B), **DANN** kann

- klare Differenzierung über PV zu Produktprofilen von Wettbewerbern (Kosten und/oder Nutzenführerschaft)
- und Nutzung von möglichst vielen internen RSE und best-in-class RSE aus dem Wettbewerb zielführend sein,

UM hohes Innovationspotenzial durch ein in der Nische führendes Produktprofil mit geringen Kosten und Risiken zu realisieren.

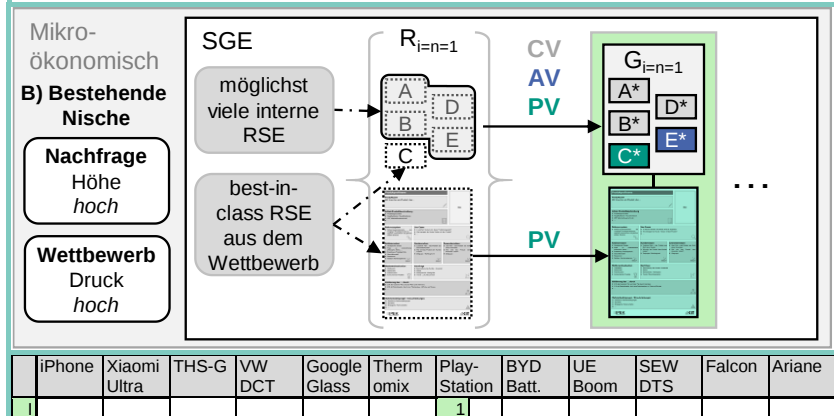


Abbildung 7.10: H07: G_1 als etablierter Anbieter in umkämpfter Nische platzieren. Die Einfluss-Pfeile der Umfeldfaktoren wurden nicht abgebildet.

Die $G_1^{\text{SpaceX, Falcon 1}}$ stellt im Datensatz ebenfalls einen Einzelfall dar, der aber potenziell auf weitere Start-ups übertragbar ist. SpaceX hatte als Start-up keine anderen etablierten internen technischen Systeme als RSE zur Verfügung und baute die Entwicklung daher auf RSE aus dem Wettbewerb und Branchenstandards auf. Daraus wurde H08 (Abbildung 7.11) abgeleitet. In einer früheren Studie des Autors wurde dieses Phänomen bei weiteren Start-Ups beobachtet (Pfaff, Kubisch et al., 2021).

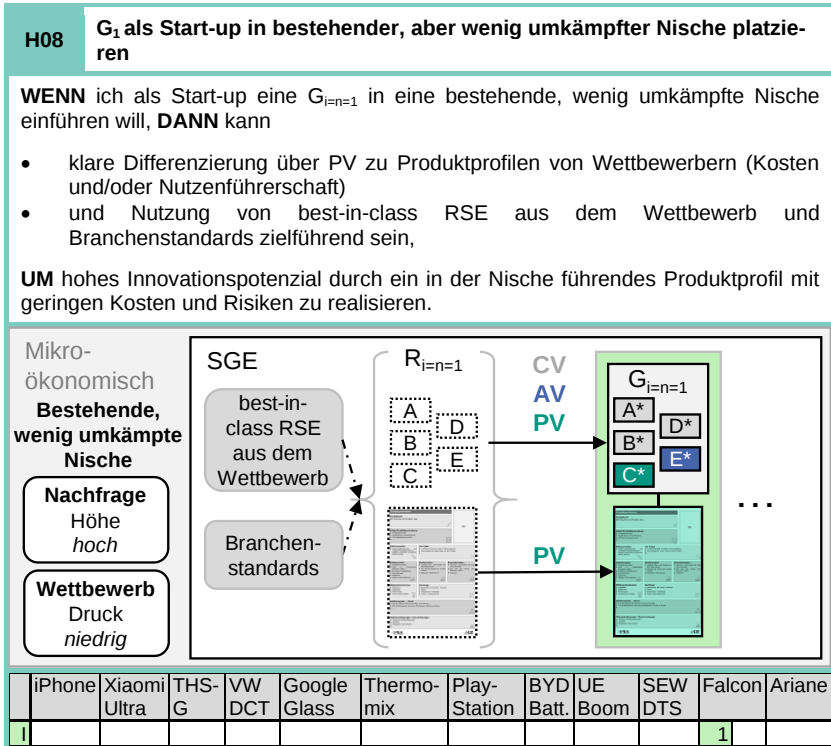


Abbildung 7.11: H08: G_1 als Start-up in bestehender, aber wenig umkämpfter Nische platzieren.

Fortschreitende Nischenkonstruktion

Durch Erweiterung des Analysefokus von den G_1 auf die darauffolgenden frühen Systemgenerationen konnten zwei weitere Zusammenhänge identifiziert werden. Die frühen Systemgenerationen zeigten ein exploratives Verhalten (vgl. Dominant Design, Kapitel 2.4.1) mit relativ hohen Neuentwicklungsanteilen, solange der Wettbewerbsdruck niedrig blieb und die Nachfrage stieg. H09 (Abbildung 7.12) fasst diese Erkenntnis zusammen.

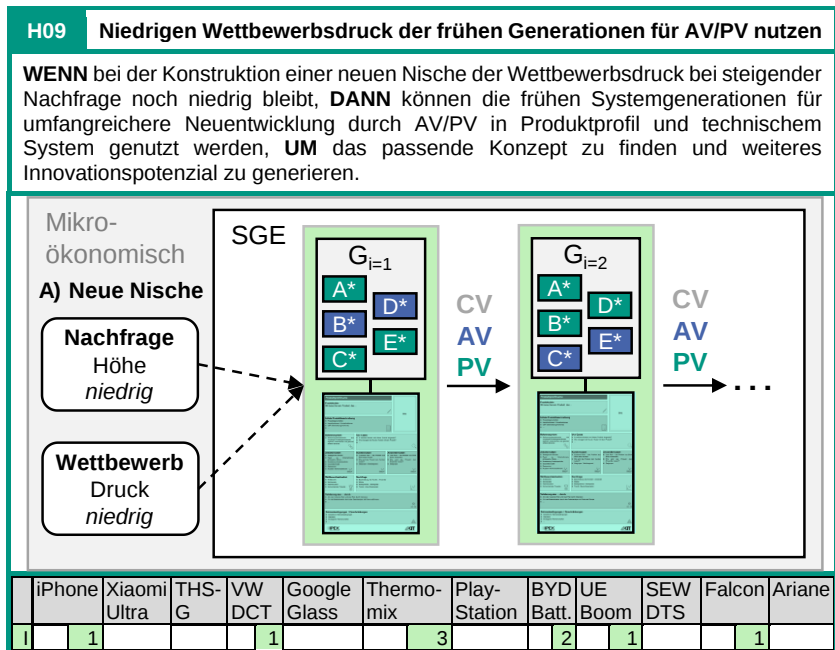


Abbildung 7.12: H09: Niedrigen Wettbewerbsdruck der frühen Generationen für AV/PV nutzen.

Auch nach dem Kipppunkt von niedrigem zu hohem Wettbewerbsdruck zeigten sich Gemeinsamkeiten in den Fallstudien, die in H10 (Abbildung 7.13) zusammengefasst werden.

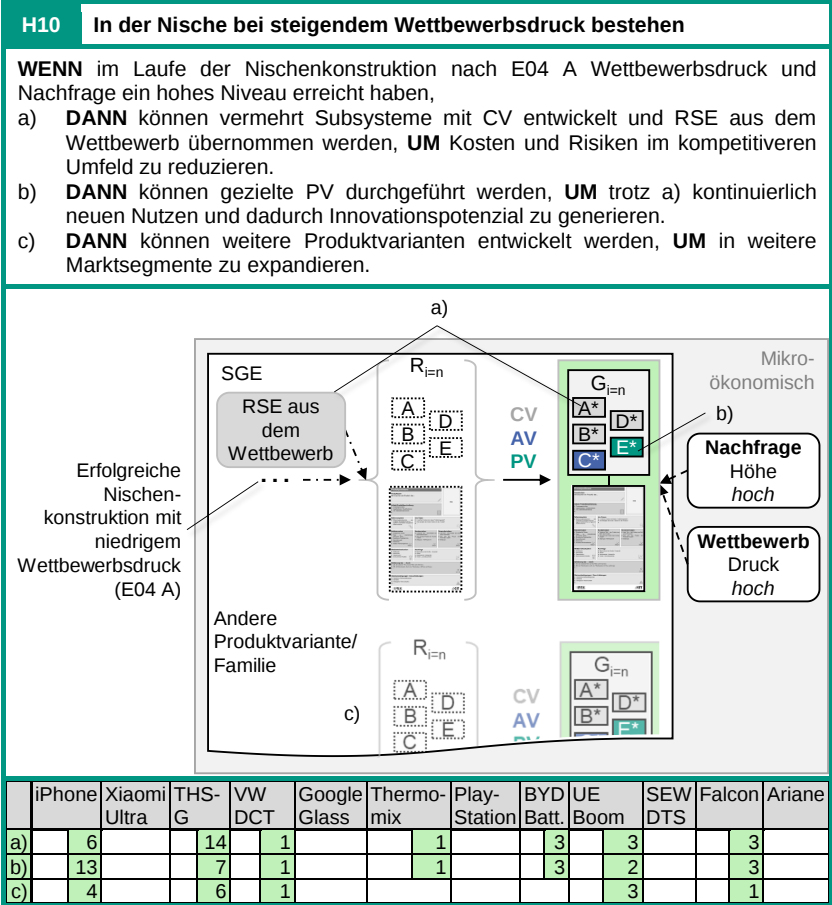


Abbildung 7.13: H10: In der Nischenkonstruktion bei steigendem Wettbewerb bestehen

7.3 Unternehmensinterne Umfeldfaktoren

Unternehmensinterne Umfeldfaktoren bilden den unmittelbaren Handlungsrahmen für die Produktentwicklung und sind direkt durch das Unternehmen beeinflussbar. Obwohl das unternehmensinterne Umfeld nicht im Fokus der Fallstudien stand, wurden Umfeldfaktoren, sofern sie im Rahmen der Analyse auftraten, dennoch berücksichtigt. Für eine gezielte Erhebung unternehmensinterner Umfeldfaktoren müsste die Unternehmensperspektive in der Forschungsmethode für die Fallstudien (vgl. Kapitel 4.2.1) stärker berücksichtigt werden. In der fallübergreifenden Analyse wurden Theoriebausteine induktiv abgeleitet, basierend auf wiederkehrenden internen Einflussfaktoren, den damit verbundenen Variationen im Produktprofil und im technischen System sowie dem jeweiligen Markterfolg der betrachteten Systemgenerationen. Eine Übersicht dieser Theoriebausteine ist in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3: Überblick über die Theoriebausteine zu unternehmensinternen Umfeldfaktoren und deren Anwendung in der Produktentwicklung.

	Kap.	Beschreibung	Anwendung
E05	7.3.1	Erfolgsfaktoren für frühe Hoch-PV-Systemgenerationen	Hoch-PV Projekte planen
E06	7.3.2	Abstimmung von SGE und Marketing-Maßnahmen	Schnittstelle Marketing/Produktentwicklung
E07	7.3.3	Entwicklung von Geschäftsmodellen in Generationen	Abstimmung der Entwicklung des Geschäftsmodells , des Produktprofils und des technischen Systems
H11		PV des Geschäftsmodells tritt gemeinsam mit PV des Produktprofils und des technischen Systems auf	
H12	7.3.4	Einführungsstrategien für Standardisierungsmethoden – A) neuen Standard setzen vs. B) evolutionäre Einführung	Gestaltung der Einführung von Standardisierungsmethoden durch gezielte Wahl der Einführungsstrategie (H12 A/B) und realistischer Erwartungshaltung zur Entwicklung der Variationsanteile (E08, E09)
E08		Standardisierung zahlt sich frühestens eine Generation nach der Einführung aus	
E09		Entwicklung von Variationsanteilen nach der Einführung von Standardisierungsmethoden	

H	Heuristik	E	Weitere Erkenntnis
----------	-----------	----------	--------------------

Wie auch schon in den Kapiteln zu makro- und mikroökonomischen Einflussfaktoren werden einige zentrale Zusammenhänge der SGE zum unternehmensinternen Umfeld über Referenzsystemelemente abgebildet und in Kapitel 7.6 detaillierter analysiert.

7.3.1 Entwicklung mit hohem Neuentwicklungsanteil unterstützen

Die Entwicklung von Systemgenerationen mit hohem Neuentwicklungsanteil, insbesondere von $G_{i=1}$, wurde in drei Fallbeispielen durch interne Umfeldfaktoren unterstützt, was in Erkenntnis E05 zusammengefasst wird.

E05 Erfolgsfaktoren für frühe Hoch-PV-Systemgenerationen											
Die Entwicklung von frühen Systemgenerationen mit hohem Neuentwicklungsanteil (Hoch-PV-Systemgenerationen, siehe Kapitel 7.5.2) kann durch Agilität, vertikale Integration und ein Bekenntnis der Unternehmensführung zu neuen Lösungen sowie das Bereitstellen der dafür notwendigen Ressourcen unterstützt werden.											
iPhone	Xiaomi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
		1		1						1	4

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E05 werden kurz zusammengefasst:

- **THS-G:** Toyota setzte bei der Entwicklung neuer Hybridkonzepte für die $G_1^{\text{THS-G, Komp, P110}}$ auf interdisziplinär, agil und eigenverantwortlich arbeitende Projektteams.
- **Falcon:** SpaceX entwickelte die ersten Systemgenerationen mit vielen und schnellen Iterationen und konnte so beispielsweise ein neuartiges Reuse-Konzept etablieren. Sowohl Toyota als auch SpaceX zeichneten sich zudem durch einen hohen Grad an vertikaler Integration und das Bekenntnis der Unternehmensführung zu neuen Lösungen aus.
- **Google Glass:** Auch die Entwicklung der $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ zeigte die genannten Erfolgsfaktoren, konnte mit der Invention allerdings keinen Markterfolg erzielen.

7.3.2 Abstimmung von SGE und Marketing-Maßnahmen

Im Fallbeispiel iPhone gab es Wechselwirkungen zwischen Marketing-Maßnahmen¹ und Variationsentscheidungen für und gegen PV. Dieser Zusammenhang wird in E06 (Abbildung 7.14) zusammengefasst.

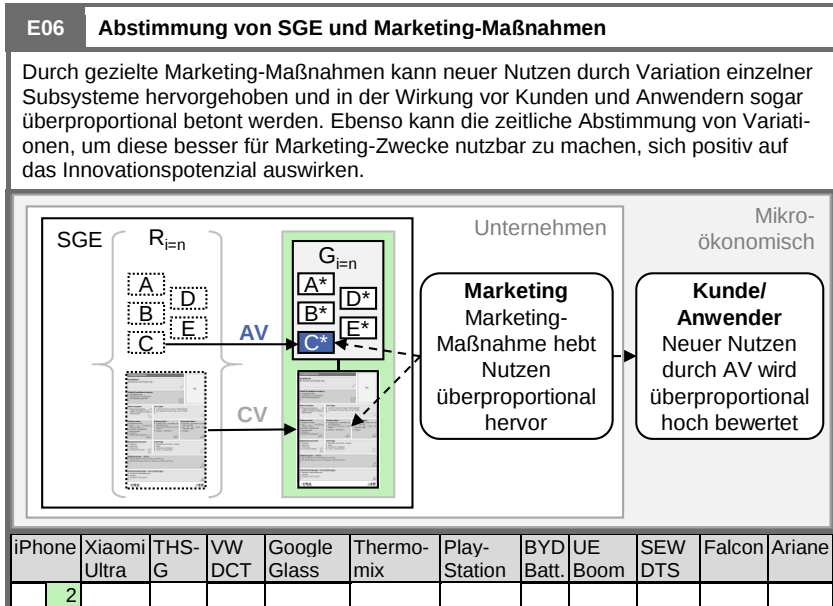


Abbildung 7.14: E06: Abstimmung von SGE und Marketing-Maßnahmen.

iPhone: Die Kamera der $G_{7}^{\text{iPhone, 5s}}$ wies kein neues Lösungsprinzip durch PV oder linienexterne RSE auf, wurde im Rahmen einer Modenschau der Luxus-Modemarke Burberry aber trotzdem als große Neuheit beworben (Apple Inc., 2013). Apple entschied sich bewusst gegen eine PV beim Gehäusedesign in der $G_{10}^{\text{iPhone, 7/Plus}}$ im bis dahin gehaltenen Zweijahrestakt, um diese mit der Markteinführung des

¹ Hier geht es insbesondere um Marketing-Maßnahmen, die die Kommunikation betreffen. Nach Kotler et al. (2017) gehören neben der Kommunikationspolitik auch Produkt-, Preis- und Vertriebspolitik zum Marketing-Mix.

G₁₁^{iPhone, X} zum 10-jährigen Jubiläum des Produkts besser für Marketing-Zwecke nutzen zu können (Hruska, 2016; Snell, 2016; Wolf, 2017).

7.3.3 Geschäftsmodellentwicklung und SGE

Parallel zur Durchführung der fallübergreifenden Analyse dieser Arbeit wurde von Albers, Hahn et al. (2025) unter Mitarbeit des Autors eine Definition für digitale Plattform-Geschäftsmodelle im Kontext der SGE erarbeitet und dabei festgestellt, dass die Weiterentwicklung von Geschäftsmodellen, ähnlich der Evolution technischer Systeme, in Generationen beschrieben werden kann. In der fallübergreifenden Analyse in dieser Arbeit konnte dieses Phänomen in vier Fallstudien (**iPhone**, **Google Glass**, **Thermomix**, **PlayStation**) festgestellt werden, wobei Geschäftsmodelle im unternehmensinternen Umfeld berücksichtigt wurden.

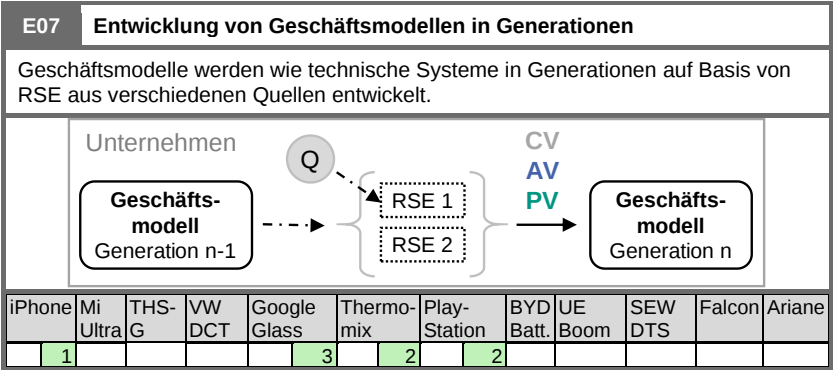


Abbildung 7.15: E07: Entwicklung von Geschäftsmodellen in Generationen.

In den Fallbeispielen iPhone, Google Glass, Thermomix und PlayStation wurde das Geschäftsmodell jeweils einmal grundlegend weiterentwickelt. In allen vier Fällen wurde dabei auch das Produktprofil und das technische System mit PV weiterentwickelt, was in H11 in Abbildung 7.16 zusammengefasst wird.

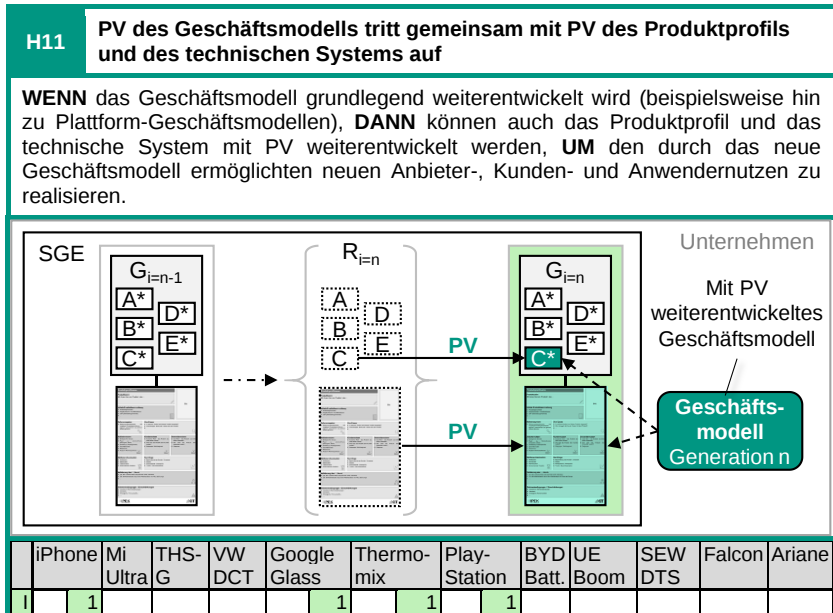


Abbildung 7.16: H11: PV des Geschäftsmodells tritt gemeinsam mit PV des Produktprofils und des technischen Systems auf

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E07 und H11 werden kurz zusammengefasst:

- **iPhone:** In der $G_2^{\text{iPhone, 3G}}$ wurde das zuvor geschlossene Ökosystem zu einem für Partner offenen Plattform-Geschäftsmodell weiterentwickelt, was neuen Kundennutzen durch Apps von Drittanbietern schaffte. Die *Software* musste für die Integration eines App Store und einer offenen Softwareschnittstelle grundlegend weiterentwickelt werden (PV).
- **Thermomix:** In der $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$ wurde ein Plattform-Geschäftsmodell mit Online-Rezeptabos eingeführt, wofür im technischen System mit der *Anbindung zur Online-Kochplattform* ein neues Subsystem hinzugefügt wurde. 2019 führte Vorwerk mit dem $G_8^{\text{Thermomix, TM6}}$ einen Online-Shop als parallelen Vertriebskanal zum Direktvertrieb ein, der bereits 2011 für eine andere Produktlinie, den Kobold Staubsauger, eingeführt wurde (Gärtner & Heinrich, 2018).
- **PlayStation:** Ähnlich der $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$ wurde in der $G_3^{\text{PlayStation, PS3}}$ ein Plattform-Geschäftsmodell eingeführt und damit einhergehend die *I/O-Schnittstelle* um WLAN erweitert.

Google Glass: Im Geschäftsmodell der Google Glass wurden neben dem Wechsel der Kundengruppe von Privatkunden auf Unternehmen in der $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$ auch der Vertriebskanal mehrfach von Fokuskunden als Beta-Testern in der $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ zu direktem Online-Vertrieb in der $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ 2 wieder hin zu Fokuskunden in der $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$ und in der $G_4^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$ 2 zum Vertrieb über Vertriebspartner geändert.

7.3.4 Standardisierung

Im Rahmen dieser Arbeit wird Standardisierung zum einen als Umfeldfaktor im unternehmensinternen Umfeld betrachtet, der die übergreifende Zielsetzung für die Produktentwicklung widerspiegelt, bei geringen Produktkosten durch niedrige interne Variantenvielfalt den Kunden eine hohe äußere Variantenvielfalt in Form von Produktvarianten anbieten zu können. Zum anderen wird die Umsetzung von Standardisierungsmethoden (vgl. Kapitel 2.2.1) im technischen System untersucht. Standardisierung war in vier Fallstudien ein Umfeldfaktor:

- **THS-G:** Toyota führte in der $G_5^{\text{THS-G, Komp, P610}}$ mit der TNGA eine standardisierte Getriebearchitektur ein, die als offener, strukturgebundener **Baukasten** verstanden werden kann und insbesondere auf **Modul-** und **Baureihen-**Bauweise setzt.
- **SEW DTS:** SEW nutzte die $G_2^{\text{SEW DTS}}$ als Grundlage für die Definition eines **Baukasten-**Regelwerks mit einheitlichen Schnittstellen und **wiederverwendbaren Modulen**.
- **Falcon:** SpaceX entwickelte seine Launcher ab der $G_2^{\text{SpaceX, Falcon 9 v1.0}}$ in **Modulbauweise** mit dem Ziel, mit möglichst viel CV auch Launcher mit höherer Nutzlast zu konfigurieren, was mit der $G_5^{\text{SpaceX, Falcon Heavy}}$ gelang.
- **Ariane:** Die Subsysteme der Systemgenerationen $G_5^{\text{Ariane, 5G}}$ bis $G_9^{\text{Ariane, 5ES}}$ sind untereinander kompatibel, also ebenfalls durch ein **Baukasten-**Regelwerk mit einheitlichen Schnittstellen und wiederverwendbaren **Modulen** standardisiert.

Strategien zur Einführung von Standardisierungsmethoden

Bei der Einführung von Standardisierungsmethoden konnten zwei erfolgreiche Einführungsstrategien unterschieden werden, die in H12 (Abbildung 7.17) zusammengefasst werden. Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H12 werden kurz zusammengefasst:

- **THS-G, Falcon, Ariane:** Die $G_5^{\text{THS-G, Komp, P610}}$, $G_2^{\text{SpaceX, Falcon 9 v1.0}}$ und $G_5^{\text{Ariane, 5G}}$ waren Systemgenerationen mit relativ hohem Neuentwicklungsanteil (Hoch-ND-Systemgenerationen, siehe Kapitel 7.5.2). In diesen Systemgenerationen

wurden viele Subsysteme neuentwickelt und dienten als Grundlage für die folgenden, nach Standardisierungsmethoden entwickelten Generationen.

- **SEW DTS:** In der Evolution des SEW DTS bildeten sich bereits vor der $G_{2}^{\text{SEW DTS}}$, mit der weitreichende Standardisierungsmethoden eingeführt wurden, Subsysteme aus, die als Module deklariert und wiederverwendet wurden.

H12

Einführungsstrategien für Standardisierungsmethoden – A) neuen Standard setzen vs. B) evolutionäre Einführung

WENN Standardisierungsmethoden umgesetzt werden sollen,

- A) Neuen Standard setzen:** DANN sollten mit einer Systemgeneration mit ggf. hohem Neuentwicklungsanteil (Hoch-ND Systemgeneration, vgl. Kapitel 7.5.2) Standards für die folgenden Generationen geschaffen werden.
- B) Evolutionäre Einführung:** DANN sollten bewährte Subsysteme aus der Evolution heraus kontinuierlich als Standard gesetzt werden.

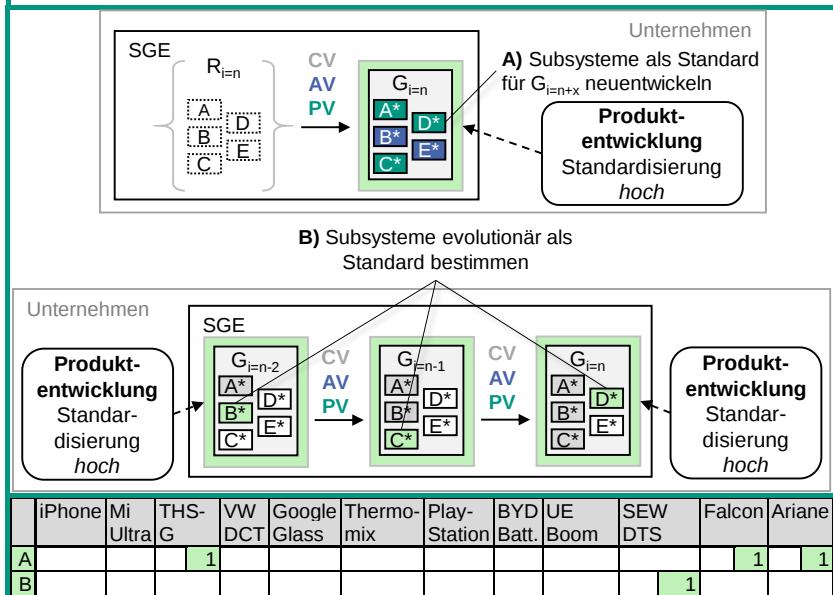


Abbildung 7.17: H12: Einführungsstrategien für Standardisierungsmethoden – neuen Standard setzen vs. evolutionäre Einführung. Produktprofile wurden nicht abgebildet.

Entwicklung der Variationsanteile

Standardisierung verfolgt das Ziel, den CV-Anteil in der SGE zu erhöhen (Bursac, 2016, S. 147). Zur Entwicklung der Variationsanteile nach der Einführung von Standardisierungsmethoden wurden fallübergreifende Beobachtungen gemacht, die in E08 und E09 (Abbildung 7.18) zusammengefasst werden.

E08 Standardisierung zahlt sich frühestens eine Generation nach der Einführung aus												
Bei Einführung von Standardisierungsmethoden in der $G_{i=n}$ ist ein Anstieg des CV-Anteils frühestens in der $G_{i=n+1}$ zu erwarten.												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
		1							1	1	1	

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E08 und E09 werden kurz zusammengefasst:

- **Falcon, Ariane, SEW DTS:** Erst die Systemgenerationen, die auf die $G_{2\text{SpaceX}}$, Falcon 9 v1.0 und $G_{5\text{Ariane}}$, 5G folgten, wiesen einen höheren CV-Anteil als die Systemgenerationen vor der Einführung von Standardisierungsmethoden auf. In der Fallstudie SEW DTS war der CV-Anteil durchgehend sehr hoch. Der Neuentwicklungsanteil stieg nach der Einführung des Baukastenregelwerks bis zur $G_{4\text{SEW DTS}}$ und fiel danach wieder ab. In allen drei Fallstudien waren nach der Einführung der Standardisierungsmethode PV und AV für die Realisierung von neuem Nutzen in einzelnen Subsystemen notwendig.
- **THS-G:** Die Kombination aus Baukasten, Modul- und Baureihenbauweise führte in den nach TNGA entwickelten Systemgenerationen dazu, dass, außer in der $G_{6\text{THS-G, P610 PHEV}}$, keine PV mehr vorkam. Neue Systemgenerationen wurden durch CV von RSE aus Vorgängergenerationen (Module) oder AV für höhere übertragbare Drehmomente (Stufungen nach Baureihe) entwickelt. In der $G_{6\text{THS-G, P610 PHEV}}$ wurde dem Power-Split-Device (PSD) für die Hybridisierung eine Freilaufkupplung hinzugefügt (PV) und dadurch ein neues Modul für den Baukasten geschaffen.

Standardisierung begünstigte Systemgenerationen mit relativ hohem CV-Anteil (Hoch-CV-Systemgenerationen, siehe Kapitel 7.5.2) und das Variationsmuster direkt aufeinanderfolgende CV eines Subsystems über mehrere Generationen (siehe Muster M02.2 in Kapitel 7.5.4).

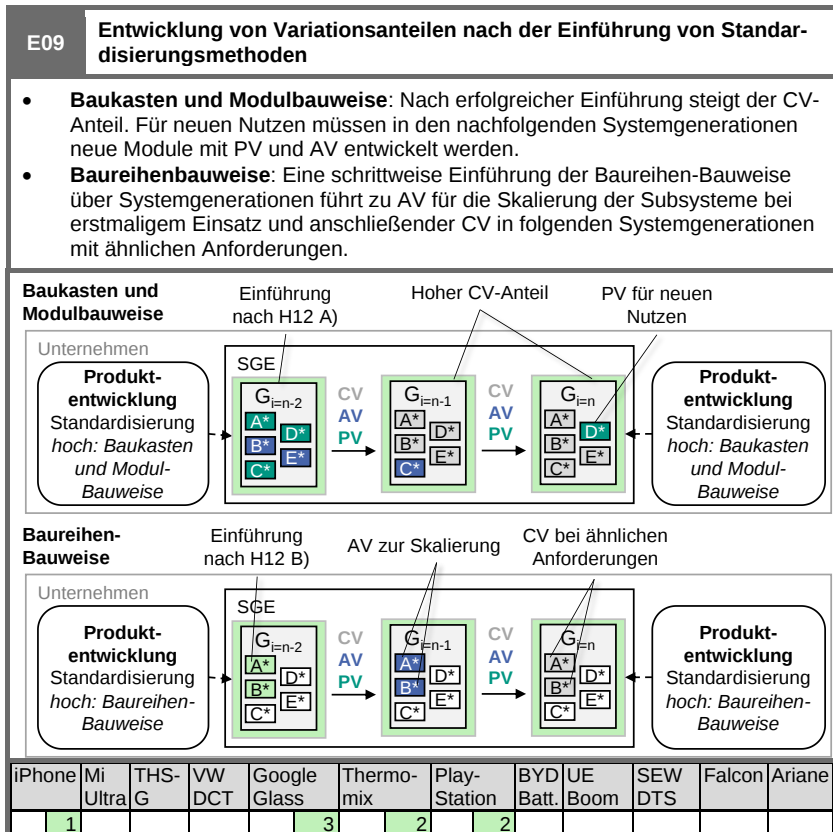


Abbildung 7.18: E09: Entwicklung von Variationsanteilen nach der Einführung von Standardisierungsmethoden

7.4 Variation des Produktprofils

Das Produktprofil und das technische System einer Systemgeneration stehen im Zentrum der Evolution technischer Systeme. Für die Analyse der Variation des Produktprofils wird, wie in Kapitel 4.2.1 eingeführt, der rekonstruierte Produktprofil-Claim als Stellvertreter-Variable verwendet. Eine Variation des Produktprofil-Claims setzt eine Variation des Hauptproduktziels voraus (vgl. Kapitel 2.2.3). Demnach kann sich ein Produktprofil auch weiterentwickelt haben, wenn die Variation des Produktprofil-Claims als CV eingeordnet wurde. Neben den Variationsarten des Produktprofil-Claims wurde in den Fallstudien auch die Weiterentwicklung des Kunden- und Anwendernutzens eingeordnet. Eine differenzierte Betrachtung dieser und weiterer Stakeholdergruppen ist in der Produktentwicklung erfolgsentscheidend (Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Die untersuchten technischen Systeme werden teilweise in unterschiedlichen Kunde-Anwender-Konstellationen eingesetzt (z. B. Thermomix: Kunde und Anwender = Privatanutzer vs. Kunde = Restaurantinhaber, Anwender = Koch). Für komplexe Geschäftsmodelle (z. B. SpaceX Falcon und Ariane: Startanbieter) müssten ganze Stakeholder-Netzwerke in die Betrachtung miteinbezogen werden. In den retrospektiven Fallstudien wurde diese Unterteilung nicht vorgenommen, da sich dadurch die Komplexität des Datenmodells und damit der Studienaufwand erheblich gesteigert hätte.

Abbildung 7.19 gibt eine Übersicht über die Variationsarten der Produktprofil-Claims in den Fallstudien.

		Systemgeneration																
Fallstudie	Produktvariante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
iPhone	High-end	P	P	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C
	Mid-range							A				A	C	C	C	C		
	Low-end									A				C		C		
Mi Ultra		A	C	A	C	C												
THS-G	Oberklasse						P											
	Obere Mittelklasse					P	C						P					
	SUV				A			C								C		
	Mittelklasse					A				C					C	C		
	Van									A								
	Kompaktklasse	P	A	C								P	P					
VW DCT	High-Torque				A													
	Medium-Torque	P				A	A											
	Low-Torque		A															
Google Glass		P	C	P	C													
Thermomix		P	C	A	C	A	A	P	A									
PlayStation		P	A	P	C	C												
BYD Batterie		P	P	A	A	A	A											
UE Boom	Megaboom		A				A											
	Boom	P					C											
	Wonderboom					A				C	C							
SEW DTS		P	P	A	A	A	C	A	C	C	A	C	C	C	C	C		
Falcon		P	A	P	P	A												
Ariane	Evolution				A			C	A									
	Standard	A	C			C												

P Prinzipvariation
 A Ausprägungsvariation
 C Übernahmevariation

Abbildung 7.19: Tabellarische Übersicht der Produktprofil-Claim-Variationen in den Fallbeispielen.

Aus der fallübergreifenden Analyse der Variation der rekonstruierten Produktprofil-Claims wurden induktiv die in Tabelle 7.4 dargestellten Theoriebausteine hergeleitet.

Tabelle 7.4: Überblick über die Theoriebausteine zur Variation des Produktprofils und deren Anwendung in der Produktentwicklung.

Nr.	Kap.	Beschreibung	Anwendung
H13.1	7.4.1	Kombination des Nutzens mehrerer technischer Systeme in einem	Die fünf Heuristiken für Produktprofil-PV können in der Produktentwicklung in der Aktivität Profile finden unterstützen, Produktprofil-Claims für neue Produkte und Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial zu generieren.
H13.2		Neuer zusätzlicher Hauptnutzen	
H13.3		Benchmark gegenüber RSE	
H13.4		Neuer Nutzen in Use-Case durch Technologie	
H13.5		Technisches System in neuem Geschäftsfeld platzieren	
M01.1	7.4.2	Aufeinanderfolgende Produktprofil-PV für schnelle Erweiterung des Produktprofils oder Neuplatzierung als Reaktion auf Misserfolg	Die Produktprofil-Variationsmuster sind in erster Linie beschreibend und fassen Erkenntnisse zur Evolution von Produktprofilen zusammen. Die Muster können dabei unterstützen, Produktprofil-Variationen für die nächste Generation oder generationsübergreifend zu planen.
M01.2		Weiterentwicklung mit gleichbleibendem Hauptnutzen nach Produktprofil-PV – Produktprofil-Grundeolution	
M01.3		Direkt aufeinanderfolgende AV - Schnelle Weiterentwicklung des Hauptnutzens oder Suche nach der richtigen Ausprägung	
M01.4		Neuer Kunden- und Anwendernutzen in jeder Systemgeneration	
H14	7.4.3	Produktprofil- S-Kurve	Produktprofil-Variation auf längere Sicht in Generationen denken.
H15	7.4.4	Produktprofil-PV braucht Hoch-PV-Systemgeneration zur Realisierung	Planung von Entwicklungsprojekten mit Produktprofil-PV unterstützen.

H Heuristik **M** Muster

7.4.1 Heuristiken für Produktprofil-PV

In 23 Systemgenerationen, davon in allen neun G_1 -Generationen, wurde der Produktprofil-Claim mit PV entwickelt. Diese 23 mit PV entwickelten Produktprofil-Claims zeigten Gemeinsamkeiten auf, die im Folgenden in fünf Heuristiken H13.1 – H13.5 zusammengefasst wurden.

H13.1 Produktprofil-PV: Kombination des Nutzens mehrerer technischer Systeme in einem												
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I	1			1		1						

In drei der abgeleiteten Produktprofil-Claims für G_1 -Systemgenerationen wurden die Hauptnutzen mehrerer RSE zu einem Produktprofil kombiniert:

- $G_1^{\text{iPhone, iPod}}$: Mobiltelefon, iPod und Internet-Kommunikationsgerät
- $G_1^{\text{Thermomix, VM2000}}$: Mixer und Herdplatte
- $G_1^{\text{VW DCT, MT, DQ250}}$: Wandler-Stufenautomatikgetriebe und Handschaltgetriebe

H13.2 Produktprofil-PV: Neuer zusätzlicher Hauptnutzen												
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I		1		4			1		1			2

In neun der abgeleiteten Produktprofil-Claims wurde ein zusätzlicher Hauptnutzen verglichen zum Produktprofil der $G_{i=n-1}$ hinzugefügt:

- $G_2^{\text{iPhone, 3G}}$: Offene digitale Plattform zusätzlich zur Kombination des Nutzens von Mobiltelefon, iPod und Internet-Kommunikationsgerät
- $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$: Angeleitetes Kochen und digitale Rezeptplattform zusätzlich zur Kombination des Nutzens mehrerer Küchengeräte
- $G_1^{\text{THS-G, OMK, L110}}$, $G_1^{\text{THS-G, OK, L110F}}$, $G_3^{\text{THS-G, OMK, L310}}$: Hohe Dynamik zusätzlich zur hohen Effizienz des Hybridbetriebs
- $G_6^{\text{THS-G, Komp, P610 PHEV}}$: Plug-in-Möglichkeit zusätzlich zum effizienten Hybridbetrieb
- $G_3^{\text{PlayStation, PS3}}$: Online-Spieleplattform und Multimedia-System zusätzlich zur Spielekonsole
- $G_3^{\text{SpaceX, Falcon 9 v1.1}}$: Wiederverwendbarkeit der ersten Stufe zusätzlich zum kosteneffizienten Betrieb

- **G₄SpaceX, Falcon 9 FT:** Missionen mit Personenbeförderung zusätzlich zum Gütertransport

H13.3 Produktprofil-PV: Benchmark gegenüber RSE

	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I				1			1				1	

Die Verwendung von RSE als Benchmark im Produktprofil-Claim, beispielsweise bezogen auf Qualität, Leistung und Kosten, kam bei drei der rekonstruierten Produktprofil-Claims von G₁ Systemgenerationen vor:

- **G₁VW DCT, MT, DQ250:** Bessere Effizienz als Stufenautomaten
- **G₁PlayStation, PS1:** Niedrigerer Preis als andere stationäre Spielekonsolen
- **G₁SpaceX, Falcon 1:** Niedrigere Launch-Kosten als vergleichbare Anbieter

H13.4 Produktprofil-PV: Neuer Nutzen in Use-Case durch Technologie

	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I			1				1		1	1		

In sechs Systemgenerationen mit PV des Produktprofil-Claims stand die Verwendung einer neuen Technologie für einen bestimmten Use-Case im Vordergrund. Die vier erfolgreichen Systemgenerationen definierten einen klaren Nutzen, der durch die Anwendung der Technologie für Kunden und Anwender entsteht:

- **G₁THS-G, Komp, P110:** Serieller Hybrid für Kompaktklasse → Effizienterer Betrieb
- **G₁PlayStation, PS1:** Neue stationäre Konsole → 3D-Gaming
- **G₁UE Boom, Boom 1:** Portabler Lautsprecher → sozialer Aspekt von Musik im Alltag
- **G₁SEW DTS:** Integration Batterie in DTS → mehr Flexibilität in der Anwendung

H13.5 Produktprofil-PV: Technisches System in neuem Geschäftsfeld platzieren

	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I					1			1	1			

In zwei Fällen konnte der Markterfolg gesteigert werden, indem das technische System in einem neuen Geschäftsfeld platziert wurde ($G_2^{\text{BYD Batterie, e6}}$, $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$). In beiden Fällen wurde so auf eine nicht erfolgreiche Systemgeneration reagiert. Die Verwendung in neuen Marktsegmenten eines bestehenden Geschäftsfelds wurde als Produktprofil-AV eingeordnet, funktionierte aber analog:

- $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$: Von Privatanutzern (B2C) zu Unternehmenskunden (B2B).
- $G_2^{\text{BYD Batterie, e6}}$: Von Hybridfahrzeugen für Privatanwender zu elektrisch angetriebenen Fahrzeugen für Flotten.
- Mit der $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ übertrug BYD seine Kompetenzen im Smartphone-Batterie-Bereich auf Traktionsbatterien.

7.4.2 Produktprofil-Variationsmuster

Durch die Analyse der Variationsabfolgen der Produktprofil-Claims in den Fallbeispielen konnten wiederholt auftretende Variationsmuster identifiziert werden.

M01.1 Aufeinanderfolgende Produktprofil-PV für schnelle Erweiterung des Produktprofils oder Neuplatzierung als Reaktion auf Misserfolg											
[...] {→} PV {→} PV [...]											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
	1		2				1		1		

Grundsätzlich können Produktprofil-PV direkt aufeinanderfolgen (M01.1) oder im Abstand von mindestens einer Systemgeneration auftreten (M01.2). Zwei aufeinanderfolgende Produktprofil-PV traten fünfmal verteilt über fünf Fallstudien auf. In vier Fällen wurden dabei dem Produktprofil neue Hauptnutzen hinzugefügt (H13.2), um weiteres Innovationspotenzial zu heben:

- **iPhone:** $G_1^{\text{iPhone, iPhone}} \rightarrow G_2^{\text{iPhone, 3G}}$
- **THS-G:** $G_1^{\text{THS-G, OMK, L110}} \rightarrow G_1^{\text{THS-G, OK, L110F}}$ und $G_5^{\text{THS-G, Komp, P610}} \rightarrow G_6^{\text{THS-G, Komp, P610 PHEV}}$
- **SEW DTS:** $G_1^{\text{SEW DTS}} \rightarrow G_2^{\text{SEW DTS}}$

Im Fall der **BYD Batterie:** $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ und $G_2^{\text{BYD Batterie, e6}}$ reagierte BYD auf den Misserfolg der ersten Systemgeneration direkt mit Platzierung in einem neuen Geschäftsfeld (H13.5).

M01.2**Weiterentwicklung mit gleichbleibendem Hauptnutzen nach Produktprofil-PV – Produktprofil-Grundeolution**

- A) Fortlaufende Grundeolution [...] {→} PV ||: {→} CV/AV :||
 B) Unterbrechung durch erneute PV [...] {→} PV ||: {→} CV/AV :|| {→} PV

	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
A		1	1		1			1	1	1		1
B			1		1	1	1				1	

Die Produktprofil-CV/AV nach bzw. zwischen Produktprofil-PV können als **Produktprofil-Grundeolution** verstanden werden. War ein neues, mit PV entwickeltes Produktprofil am Markt erfolgreich, blieb es über mindestens eine Systemgeneration ohne grundlegende Änderung erhalten, bis auf die in M01.1 beschriebenen Fälle von direkt aufeinanderfolgenden Produktprofil-PVs. Diese Grundeolution hielt in den Fallstudien **iPhone**, **Mi Ultra**, **VW DCT**, **BYD Batterie**, **UE Boom**, **SEW DTS** und **Ariane** an und wurde im betrachteten Zeitraum durch keine weitere Produktprofil-PV unterbrochen (M01.2 A). In den Fallstudien **THS-G**, **Google Glass**, **Thermomix**, **PlayStation** und **Falcon** wurde sie mindestens einmal durch eine Produktprofil-PV unterbrochen (M01.2 B).

M01.3**Direkt aufeinanderfolgende AV – Schnelle Weiterentwicklung des Hauptnutzens oder Suche nach der richtigen Ausprägung**

[...] {→} AV | {→} AV [...]

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
2			3		1		4		1		

In fünf Fallbeispielen kam eine Folge von mindestens zwei Produktprofil-AVs in aufeinanderfolgenden Systemgenerationen vor. In vier Fallbeispielen wurde die Ausprägung des Hauptnutzens, beispielsweise zentrale Leistungskennzahlen oder der Funktionsumfang, verbessert, um neue Use-Cases zu ermöglichen oder Marktsegmente zu erschließen:

- **VW DCT:** Nach der $G_1^{\text{VW DCT, MT, DQ250}}$ wurden alle Systemgenerationen mit Produktprofil-AV (andere Drehmomentbereiche) weiterentwickelt
- **Thermomix:** $G_5^{\text{Thermomix, TM21}} \rightarrow G_6^{\text{Thermomix, TM31}}$, Integration weiterer Funktionen für neue Use-Cases
- **BYD Batterie:** $G_3^{\text{BYD Batterie, qinDM}}$ bis $G_6^{\text{BYD Batterie, han}}$, neue Fahrzeugklassen
- **SEW DTS:** $G_3^{\text{SEW DTS}} \rightarrow G_4^{\text{SEW DTS}}$, von hoher zu omnidirektionaler Mobilität

Im Fallbeispiel **iPhone** trat in den ersten drei preisgünstigeren Produktvarianten wiederholt AV auf. Apple war auf der Suche nach der richtigen Differenzierung gegenüber den jeweiligen High-End-Varianten einer Systemgeneration.

M01.4 Neuer Kunden- und Anwendernutzen in jeder Systemgeneration												
Bei M01.4 wurden die Systemgenerationen gezählt, in denen das Muster <u>nicht</u> vorkam.												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
					1					1		

Auch wenn im Produktprofil-Claim eine CV stattfand, wurde in allen bis auf zwei Systemgenerationen der Kunden- und Anwendernutzen weiterentwickelt. Im Falle des **G₄^{Thermomix, TM3300}** wurden lediglich AV an Subsystemen als Anpassungen für den europaweiten Markt vorgenommen, durch die kein neuer oder verbesserter Kunden- und Anwendernutzen entstand. Die **G₆^{SEW DTS}** wurde für einen bereits bestehenden Use-Case entwickelt, allerdings für einen neuen Kunden mit leicht angepasster Konfiguration. Dadurch ergab sich ebenfalls kein neuer Kunden- und Anwendernutzen.

7.4.3 Produktprofil-S-Kurve

Das in M01.2 beschriebene Verhalten kann auch als „Produktprofil-S-Kurve“ verstanden werden und hängt eng mit der Degeneration von Merkmalen über Produktgenerationen hinweg nach Kano zusammen (vgl. Kapitel 2.1.3). Ein mit PV entwickeltes Produktprofil wird über die Zeit bzw. die folgenden Systemgenerationen optimiert. Nach einer gewissen Zeit bzw. einer gewissen Anzahl von Systemgenerationen wäre wieder eine Produktprofil-PV notwendig, um langfristig mit einem in Generationen entwickelten technischen System erfolgreich zu bleiben. In den Fallstudien, die Muster M01.2 B zeigten – **THS-G, Google Glass, Thermomix, PlayStation** und **Falcon** – war diese in H14 (Abbildung 7.20) zusammengefasste Strategie erfolgreich.

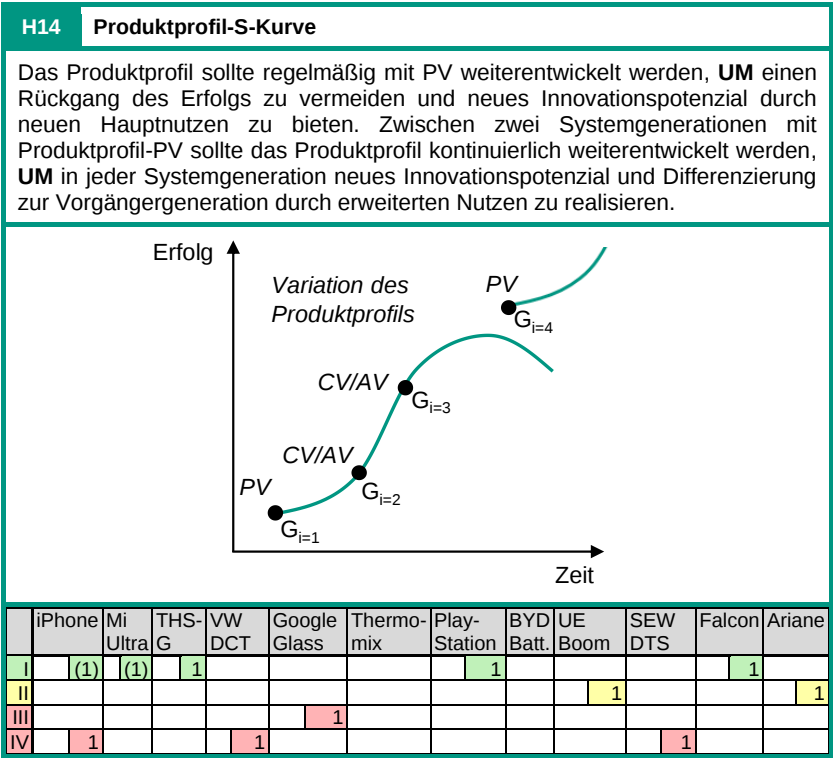


Abbildung 7.20: H14: Produktprofil-S-Kurve.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H14 werden kurz zusammengefasst:

- Bei den beiden Smartphone-Fallstudien **iPhone** und **Mi Ultra** trat in den späteren Systemgenerationen keine Produktprofil-PV mehr auf. Die nach dem Studienzeitraum 2024 und 2025 neu in den Markt eingeführten Systemgenerationen stellen Künstliche Intelligenz in den Vordergrund (Forbes, 2024), was als Produktprofil-PV eingeordnet werden kann. Damit ließen sich auch diese beiden Fallstudien M01.2 B) zuordnen und würden H14 bestätigen.
- Das nächste Getriebe in der Evolution des **VW DCT** wäre das hybride DQ400E, welches eine Produktprofil-PV mit sich brachte und den beschriebenen Zusammenhang ebenfalls stützen würde.
- Die Evolution der **Google Glass** zeigte das Verhalten, führte aber nicht zu langfristigem Erfolg.

- In den Fallstudien **BYD Batterie** und **SEW DTS** trat keine Produktprofil-PV in den späteren Systemgenerationen auf. Der Erfolg hielt in den Fallstudien aber an bzw. stieg, was dafür sprechen könnte, dass sich beide noch in der Reifephase befanden.
- In den Fallstudien **Ariane** und **UE Boom** ging der Markterfolg in den letzten Systemgenerationen zurück. Nach dem beschriebenen Zusammenhang müsste eine Produktprofil-PV folgen, um den Markterfolg wieder zu steigern.

7.4.4 Produktprofil-PV und PV im technischen System

Für die erfolgreiche Umsetzung einer Produktprofil-PV war in 15 von 23 Fällen eine Systemgeneration mit relativ hohem PV-Anteil notwendig (Hoch-PV-Systemgeneration, siehe Kapitel 7.5.3). Aus diesem Zusammenhang wurde Heuristik H15 (Abbildung 7.21) abgeleitet.

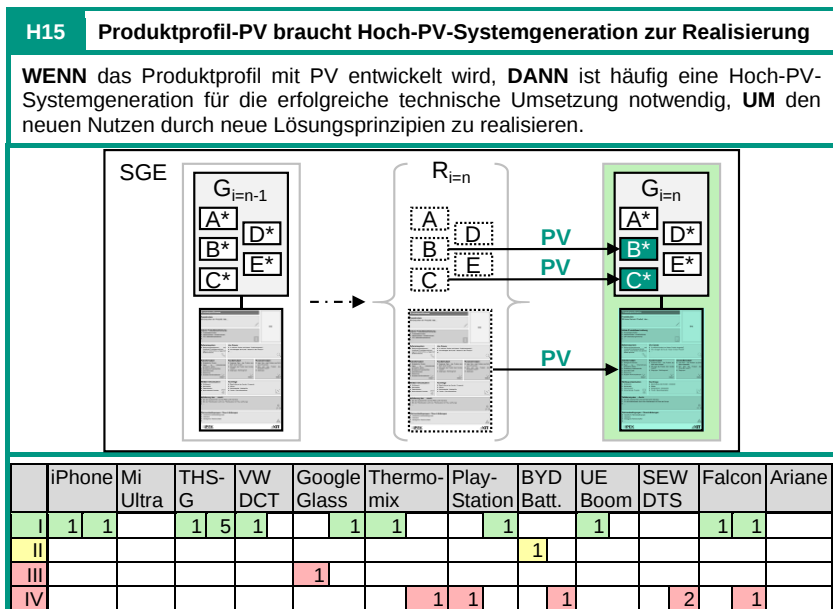


Abbildung 7.21: H15: Produktprofil-PV braucht Hoch-PV-Systemgeneration zur Realisierung.

Ein typisches Beispiel für eine erfolgreiche Hoch-PV- G_1 -Entwicklung mit Produktprofil-PV ist die $G_1^{\text{THS-G, Komp, P110}}$. Toyota konnte auf internen RSE aufbauen,

aber musste einen hohen Entwicklungsaufwand für die Realisierung des Produktprofils mit PV in allen drei Subsystemen in Kauf nehmen. Auf weitere G_1 -Fallbeispiele zu wird nicht eingegangen, da diese bereits in Kapitel 7.2.3 diskutiert wurden.

In sechs Fällen konnte die Produktprofil-PV erfolgreich ohne Hoch-PV-Systemgeneration realisiert werden:

- **Thermomix:** Vorwerk setzte mit der $G_5^{\text{Thermomix, TM5}}$ das „Guided-Cooking“ Produktprofil durch Hinzufügen des Subsystems *Anbindung zur Online-Kochplattform*, PV der *Bedienschnittstelle* und des *Gehäuses* sowie AV aller anderen Subsysteme um. Hinzufügen eines Subsystems statt PV der bestehenden und die damit einhergehende Architekturänderung kann auch als Heuristik verstanden werden.
- **PlayStation:** Mit der $G_1^{\text{PlayStation, PS1}}$ konnte Sony durch geschickte RSE-Wahl (siehe Kapitel 7.6) eine Produktprofil-PV mit einem PV-Anteil im technischen System von lediglich $\delta_{PV} = 20\%$ umsetzen.
- **BYD Batterie:** Bei der Produktprofil-PV der $G_2^{\text{BYD Batterie, e6}}$ wurde das Geschäftsfeld von Hybridfahrzeugen für Privatkunden auf batterieelektrische Fahrzeuge für den Flotteneinsatz geändert, was durch Skalierung der Anzahl an *Zellen* (AV) erreicht werden konnte.
- **SpaceX Falcon:** Mit der $G_4^{\text{SpaceX, Falcon 9 FT}}$ konnte das Produktprofil ohne dafür notwendige PV auf Personenbeförderung erweitert werden (vgl. H02).
- **SEW DTS:** Die Produktprofil-PV der $G_1^{\text{SEW DTS}}$, die die erste Systemgeneration mit batterieelektrischem Energiespeicher sein sollte, wurde durch PV des Energiespeichers umgesetzt. Die Produktprofil-PV der $G_2^{\text{SEW DTS}}$ bezog sich auf Standardisierung und machte keine Hoch-PV-Systemgeneration notwendig.

Diese widersprechen H15 (Kategorie IV), zeigen aber interessante Strategien zur Umsetzung von Produktprofil-PV mit niedrigerem Aufwand und Risiko auf, die jedoch nicht in anderen Fallstudien bestätigt werden konnten. Bei den beiden nicht erfolgreichen Fällen handelte es sich um G_1 -Entwicklungen. Die $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ war nicht erfolgreich und keine Hoch-PV-Systemgeneration (Kategorie II), legte auf lange Sicht aber die Basis für nachfolgende erfolgreiche Systemgenerationen. Die $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ war eine Hoch-PV-Systemgeneration und nicht erfolgreich.

7.5 Variation des technischen Systems

Gezielte Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation auf Subsystemebene sind der zentrale Variationsmechanismus der Evolution technischer Systeme (vgl. Kapitel 5.1). In diesem Kapitel werden die Variationen der technischen Systeme

über die Systemgenerationen hinweg analysiert. In der fallübergreifenden Analyse ergaben sich vier Analyse-Kategorien:

- Architektur (Kapitel 7.5.1)
- Variationsanteile auf das Gesamtsystem bezogen (Kapitel 7.5.2)
- Variationsanteile auf die Subsysteme bezogen (Kapitel 7.5.3)
- Variationsmuster auf Subsystem-Ebene (Kapitel 7.5.4)

In der Fallstudie iPhone wurden in diesem Kapitel nur die High-End-Varianten analysiert, da sich alle anderen aus diesen ableiten lassen. Tabelle 7.5 zeigt eine Übersicht über die Theoriebausteine.

Tabelle 7.5: Überblick über die Theoriebausteine zur Variation technischer Systeme und deren Anwendung in der Produktentwicklung.

Nr.	Kap.	Beschreibung	Anwendbarkeit
E10	7.5.1	Architekturen sind robust und entwickeln sich evolutionär weiter	Limitiert, da Funktionsstruktur nicht betrachtet.
H16		Externe RSE für Architekturänderung	Größere Änderungen der Architektur durch hinzukommende Teilsysteme.
E11.1	7.5.2	Hoch-PV – Inventions-Systemgenerationen	Grobe Einordnung von Systemgenerationen nach Variationsanteilen , die bei der Einschätzung von Implikationen für Innovationspotenzial, Kosten und Risiko unterstützen kann. Es kann auch auf eine bestimmte Kategorie hingearbeitet werden, wobei H17-H21 unterstützen.
E11.2		Hoch-PV und Hoch-CV – Invention und Übernahme maximieren	
E11.3		Hoch-CV und wenige, gezielte PV/linienexterne RSE	
E11.4		Generationen mit $\delta_{CV} = 100\%$	
E11.5		Hoch-ND/Hoch-AV ohne PV oder linienexterne RSE	
H17 E11.1		Hoch-PV-Systemgenerationen als zukünftige RSE-Quelle	
H18 E11.2		Hoch-PV mit Hoch-CV kombinieren	
H19 E11.3		Hoch-CV und einzelne PV mit Fokus auf den Hauptnutzen	
H20 E11.4		$\delta_{CV} = 100\%$ durch vorausschauend entwickelte interne RSE	
H21 E11.5		Systemgenerationen mit hohem δ_{ND} ohne neue Lösungsprinzipien	
			Heuristiken für die Entwicklung von nach E11.1 bis E11.5 eingeordneten Systemgenerationen.

E12.1	7.5.3	CV-dominierte Subsysteme mit PV oder linienexternen RSE	Die Subsystem-Kategorien können als Strategien für die langfristige Planung eines Subsystems genutzt werden. Die bewusste Zuordnung von Subsystemen zu einer bestimmten Kategorie kann bei der generationsübergreifenden Planung von Variationen unterstützen.
E12.2		Subsysteme mit gleichbleibendem Lösungsprinzip	
E12.3		Subsysteme ohne Neuentwicklung	
E12.4		AV-dominierte Subsysteme	
E12.5		PV-dominierte Subsysteme	
E12.6		Subsysteme ohne CV	
M02.1	7.5.4	Weiterentwicklung mit gleichbleibendem Lösungsprinzip – Grundeolution	Weiterentwicklung mit gleichbleibendem Lösungsprinzip: Die Variationsmuster können als generationsübergreifende Planungsmuster auf Subsystemebene angewendet werden.
M02.2		Direkt aufeinanderfolgende CV	
M02.3		Direkt aufeinanderfolgende AV	
M03.1		Direkt aufeinanderfolgende PV für schnelle Weiterentwicklung oder Reaktion auf Misserfolg	Auftreten von neuen Lösungsprinzipien: Die Variationsmuster können als generationsübergreifende Planungsmuster auf Subsystemebene angewendet werden.
M03.2		Grundeolution zwischen PVs	
M03.3		PV nach mehreren CV – neue Lösungsprinzipien für (quasi) standardisierte Subsysteme	
M04.1		Neues Lösungsprinzip wird mit CV weiterentwickelt – erfolgreiche Einführung eines neuen Lösungsprinzips	Weiterentwicklung von neuen Lösungsprinzipien: Die Variationsmuster können als generationsübergreifende Planungsmuster auf Subsystemebene angewendet werden.
M04.2		Neues Lösungsprinzip wird mit AV weiterentwickelt – fortlaufende Anpassung der Ausprägung notwendig	
M04.3		Neues Lösungsprinzip wird mit AV weiterentwickelt und dann übernommen	
M04.4		Neues Lösungsprinzip wird nicht wieder als RSE verwendet – Sackgassen-PV	

H	Heuristik	M	Muster	E	Weitere Erkenntnis
----------	-----------	----------	--------	----------	--------------------

7.5.1 Weiterentwicklung der Architektur

Eine Weiterentwicklung der Architektur – also der fundamentalen Struktur eines technischen Systems (vgl. Kapitel 2.2.1) – lässt sich in den Systemmodellen der Fallstudien durch hinzukommende oder wegfallende Subsysteme erkennen.

Da bis auf die Fallstudien VW DCT und SEW DTS die technischen Systeme nur auf einer Systemebene analysiert wurden, können auch nur auf dieser Ebene fallübergreifend Architekturänderungen erkannt werden. Würde die Analyse auf weitere Systemebenen erweitert werden, würden sich einige PV durch hinzukommende oder wegfallende Subsysteme auf tieferen Systemebenen äußern.

In zwölf Systemgenerationen verteilt auf drei Fallstudien (**Thermomix**, **VW DCT**, **SEW DTS**) wurde die Architektur durch Hinzukommen bzw. Wegfallen von Subsystemen auf der explizit modellierten Systemebene weiterentwickelt. In allen anderen Fallstudien und Systemgenerationen wurde die Architektur auf der explizit modellierten Systemebene nicht verändert. Daraus wurde E10 abgeleitet. Nach Henderson und Clark (1990) sind Architekturen auch unternehmensübergreifend für ähnliche Produkte robust – sobald sich in der unternehmensübergreifenden Evolution ein „Dominant Design“ etabliert hat. In der fallübergreifenden Studie tauchte dieses Phänomen beim Vergleich der beiden Smartphone-Studien iPhone und Mi Ultra auf.

E10 Architekturen sind robust und entwickeln sich evolutionär weiter.												
In der Tabelle werden die gegen E10 sprechenden Systemgenerationen gezählt.												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
				1		2				10		

Die einzigen beiden Systemgenerationen $G_5^{\text{Thermomix, TM21}}$ und $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$, in denen erfolgreich Subsysteme auf oberster Ebene hinzugefügt wurden, zeigten eine Gemeinsamkeit, die in H16 (Abbildung 7.22) zusammengefasst wird. In der $G_5^{\text{Thermomix, TM21}}$ dienten für die Einführung des *Dampfgaraufsatzes* „Varoma“ japanische Bast-Dampfgarer und für die Entwicklung der *Waage* bestehende Küchenwaagen als Referenz. Für die in der $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$ eingeführte *Verbindung zur Kochplattform* wurde auf bestehende WLAN-Schnittstellen als RSE zurückgegriffen.

H16 Externe RSE für Architekturänderung

WENN einer Architektur Subsysteme mit neuem Lösungsprinzip hinzugefügt werden, **DANN** kann nach passenden linienexternen RSE als Basis gesucht werden, **UM** Kosten und Risiko bei der Einführung eines neuen Subsystems zu senken.

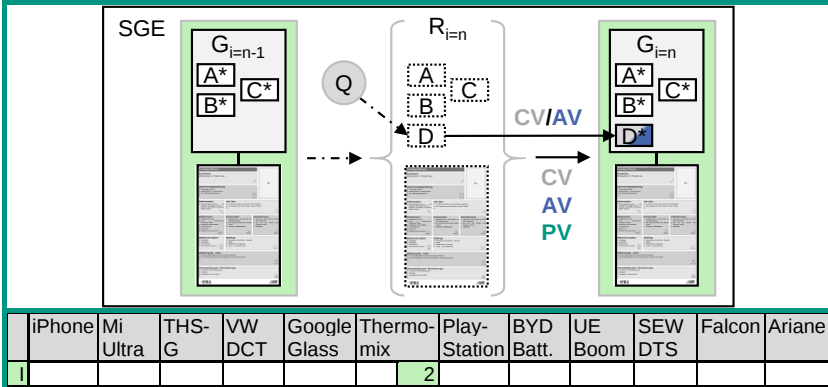


Abbildung 7.22: H16: Externe RSE für Architekturänderung.

7.5.2 Variationsanteile im Gesamtsystem

Durch den unterschiedlichen Detaillierungsgrad der Systemmodelle in den jeweiligen Fallstudien – zwischen drei Subsystemen (THS-G) und 28 Subsystemen (VW DCT) ist ein Vergleich der Variationsanteile zwischen den Fallstudien nicht sinnvoll. Im Folgenden wird daher die Entwicklung der Variationsanteile über die Systemgenerationen zwischen den Fallstudien analysiert. Abbildung 7.23 und Abbildung 7.24 zeigen die Variationsanteile je Systemgeneration für alle Fallstudien.

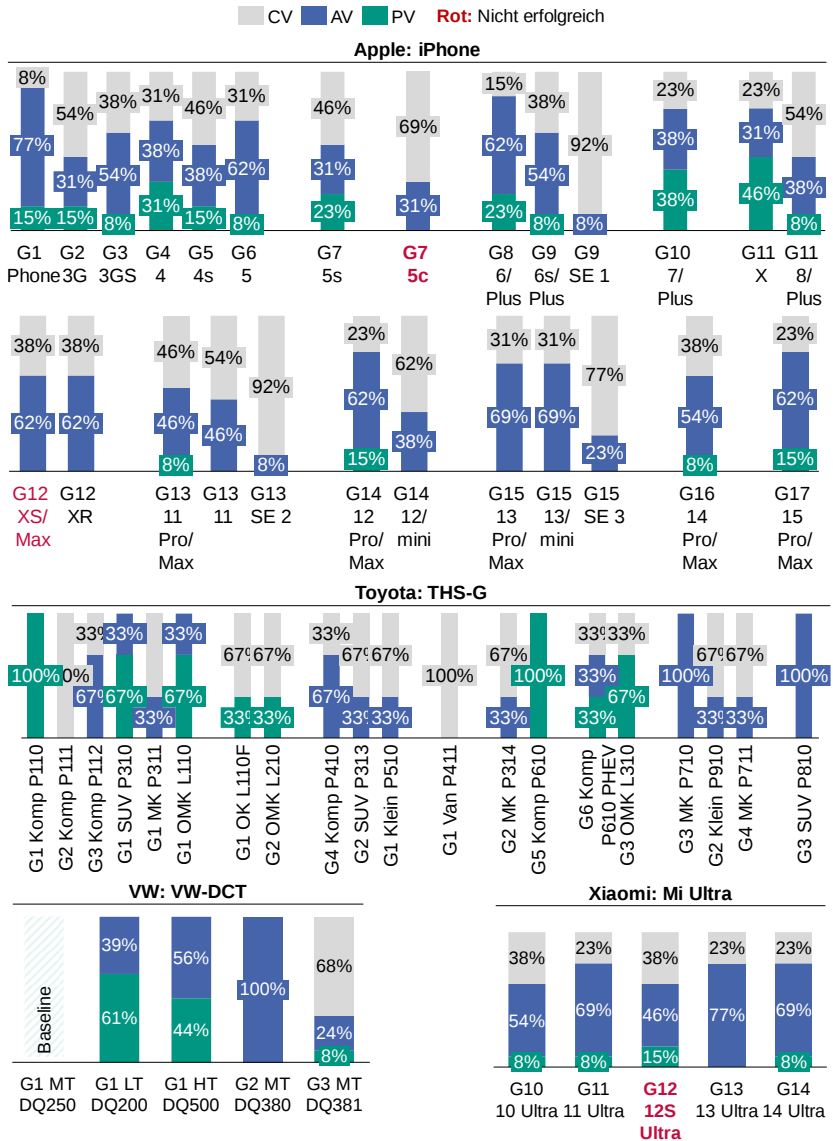


Abbildung 7.23: Variationsanteile je Systemgeneration Teil 1.

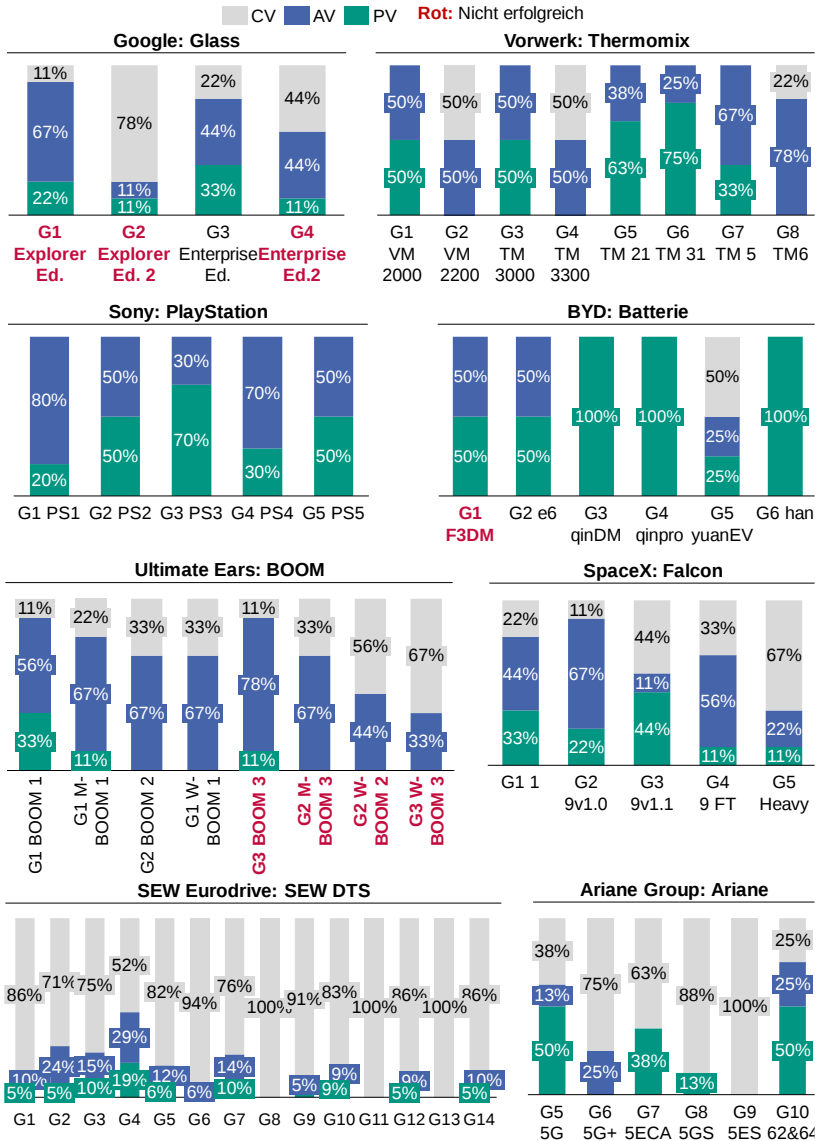


Abbildung 7.24: Variationsanteile je Systemgeneration Teil 2.

Aus diesem Gesamtüberblick konnten keine Zusammenhänge identifiziert werden, weshalb weitere Variablen zur Analyse abgeleitet wurden.

Klassifizierung von Systemgenerationen nach Variationsanteilen

In der Evolution eines technischen Systems kann zwischen Systemgenerationen mit relativ hohem Anteil einer Variationsart und Systemgenerationen mit relativ niedrigem Anteil einer Variationsart unterschieden werden. Für die Unterscheidung zwischen „relativ hoch“ und „relativ niedrig“ kann als Lageparameter δ_{xV}^F der Median des jeweiligen Variationsanteils einer Fallstudie herangezogen werden (Formeln 7.1 und 7.2). Der Median eines Variationsanteils einer Fallstudie δ_{xV}^F wurde gegenüber dem arithmetischen Mittelwert bevorzugt, da die Variationsanteile über die Systemgenerationen nicht symmetrisch verteilt sind.

Sei F eine Fallstudie und i der Generationsindex der untersuchten Systemgeneration G_i und $xV = (CV, AV, PV, ND)$ der untersuchte Variationsanteil nach Formel 2.2. Dann ist

$$\delta_{xV,i}^F \quad 7.1$$

der xV – Variationsanteil der Systemgeneration G_i der Fallstudie F .

Sei $\tilde{\delta}_{xV}^F$ der Median des xV – Variationsanteils der Fallstudie F . Dann ist

$$\delta_{xV,i}^F \begin{cases} \text{hoch für } \delta_{xV,i}^F > \tilde{\delta}_{xV}^F \\ \text{im Median für } \delta_{xV,i}^F = \tilde{\delta}_{xV}^F \\ \text{niedrig für } \delta_{xV,i}^F < \tilde{\delta}_{xV}^F. \end{cases} \quad 7.2$$

Im Folgenden wird beispielsweise von „Hoch-PV-Systemgenerationen“ gesprochen, wenn für die betrachtete Systemgeneration ein nach Formel 7.1 hoher PV-Anteil $\delta_{PV,i}^F > \tilde{\delta}_{PV}^F$ vorlag. Tabelle 7.6 zeigt den Median der Variationsanteile für die Fallstudien.

Tabelle 7.6: Median der Variationsanteile für die Fallstudien.

Fallstudie	δ_{CV}^F [%]	δ_{AV}^F [%]	δ_{PV}^F [%]	δ_{ND}^F [%]
Apple: iPhone	42	38	8	58
Xiaomi: Mi Ultra	23	69	8	77
Toyota: THS-G	50	33	0	50
Volkswagen: DCT	0	48	26	100
Google: Glass	33	44	17	67
Vorwerk: Thermomix	0	50	42	100
Sony PlayStation	0	50	50	100
BYD: Traktionsbatterie	0	13	75	100
Ultimate Ears: Boom	33	67	0	67
SEW: DTS	86	9	5	14
SpaceX: Falcon	33	44	22	67
ArianeGroup: Ariane	69	6	25	31

Aus der fallübergreifenden Analyse der Variationsanteile im Gesamtsystem wurden fünf Kategorien von Systemgenerationen in Abbildung 7.25 identifiziert, die unter E11.1 bis E11.5 eingeführt werden. Zu den jeweiligen Kategorien wurden zudem Heuristiken abgeleitet. Ziel der Kategorien ist es nicht, alle Systemgenerationen zuordnen zu können, sondern Erkenntnisse aus der fallübergreifenden Analyse zusammenzufassen.

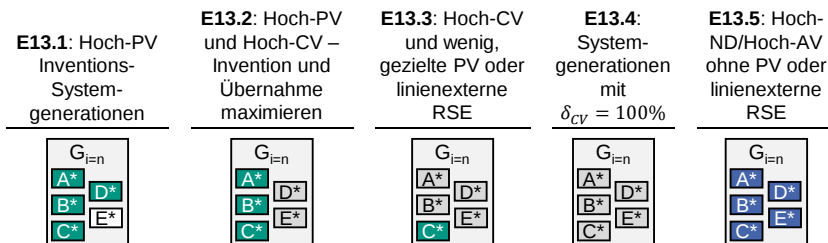


Abbildung 7.25: Schematische Darstellung der Kategorien von Systemgenerationen.

Hoch-PV-Inventions-Systemgenerationen

E11.1 Hoch-PV-Inventions-Systemgenerationen

Hoch-PV-Systemgenerationen können als Inventions-Meilensteine angesehen werden, in denen für eine relativ hohe Anzahl Subsysteme das Lösungsprinzip geändert wurde.

Beim Auftreten von Hoch-PV-Systemgenerationen über die Evolution in Abbildung 7.26 ließ sich kein fallübergreifendes Muster erkennen. Insbesondere das beispielsweise aus der Automobilindustrie bekannte Muster abwechselnder Hoch-PV-Systemgenerationen und anschließender Niedrig-PV-Systemgenerationen (Modellpflege, Facelift) konnte nicht fallübergreifend beobachtet werden.

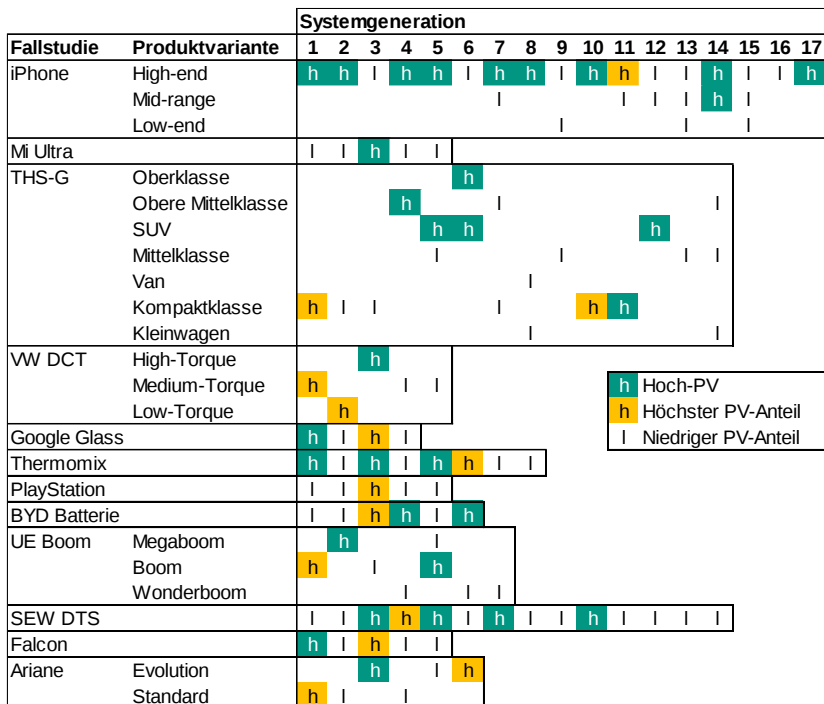


Abbildung 7.26: Hoch-PV- und Niedrig-PV-Systemgenerationen sowie Systemgenerationen mit dem höchsten PV-Anteil.

Bei der Untersuchung der Hoch-PV-Systemgenerationen auf Gemeinsamkeiten wurde H17 (Abbildung 7.27) abgeleitet:

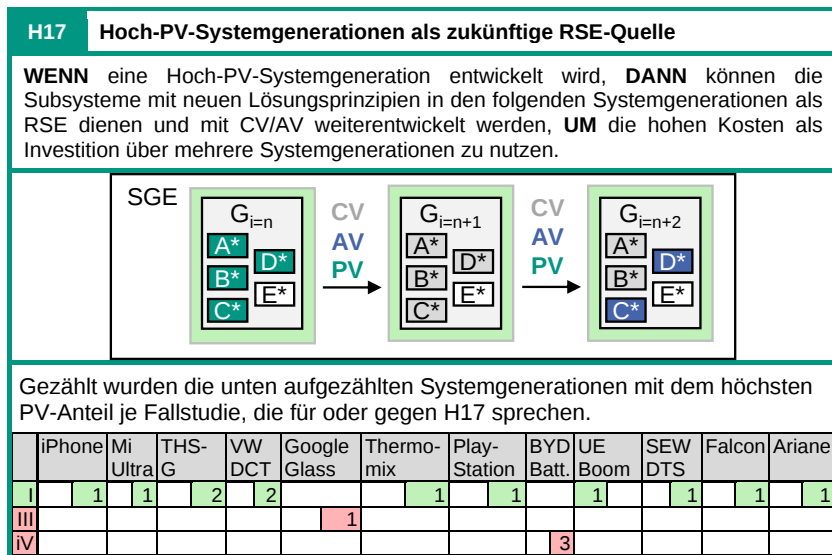


Abbildung 7.27: H17: Hoch-PV-Systemgenerationen als zukünftige RSE-Quelle.

Im Folgenden werden kurz die Systemgenerationen mit dem höchsten PV-Anteil je Fallstudie diskutiert:

- **iPhone:** Die $G_{11}^{\text{iPhone, X}}$ wurde von Apple als „Innovativer Meilenstein“ platziert und brachte in sechs von vierzehn Subsystemen neue Lösungsprinzipien, auf denen kommende Systemgenerationen aufbauen konnten.
- **Mi Ultra:** Die $G_{12}^{\text{Mi Ultra, 12S Ultra}}$ etablierte die in den nächsten Systemgenerationen zentrale Kooperation mit dem Kamerahersteller Leica und machte eine fehlgeschlagene Display-Invention rückgängig. Als einzelne Systemgeneration war sie allerdings nicht erfolgreich.
- **THS-G:** In der $G_1^{\text{THS-G, Komp, P110}}$ und der $G_5^{\text{THS-G, Komp, P610}}$ wurden alle Subsysteme mit PV entwickelt. Beide bildeten die Basis für kommende Systemgenerationen über mehrere Produktvarianten hinweg.
- **VW DCT:** Die $G_1^{\text{VW DCT, MT, DQ250}}$ führte zentrale Lösungsprinzipien für die VW DCT ein. Die $G_1^{\text{VW DCT, LT, DQ200}}$ etablierte die trockene Doppelkupplung für niedrigere Eingangsdrehmomente, die in weiteren, nicht im Rahmen der Fallstudie untersuchten Systemgenerationen Verwendung fand.

- **Google Glass:** Die $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$ passte das technische System für die Anwendung in einem professionellen Umfeld an. Mit dem Misserfolg der $G_4^{\text{Google Glass, Enterprise Ed. 2}}$ wurde lediglich das Lösungsprinzip der CPU weiterentwickelt.
- **Thermomix:** Mit der $G_6^{\text{Thermomix, TM31}}$ wurden neue Lösungsprinzipien in sechs von acht Teilsystemen eingeführt, darunter für die Kochfunktionen zentralen Subsystemen *Antriebssystem*, *Heizplatte* und *Mixtopf* sowie *Mixmesser*, die in den folgenden Systemgenerationen beibehalten wurden.
- **PlayStation:** Die $G_3^{\text{PlayStation, PS3}}$ etablierte für die Subsysteme *Laufwerk*, *I/O-Schnittstelle*, *Netzteil* und *Sound-Prozessor* Lösungsprinzipien, die bis zur $G_5^{\text{PlayStation, PS5}}$ nur in ihrer Ausprägung angepasst wurden.
- **BYD Batterie:** Die analysierten Systemgenerationen sprechen eher gegen H17. Insbesondere folgten mit der $G_3^{\text{BYD Batterie, qinDM}}$ und der $G_4^{\text{BYD Batterie, qinpro}}$ zwei Systemgenerationen mit $\delta_{PV}^{\square} = 100\%$ direkt aufeinander.
- **UE Boom:** Nur die *Bedienschnittstelle*, die *Ausgangsschnittstelle* und die *Batterie* wurden nach der $G_1^{\text{UE Boom, Boom 1}}$ mit PV oder linienexternen RSE weiterentwickelt.
- **SEW DTS:** Durch die modulare Baukasten-Architektur wurden die neuen Lösungsprinzipien, die in der $G_4^{\text{SEW DTS}}$ eingeführt wurden, in weiteren Generationen verwendet.
- **Falcon:** Die mit der $G_3^{\text{SpaceX, Falcon 9 v1.1}}$ mit PV entwickelten *Motoren Stufe 1 und 2* wurden in den folgenden Systemgenerationen nur noch mit AV weiterentwickelt.
- **Ariane:** Die $G_5^{\text{Ariane, 5G}}$ war Grundlage für die Standard-Varianten. Das Lösungsprinzip der *Stufe 2 Motoren* wurde aber auch in der Evolution-Variante weiterverwendet.

Hoch-PV und Hoch-CV – Invention und Übernahme maximieren

E11.2 Hoch-PV und Hoch-CV – Invention und Übernahme maximieren											
Erfolgreiche Systemgenerationen mit hohem PV-Anteil und gleichzeitig hohem CV-Anteil konnten Innovationspotenzial durch neuen Nutzen durch viele PV mit moderatem Neuentwicklungsanteil auf Gesamtsystemebene erreichen.											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
	3		2						7	1	1

Diese Kombination aus hohem CV-Anteil und hohem PV-Anteil kam in vierzehn Systemgenerationen verteilt über fünf Fallstudien vor, wobei in allen Fällen RSE aus

erfolgreichen Vorgängergenerationen übernommen werden konnten. Aus diesen erfolgreichen Systemgenerationen wurde H18 in Abbildung 7.28 abgeleitet.

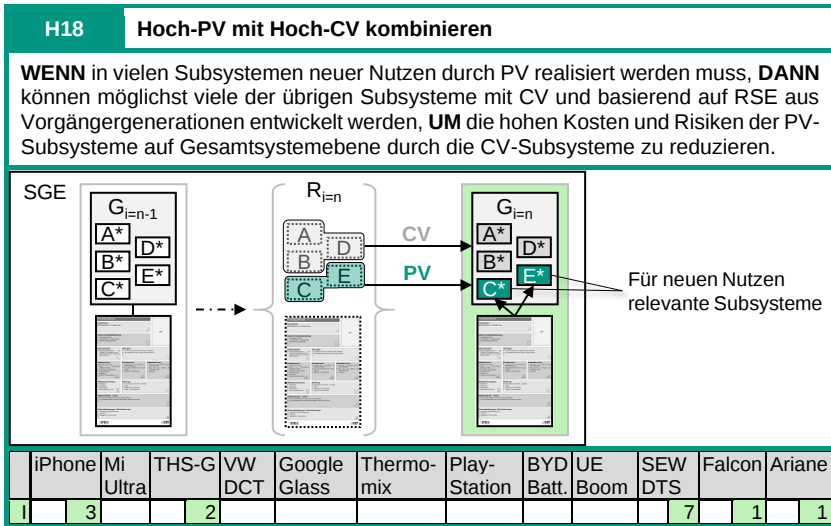


Abbildung 7.28: H18: Hoch-PV mit Hoch-CV kombinieren.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H18 werden kurz zusammengefasst:

- **iPhone:** Apple entwickelte vor allem die frühen Hoch-PV-Systemgenerationen des iPhone ($G_2^{\text{iPhone, 3G}}$, $G_5^{\text{iPhone, 4S}}$, $G_7^{\text{iPhone, 5s}}$) nach diesem Schema.
- **THS-G:** Die $G_1^{\text{THS-G, OK, L110F}}$ und die $G_2^{\text{THS-G, OMK, L210}}$ wurden ausgehend von einer Vorgängergeneration durch Übernahme von jeweils zwei und PV in jeweils einem Subsystem entwickelt.
- **SEW DTS:** Durch die Übernahme von Modulen aus dem Baukasten waren alle Hoch-PV-Systemgenerationen auch Hoch-CV-Systemgenerationen.
- **Falcon:** In der $G_3^{\text{Falcon, 9 v1.1}}$ übernahm SpaceX den *Treibstoff* und die *Fahrzeuge Stufe 1 und 2* inklusive der *Stufentrennung*, alle weiteren Subsysteme wurden mit PV und/oder linienexternen RSE entwickelt. Ziel war bessere Wiederverwendbarkeit, bei den Motoren Leistungssteigerung und Kostenreduzierung.
- **Ariane:** Für die Erhöhung der Nutzlast im Evolution-Programm wurde in der $G_7^{\text{Ariane, 5ECA}}$ der *Motor Stufe 1* neu entwickelt und das Fahrzeug für die höheren Beanspruchungen strukturell ertüchtigt, die übrigen Subsysteme wurden übernommen.

Hoch-CV und wenige, gezielte PV/linienexterne RSE

E11.3 Hoch-CV und wenige, gezielte PV/linienexterne RSE

Erfolgreiche Hoch-CV-Systemgenerationen kombinierten häufig gezielte Neuentwicklung in wenigen Subsystemen mit CV der übrigen Subsysteme und erreichten so einen Trade-off zwischen neuem Nutzen und niedrigem Entwicklungsaufwand und Risiko.

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
	2		1	2			1		1	1	1

Aus den erfolgreichen Systemgenerationen, die entsprechend E11.3 entwickelt wurden, wurde H19 (Abbildung 7.29) abgeleitet.

H19 Hoch-CV und einzelne PV mit Fokus auf den Hauptnutzen

WENN in einer Systemgeneration der CV-Anteil maximiert werden soll, **DANN** kann die Einführung neuer Lösungsprinzipien auf die Subsysteme fokussiert werden, die auf den Hauptnutzen des (neuen) Produktprofils einzahlen und sich in späteren Systemgenerationen als RSE verwenden lassen, **UM** trotz Fokus auf Übernahme gezielt Innovationspotenzial zu generieren.

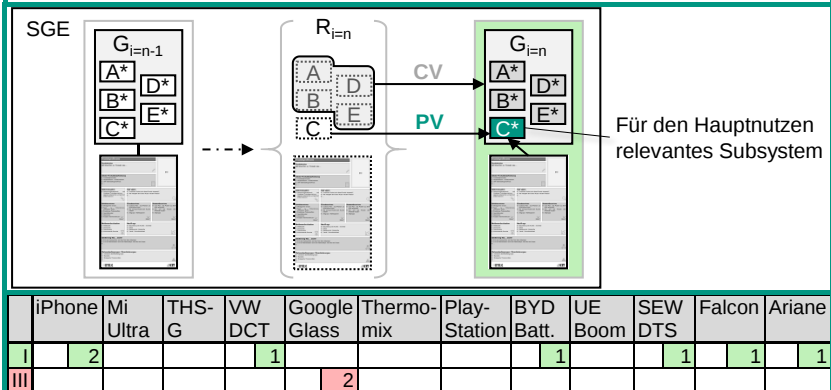


Abbildung 7.29: H19: Hoch-CV und einzelne PV mit Fokus auf den Hauptnutzen.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H19 werden kurz zusammengefasst:

- **iPhone:** Die $G_{11}^{\text{iPhone, 8/Plus}}$ wurde mit viel CV und RSE aus der Vorgängergeneration entwickelt, integrierte aber wie die High-End-Variante kabelloses Laden durch PV des Gehäuses. Die $G_{13}^{\text{iPhone, 11 Pro/Max}}$ wurde ebenfalls mit viel CV und RSE aus der Vorgängergeneration entwickelt. In

zentralem Subsystem Kamera aber implementierte Apple erstmals ein 3-Kamera-System (PV).

- **VW DCT:** Die $G_3^{\text{VW DCT, MT, DQ381}}$ übernahm als direkter Nachfolger des $G_2^{\text{VW DCT, MT, DQ380}}$ im mittleren Drehzahlbereich mit leicht erhöhtem Eingangsdrehmoment einen Großteil der Teilsysteme. Mit einer PV der Lagerung der *Ausgangswelle 2* konnte dennoch die Effizienz durch reduzierte Reibung gesteigert werden: Von einer angestellten Stützlagerung in X-Anordnung mit vorgespannten Kegelrollenlagern auf eine Fest-Los-Lagerung mit Rillenkugellager (Festlager) und Zylinderrollenlagern ohne Innenring (Loslager) gepaart mit Einstellelementen.
- **BYD Batterie:** $G_5^{\text{BYD Batterie, yuanEV}}$ wurde mit CV/AV basierend auf RSE vorangegangener Generationen entwickelt, durch PV in der Struktur wurde trotzdem die erste „Skateboard“-Architektur ermöglicht.
- **SEW DTS:** Durch den in H18 beschriebenen Effekt gibt es nur eine Hoch-CV-Systemgeneration mit PV, die nicht gleichzeitig eine Hoch-PV-Systemgeneration ist und damit unter E11.2 fällt.
- **Falcon:** Die $G_5^{\text{SpaceX, Falcon Heavy}}$ konnte mit 27 statt neun *Stufe 1 Motoren* und daran angepasste *Navigation und Steuerung* (AV) höhere Nutzlasten transportieren. Die einzige dafür notwendige PV war das Treibstoffverteilsystem des *Fahrzeugs Stufe 1*.
- **Ariane:** Für die $G_8^{\text{Ariane, 5GS}}$ wurde Kosteneffizienz durch CV vorangegangener Systemgenerationen und eine PV zur Reduzierung der Herstellungskosten der *Stufe 1 Motoren* erreicht.

Systemgenerationen ohne Neuentwicklung

E11.4 Generationen mit $\delta_{CV} = 100 \%$											
Auch Systemgenerationen mit $\delta_{CV} = 100 \%$ können neuen Kunden- und Anwendernutzen generieren und erfolgreich sein, bei reduziertem Entwicklungsaufwand.											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
			2						3		1

Sechs Systemgenerationen verteilt über drei Fallstudien wurden mit $\delta_{CV} = 100 \%$ entwickelt und haben neuen Kunden- und Anwendernutzen generiert. Ein CV-Anteil von 100% bedeutet dabei nicht, dass keine Entwicklungstätigkeit stattgefunden hat. Bei der Übernahme von RSE können beispielsweise Schnittstellen-Anpassungen anfallen. Es folgten nie zwei Systemgenerationen mit $\delta_{CV} = 100 \%$ direkt aufeinander. Aus den vier erfolgreichen Systemgenerationen wurde H20 (Abbildung 7.30) abgeleitet.

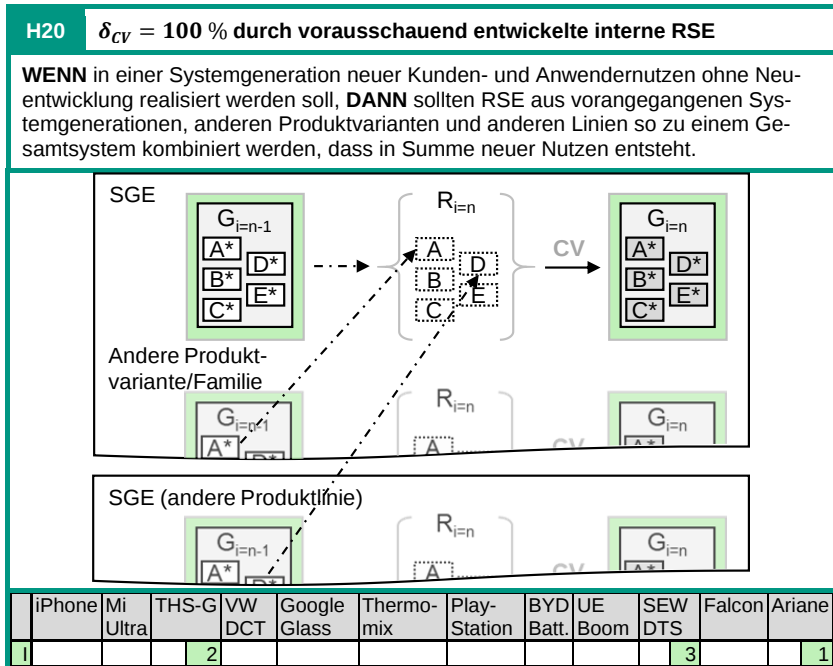


Abbildung 7.30: H20: $\delta_{CV} = 100\%$ durch vorausschauend entwickelte interne RSE.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H20 werden kurz zusammengefasst:

- THS-G:** Die $G_2^{\text{THS-G, Komp, P111}}$ und die $G_1^{\text{THS-G, Van P411}}$ konnten ohne Neuentwicklung innerhalb der betrachteten Systemgrenzen jeweils in einem Fahrzeug mit mehr E-Maschinen Leistung und erstmalig in einer neuen Fahrzeugklasse eingesetzt werden.
- SEW DTS:** Die $G_8^{\text{SEW DTS}}$, $G_{11}^{\text{SEW DTS}}$ und $G_{13}^{\text{SEW DTS}}$ konnten ohne Neuentwicklung durch Übernahme von als Modulen entwickelten Subsystemen aus dem Baukasten in neuen Use-Cases eingesetzt werden.
- Ariane:** Die $G_9^{\text{Ariane, 5 ES}}$ hatte einen CV-Anteil von $\delta_{CV} = 100\%$ und übernahm dafür RSE aus zwei vorangegangenen Systemgenerationen für neue Use-Cases. Die $G_6^{\text{Ariane, 5G+}}$, $G_7^{\text{Ariane, 5ECA}}$ und $G_8^{\text{Ariane, 5GS}}$ wurden so ebenfalls mit hohem CV-Anteil entwickelt.

Hoch-ND/Hoch-AV ohne PV oder linienexterne RSE

E11.5 Hoch-ND/Hoch-AV ohne PV oder linienexterne RSE												
Systemgenerationen mit hohem Neuentwicklungsanteil und ohne PV oder linienexterne RSE brachten trotz tendenziell hohem Entwicklungsaufwand keine neuen Lösungsprinzipien in die Evolution ein.												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
	1	4	1		1			2				

Es kamen neun Hoch-ND/Hoch-AV Systemgenerationen ohne PV oder linienexterne RSE verteilt über fünf Fallstudien vor. Aus den erfolgreichen Systemgenerationen wurde H21 abgeleitet.

H21 Systemgenerationen mit hohem δ_{ND} ohne neue Lösungsprinzipien												
WENN in einer Systemgeneration keine neuen Lösungsprinzipien eingeführt werden, DANN kann durch Leistungs-/Effizienzsteigerung und/oder Kostenreduktion durch AV und der Nutzung interner RSE aus anderen Produktvarianten Innovationspotenzial durch ausreichende Differenzierung zur Vorgängergeneration und parallelen Varianten entstehen.												
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I		1	4	1		1			1			
III									1			

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H21 werden kurz zusammengefasst:

- **Mi Ultra:** Mit der $G_{13}^{\text{Xiaomi, Ultra}}$ erreichte Xiaomi durch Leistungssteigerung und Kostenreduktion ein konkurrenzfähigeres Gesamtpaket ohne neues Lösungsprinzip.
- **THS-G:** Mit der $G_3^{\text{THS-G, Komp, P112}}$ steigerte Toyota durch AV in zwei Subsystemen die E-Maschinen Leistung und das übertragbare Drehmoment des Getriebes. Die $G_4^{\text{THS-G, Komp, P410}}$ übertrug die mit der $G_1^{\text{THS-G, SUV, P310}}$ bei den SUVs eingeführten neuen Lösungsprinzipien auf die Kompaktklasse. Mit der $G_3^{\text{THS-G, MK, P710}}$ wurde die TNGA auf die Mittelklasse, mit der $G_3^{\text{THS-G, OK, P810}}$ auf die Oberklasse übertragen.
- **VW DCT:** Die $G_2^{\text{VW DCT, MT, DQ380}}$ übertrug neue Lösungsprinzipien aus der $G_1^{\text{VW DCT, HT, DQ500}}$ für höhere Eingangs Drehmomente auf den mittleren Drehmomentbereich.
- **Thermomix:** Die $G_8^{\text{Thermomix, TM6}}$ baute auf den neuen Lösungsprinzipien der $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$ auf und ermöglichte durch gezielte AV einzelner Subsysteme neue Use-Cases.

- **UE Boom:** Die $G_2^{\text{UE Boom, Boom 2}}$ realisierte deutlich verbesserte Klangqualität, höhere Wasserdichtigkeit und ein neues User-Interface durch AV vieler Subsysteme und Übertragung neuer Lösungsprinzipien aus der leistungsstärkeren $G_1^{\text{UE Boom, M-Boom 1}}$. Die $G_2^{\text{UE Boom, M-Boom 3}}$ war als Hoch-ND ohne PV oder linienexterne RSE nicht erfolgreich.

7.5.3 Variationsanteile auf Subsystem-Ebene

Für die Analyse der Variationen auf Subsystemebene werden neben den Variationsanteilen $\delta_{CV,i}$, $\delta_{AV,i}$, $\delta_{PV,i}$ und $\delta_{ND,i}$ für eine Produktgeneration G_i (siehe Formel 2.2) in dieser Arbeit subsystembezogene Variationsanteile in Formel 7.3 eingeführt. Der subsystembezogene Variationsanteil beschreibt, wie häufig ein Subsystem bei generationsübergreifender Betrachtung mit einer Variationsart entwickelt wurde.

Sei F eine Fallstudie, $s \in S$ ein in der Fallstudie F betrachtetes Subsystem und $xV = (CV, AV, PV, ND)$ der untersuchte Variationsanteil nach Formel 2.2. Dann bezeichnet

$$\delta_{xV,s}^F$$

den subsystembezogenen xV – Variationsanteil des Subsystems s der Fallstudie F .

Sei $|s|$ die Anzahl aller Systemgenerationen eines Subsystems und $|xV, s|$ die Anzahl aller Systemgenerationen des Subsystems s , die mit der Variationsart xV entwickelt wurden. Dann ist

$$\delta_{xV,s}^F = \frac{|xV, s|}{|s|} [\%]. \quad 7.3$$

Für die Analyse der Häufigkeit der Variationsarten auf Subsystemebene wird neben dem subsystembezogenen Variationsanteil $\delta_{xV,s}^F$ (Formel 7.3) der Modus der Variationsarten je Subsystem verwendet, der in Formel 7.4 eingeführt wird.

Sei $k = (1, 2, 3)$, F eine Fallstudie zur Evolution und s ein in der Fallstudie F betrachtetes Subsystem. Dann ist

$$D_{k,s}^F = \{CV, AV, PV\} \quad 7.4$$

der k -te Modus der Variationsarten der Fallstudie F für das Subsystem s , wobei $D_{1,s}^F$ die am häufigsten aufgetretene Variationsart und bei multimodalen Verteilungen die am häufigsten auftretenden Variationsarten beschreibt. Ein Subsystem s einer Fallstudie F wird im Folgenden nach seinem $D_{1,s}^F$ als $\{CV, AV, PV\}$ -dominiert bezeichnet.

So wird beispielsweise das Subsystem *Batterie* der Fallstudie iPhone nach seinem 1. Modus $D_{1,Batterie}^{iPhone} = AV$ als AV-dominiert bezeichnet, da es in der High-End-Variante zweimal mit CV, 15-mal mit AV und kein einziges Mal mit PV entwickelt wurde.

Ähnlich der fallübergreifenden Analyse der Variationsanteile im Gesamtsystem wurden in E12.1 bis E12.6 Kategorien für Subsysteme gebildet, die in Abbildung 7.31 schematisch dargestellt sind. Ziel der Kategorie-Bildung war es nicht, alle Subsysteme zuordnen zu können, sondern Erkenntnisse aus der fallübergreifenden Analyse zusammenzufassen.

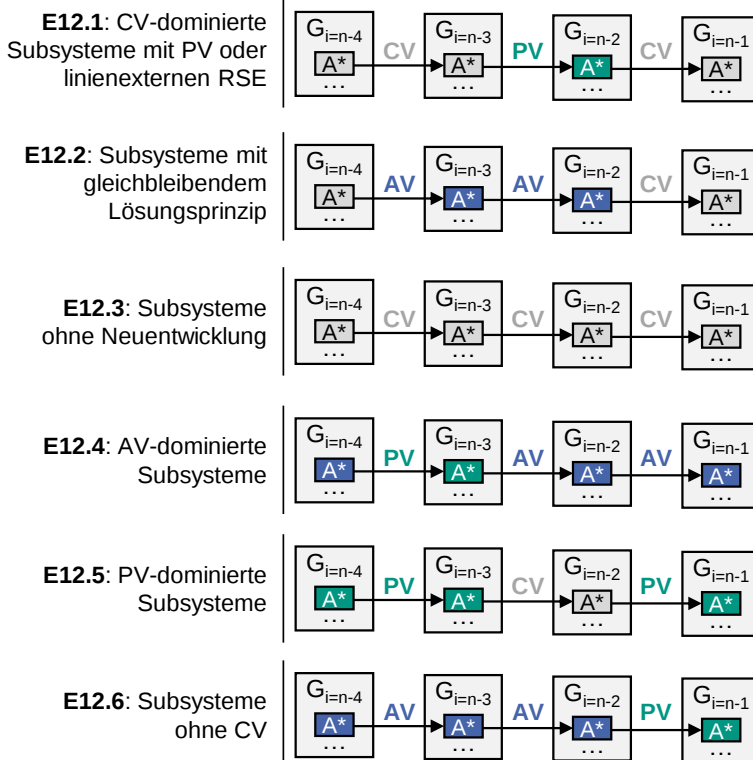


Abbildung 7.31: Exemplarische Darstellung von Subsystemen für jede der sechs Kategorien.

CV-dominierte Subsysteme mit PV oder linienexternen RSE

E12.1 CV-dominierte Subsysteme mit PV oder linienexternen RSE

Subsysteme, die über einen Großteil der Systemgenerationen mit CV übernommen und in wenigen Systemgenerationen mit neuem Lösungsprinzip weiterentwickelt werden.

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
5		2		1				2	6		1

Die in E12.1 beschriebenen Subsysteme können einen kosten- und risikoeffizienten Mittelweg zwischen Neuentwicklung und Übernahme darstellen. In regelmäßigen Abständen über mehrere Systemgenerationen hinweg wurde ein neues Lösungsprinzip eingeführt, das in den nachfolgenden Generationen bis zur nächsten Einführung effizient übernommen wurde. In diesen Zwischengenerationen wurde neuer Nutzen über andere Subsysteme realisiert. Ein Beispiel-Subsystem dieser Kategorie ist das *Power-Split-Device* in der Fallstudie THS-G, das über 20 Systemgenerationen und Produktvarianten hinweg lediglich drei Mal mit PV weiterentwickelt und in 12 Systemgenerationen mit CV übernommen wurde. Die PVs waren für die G_1 ^{THS-G, Komp, P110} für die erstmalige Realisierung des Hybridkonzepts, für die Einführung der TNGA in der G_5 ^{THS-G, Komp, P610} und für die Entwicklung des ersten PHEV-Getriebes in der G_6 ^{THS-G, Komp, P610} notwendig.

Subsysteme mit gleichbleibendem Lösungsprinzip

E12.2 Subsysteme mit gleichbleibendem Lösungsprinzip

Subsysteme mit einem subsystembezogenen PV-Anteil von $\delta_{PV,S}^F = 0$ und ohne linienexterne RSE, nach ihrem erstmaligen Auftreten in der $G_{i=1}$ oder nach einer Architekturänderung, behielten ihr Lösungsprinzip über die gesamte betrachtete Evolution bei.

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
1	9		8	4	3			5	21	3	4

Subsysteme dieser Kategorie können helfen, den Entwicklungsaufwand und das Risiko über die Evolution gering zu halten. Neuer Nutzen durch neue Lösungsprinzipien muss durch andere Subsysteme geschaffen werden, aber über Neuentwicklung mit AV (beispielsweise die Leistungssteigerung der *Waage* des Thermomix durch feinere Abstufung) kann bereits bestehender Nutzen erhöht werden. Ein weiteres typisches Beispiel sind die *Batterien* in den Fallstudien iPhone und Mi Ultra, die in fast jeder Systemgeneration hinsichtlich Kapazität und

Geometrie weiterentwickelt wurden, aber mit der Lithium-Ionen-Technologie immer das gleiche Lösungsprinzip behielten. Durch einen zu hohen Anteil an Subsystemen dieser Kategorie über einen längeren Zeitraum kann, wie im Fallbeispiel UE Boom, über zu lange Zeit zu wenig neues Innovationspotenzial durch neuen Nutzen und damit Misserfolg entstehen.

Subsysteme ohne Neuentwicklung

E12.3 Subsysteme ohne Neuentwicklung												
Subsysteme mit einem subsystembezogenen CV-Anteil von $\delta_{CV,S}^F = 100\%$ und ohne linienexterne RSE wurden über die gesamte betrachtete Evolution nicht weiterentwickelt. Derartige Subsysteme kamen fast ausschließlich in Fallstudien mit ausgeprägter Standardisierung vor.												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
	2								11	1	2	

Subsysteme dieser Kategorie können auch unabhängig von verwendeten Standardisierungsmethoden als „Standard“ verstanden werden. In der fallübergreifenden Analyse traten diese nur in Fallstudien mit ausgeprägter Standardisierung (SEW DTS, Falcon, Ariane) und in der Fallstudie Mi Ultra auf, die jedoch nur einen sehr kurzen Zeitraum umfasst. Es kann angenommen werden, dass außerhalb hoch standardisierter Systeme (z. B. bestimmte Konstruktions- bzw. Maschinenelemente) Subsysteme dieser Kategorie eher selten in der Evolution technischer Systeme vorkommen.

AV-dominierte Subsysteme

E12.4 AV-dominierte Subsysteme												
AV-dominierte Subsysteme wurden über den Großteil der Evolution kontinuierlich angepasst und optimiert.												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
8	10	1	16	3	5	6		6	2	3		

In sechs Fallbeispielen war mehr als die Hälfte der Subsysteme AV-dominiert. Ohne PV oder linienexterne RSE fallen AV-dominierte Subsysteme in Kategorie E12.2 (Subsysteme mit gleichbleibendem Lösungsprinzip). Mit PV oder linienexternen RSE ähneln sie Kategorie E12.1 (CV-dominierte Subsysteme mit PV oder linienexternen RSE), wurden jedoch zwischen der Einführung neuer Lösungsprinzipien häufiger mit AV weiterentwickelt, womit verglichen mit E12.1

potenziell verbesserter Nutzen aber auch tendenziell höhere Kosten und Risiken einhergehen. Die *Batterie* der Fallstudie UE Boom fällt in diese Kategorie. Ähnlich den *Batterien* von iPhone und Mi Ultra wurden Kapazität und Geometrie über die Evolution bei gleichbleibendem Lithium-Ionen-Prinzip weiterentwickelt. Für die niedriger eingeordnete Produktvariante Wonderboom wurde in der $G_1^{UE\ Boom, W-Boom\ 1}$ allerdings basierend auf linienexternen RSE eine Lithium-Polymer-Batterie eingeführt.

PV-dominierte Subsysteme

E12.5 PV-dominierte Subsysteme											
PV-dominierte Subsysteme wurden über den Großteil der Evolution mit PV weiterentwickelt und brachten so immer wieder neue Lösungsprinzipien in das technische System ein.											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
			5	1	2	4	3			1	2

Bis auf die Fallstudie BYD Batterie war nur ein kleiner Anteil der Subsysteme in den Fallstudien PV-dominiert. Der Extremfall von $\delta_{PV,s}^F = 100\%$ für Subsysteme, die in jeder Systemgeneration mit PV weiterentwickelt wurden, kam nicht vor. Subsysteme dieser Kategorie brachten über die Evolution immer wieder neue Lösungsprinzipien und dadurch potenziell neuen Nutzen und neues Innovationspotenzial. Diese Subsysteme waren häufig zentral für den Hauptnutzen und die Differenzierung zur Vorgängergeneration (z. B. *CPU* und *GPU* der PlayStation). PV in einem Großteil der Systemgenerationen war nur dann möglich, wenn auch entsprechende technologische Weiterentwicklungen der zugrunde liegenden Lösungsprinzipien stattfanden. Im Falle der PlayStation wurde dies durch Kooperationen mit anderen technologie starken Unternehmen ermöglicht (siehe H28).

Subsysteme ohne CV

E12.6 Subsysteme ohne CV											
Subsysteme ohne CV, also mit $\delta_{CV,s}^F = 0$ bzw. $\delta_{ND,s}^F = 100\%$, wurden in jeder Systemgeneration mit AV oder PV neuentwickelt.											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
2	7	0	11	2	5	10	2	1	1	2	0

In zehn Fallstudien fielen Subsysteme in diese Kategorie. Dabei bedeutet ein subsystembezogener CV-Anteil von $\delta_{CV,s}^F = 0$ nicht zwangsläufig, dass gar keine

Elemente übernommen wurden. Mit einem detaillierteren Systemmodell ließen sich sehr wahrscheinlich auch innerhalb dieser Subsysteme CV-Anteile identifizieren. Ähnlich PV-dominierten Subsystemen (E12.5) können diese Subsysteme für die kontinuierliche Realisierung von neuem und verbessertem Nutzen über Systemgenerationen hinweg zentral sein, wie die *Software* in den Fallstudien iPhone und Mi Ultra zeigt.

7.5.4 Variationsmuster auf Subsystem-Ebene

Für die Identifikation von Variationsmustern auf Subsystem-Ebene wurden die Abfolge von Variationsarten und die Herkunft der zugrunde liegenden RSE analysiert.

Weiterentwicklung mit gleichbleibendem Lösungsprinzip – Grundevolution

M02.1	Weiterentwicklung mit gleichbleibendem Lösungsprinzip – Grundevolution
: {→} CV/AV :	

Mit CV oder AV basierend auf RSE aus der vorangegangenen Systemgeneration bleibt das Lösungsprinzip erhalten. Dieses Muster wird analog zur Produktprofil-Grundevolution (M01.2) als Grundevolution bezeichnet.

M02.2 Direkt aufeinanderfolgende CV											
{→} CV {→} CV											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
13	3	3	0	1	0	0	0	6	24	3	5

Das Muster M02.2 trat 58-mal verteilt über acht Fallstudien und 47 Subsysteme auf. 41 der 47 Subsysteme waren CV-dominierte Subsysteme. Während Subsysteme ohne Neuentwicklung (E12.3) eher selten auftraten, kamen kurze oder längere Phasen ohne Neuentwicklung relativ häufig vor. Subsysteme, die Schnittstellen zu Systemen außerhalb der betrachteten Systemgrenze waren, wurden häufig über mehrere Generationen bis zu einem neuen Standard übernommen (z. B. *Anschlüsse* iPhone und Mi Ultra, *Eingangs- und Ausgangs-Schnittstelle* UE Boom, *USB-Anschluss* SEW DTS). Ein begünstigender Faktor für das Muster war Standardisierung (THS-G, SEW DTS, Falcon, Ariane).

Vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft kann dieses Muster zukünftig an Relevanz gewinnen, da durch geplante CV von Subsystemen über mehrere Systemgenerationen das Wieder- und Weiterverwendungspotenzial steigt (Tusch et al., 2025).

M02.3 Direkt aufeinanderfolgende AV												
{→} AV {→} AV												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
19	10	6	12	2	5	5	0	6	3	2	0	

Das Muster trat 70-mal verteilt über zehn Fallstudien auf. Gründe waren fortlaufende Optimierung oder Anpassung der Ausprägung an ein wiederholt weiterentwickeltes Produktprofil. Beispiele für Anpassung der Ausprägung an ein wiederholt geändertes Produktprofil waren die Gestaltung von Maschinenelementen in den Getrieben VW DCT und THS-G passend zum maximalen Eingangsdrehmoment. Beispiele für andauernde Optimierung waren die *Batterien* des iPhones und des Mi Ultra, die *Treiber* der UE Boom, oder die *Heizplatte* der letzten Systemgenerationen des Thermomix.

Auftreten neuer Lösungsprinzipien

In diesem Unterkapitel wurde untersucht, nach welchen Mustern PV oder linienexterne RSE in Subsystemen nach der G_1 auftraten – also neue Lösungsprinzipien in die Evolution eingebracht wurden.

M03.1 Direkt aufeinanderfolgende PV für schnelle Weiterentwicklung oder Reaktion auf Misserfolg												
{→} PV {→} PV												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
6	1	3	8	3	3	6	4	1	4	3	3	

In jeder Fallstudie kam mindestens eine wiederholte Neuentwicklung durch PV oder linienexterne RSE vor, insgesamt 45-mal. In den meisten Fällen folgten danach wieder AV oder CV, in einigen Fällen wurde die Folge über mehr als zwei Systemgenerationen fortgesetzt.

Dieses Muster trat zum einen bei schneller Weiterentwicklung eines Subsystems auf. Hoher Innovationsdruck, wie beispielsweise durch negatives Kundenfeedback zu den *Sensoren* der G_1^{iPhone} und $G_2^{\text{iPhone, 3G}}$, oder gezielter Technology-Push, wie

beim *Reuse-Konzept* der $G_3^{\text{SpaceX, Falcon 9}}$ und $G_4^{\text{SpaceX, Falcon 9 FT}}$ waren Gründe für diese schnelle Weiterentwicklung. Ein weiterer Grund waren nicht erfolgreiche neue Lösungsprinzipien, die nach ihrer Einführung in der darauffolgenden Systemgeneration wieder geändert werden mussten. So wurde beispielsweise das in der $G_{11}^{\text{Xiaomi, 11 Ultra}}$ eingeführte kleine Display auf der Rückseite in der $G_{12}^{\text{Xiaomi, 12 S Ultra}}$ wieder entfernt.

M03.2 Grundevolution zwischen PVs

$\{*\} \text{ PV} / \{le\}^*V :: \{\rightarrow\} \text{ CV} / \text{AV} :: \{*\} \text{ PV} / \{le\}^*V$

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
44	1	10		6	15	9	6	5	2	8	9

Beim Großteil der Subsysteme mit mehr als einer PV oder linienexternen RSE über die Evolution traten die PVs nicht direkt aufeinanderfolgend, sondern unterbrochen durch Grundevolution (M02.1) auf. Neu eingeführte Lösungsprinzipien wurden also über einige Systemgenerationen beibehalten und dann erweitert oder durch ein neues Lösungsprinzip abgelöst. Dieses Muster kann im Modell der Technologie-S-Kurve (vgl. Kapitel 2.4.1) als Sprung zu einer neuen S-Kurve auf Subsystemebene nach fortlaufender Optimierung des Lösungsprinzips angesehen werden. So wurde beispielsweise das *Gehäuse* des iPhones in den Systemgenerationen $G_4^{\text{iPhone, 4}}$, $G_8^{\text{iPhone, 6/Plus}}$, $G_{11}^{\text{iPhone, X}}$ und $G_{14}^{\text{iPhone, 12 Pro/Max \& 12/mini}}$ grundlegend verändert und in den Systemgenerationen dazwischen nur leicht angepasst.

M03.3 PV nach mehreren CV – neue Lösungsprinzipien für (quasi) standardisierte Subsysteme

$:: \{\rightarrow\} \text{ CV} :: \{*\} \text{ PV} / \{le\}^*V$

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
9								1	4		1

Das Muster trat 15-mal verteilt über vier Fallstudien auf und stellt einen Sonderfall von M03.2 dar, bei dem Subsysteme vor einer PV nicht weiterentwickelt wurden. So wurden beispielsweise im Fallbeispiel SEW DTS die *Lenkrollen* zweimal mit PV weiterentwickelt, nachdem sie über mehrere Systemgenerationen übernommen wurden.

Weiterentwicklung von neuen Lösungsprinzipien

In diesem Kapitel wurde untersucht, wie sich neue Lösungsprinzipien auf Subsystemebene weiterentwickelten. Direkt aufeinanderfolgende PV kam 45-mal vor und wurde bereits unter M03.1 diskutiert. Neben diesem Fall wurden neue Lösungsprinzipien 58-mal mit CV (M04.1) und 92-mal mit AV weiterentwickelt, davon 58-mal ohne anschließende CV (M04.2) und 34-mal mit anschließender CV (M04.3).

M04.1 Neues Lösungsprinzip wird mit CV weiterentwickelt – erfolgreiche Einführung eines neuen Lösungsprinzips											
{*} PV/ {le}*V {→} CV											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
21		8		5	1		2	1	14	1	5

M04.1 kann als erfolgreiche Einführung eines neuen Lösungsprinzips interpretiert werden. Damit das neuentwickelte Subsystem in der folgenden Systemgeneration übernommen werden konnte, waren gleichbleibende oder standardisierte Schnittstellen (z. B. modularer Aufbau der SEW DTS und Ariane, standardisiertes Rundzellenformat der BYD Batterie) und/oder konsequentes Aufbauen auch auf weiteren RSE der Vorgängergeneration notwendig (THS-G, iPhone, Thermomix, Google Glass, Falcon, UE Boom). Im Falle der $G_3^{VW DCT, DQ381}$ wurde die mit PV entwickelte Lagerung (vorgespannte, angestellte Stützlagerung hin zur Fest-Los-Lagerung) in nachfolgenden Getrieben übernommen und breitete sich sogar auf weitere Wellen aus.

M04.2 Neues Lösungsprinzip wird mit AV weiterentwickelt – fortlaufende Anpassung der Ausprägung notwendig											
{*} PV/ {le}*V : {→} AV : {→} AV/PV											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
15	2	3	6	1	8	10	3	5		5	

Dieses Muster trat auf, wenn über die Evolution keine CV im Subsystem vorkam (z. B. PlayStation) oder weitere Anpassung der Ausprägung für die nachfolgenden Systemgenerationen notwendig war, z. B. eine Vergrößerung der Batterie-Kapazität nach Einführung einer neuen Zellchemie in der $G_1^{UE Boom, WB 1}$ oder die Vergrößerung der Leistung der Heizplatte des Thermomix nach der Integration in den Mixtopf in der $G_6^{Thermomix, TM6}$.

M04.3**Neues Lösungsprinzip wird mit AV weiterentwickelt und dann übernommen**

$$\{*\} PV / \{le\} * V ||: \{\rightarrow\} AV : || \{\rightarrow\} CV$$

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
6		2	9		2			5	3	5	2

Mit diesem Muster wurden die Ausprägung eines neuen Lösungsprinzips über wenige Systemgenerationen weiter optimiert, bis das Subsystem schließlich „ausentwickelt“ war und in kommenden Systemgenerationen übernommen wurde. So wurde beispielsweise die *Stufentrennung* der SpaceX Falcon von der $G_{1_SpaceX, Falcon 1}$ zur $G_{2_SpaceX, Falcon 9}$ skaliert und in den folgenden Systemgenerationen übernommen.

M04.4**Neues Lösungsprinzip wird nicht wieder als RSE verwendet – Sackgassen-PV**

$$\{*\} PV / \{le\} * V | \{*\} * V$$

iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
		4	4					1	1		1

In elf Fällen verteilt auf fünf Fallstudien wurden Subsysteme mit neuem Lösungsprinzip in den folgenden Systemgenerationen nicht weiter als RSE verwendet. Dieses Muster trat zum einen in Produktvarianten auf, für die es im betrachteten Zeitraum keinen direkten Nachfolger gab. Beispiele waren die $G_{3_THS-G, L310}$, die außerhalb der TNGA ein 4-stufiges Automatikgetriebe einführt, und die $G_{2_VW DCT, DQ200}$, deren Nachfolger für höhere Drehmomente keine separate Welle mehr für den Rückwärtsgang verwendeten. Das Muster trat auch beim *Kühlsystem* der $G_{4_BYD Batterie, qinpro}$ auf, dessen Prinzip nicht weiterentwickelt wurde. Stattdessen wurde in der $G_{5_BYD Batterie, yuanEV}$ das Kühlsystem der $G_{3_BYD Batterie, qinDM}$ als RSE verwendet. Werden Subsysteme mit neuem Lösungsprinzip nicht wieder als RSE verwendet, können nachfolgende Systemgenerationen nicht vom aufgetragenen Entwicklungsaufwand profitieren, die PV endet bildlich gesprochen in einer „Sackgasse“. Das Phänomen, dass ein solches Subsystem nach mehreren Systemgenerationen doch wieder als RSE herangezogen wird, wird in Kapitel 7.6.1 behandelt.

7.6 Referenzsystem

Das Referenzsystem als Ausgangsbasis für Variation des technischen Systems und des Produktprofils kann in der Produktentwicklung aus dem zugänglichen Wissen theoretisch beliebig zusammengestellt werden (vgl. Kapitel 5.1) – im Gegensatz zur natürlichen Evolution, in der lediglich die Gene der Elterngeneration Ausgangspunkt für die Variantenentstehung sind. Ein zentrales Charakteristikum von Referenzsystemelementen mit Auswirkung auf Kosten, Risiko und Innovationspotenzial ist deren Herkunft. Abbildung 7.32 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Kategorien für die Herkunft von RSE sowie die Verteilung der Kategorien im gesamten Datensatz und in den jeweiligen Fallstudien.

In diesem Kapitel werden die Referenzsysteme fallübergreifend insbesondere hinsichtlich der Herkunft der RSE analysiert und Heuristiken als Unterstützung für die Zusammenstellung von Referenzsystemen abgeleitet. Diese können beispielsweise in Kombination mit dem RSE Identification Atlas (Kempf et al., 2023) bei der Identifikation von RSE zur Reduzierung von Kosten und Risiken und der Maximierung des Innovationspotenzials unterstützen. Eine Übersicht der Theoriebausteine ist in Tabelle 7.7 dargestellt.

Tabelle 7.7: Überblick über die Theoriebausteine zum Referenzsystem.

Nr.	Kap.	Beschreibung	Anwendung
H22	7.6.1	Mehrere Generationen zurückliegende RSE für PV	Unterstützung bei der Zusammenstellung von Referenzsystemen – gut kombinierbar mit dem RSE Identification Atlas (Kempf et al., 2023).
H23		Kontinuierlicher RSE Speicher	
H24	7.6.2	Wettbewerber und deren Evolution subsystembezogen als RSE-Quellen verstehen	
H25	7.6.3	Integration neuer Standards	
E13		Etablierung eigener Standards als Wettbewerbsvorteil	
H26	7.6.5	RSE aus anderen Branchen für Invention nutzen	
H27	7.6.5	Interne Evolutionen über die Referenzsysteme koppeln	Produktlinienübergreifendes Referenzsystem-Management
H28	7.6.6	Externe RSE zu internen machen zur Senkung des Wissensdefizits	Geht über die Produktentwicklung hinaus - Unternehmensstrategie

H	Heuristik	E	Einzelfall-Erkenntnis
----------	-----------	----------	-----------------------

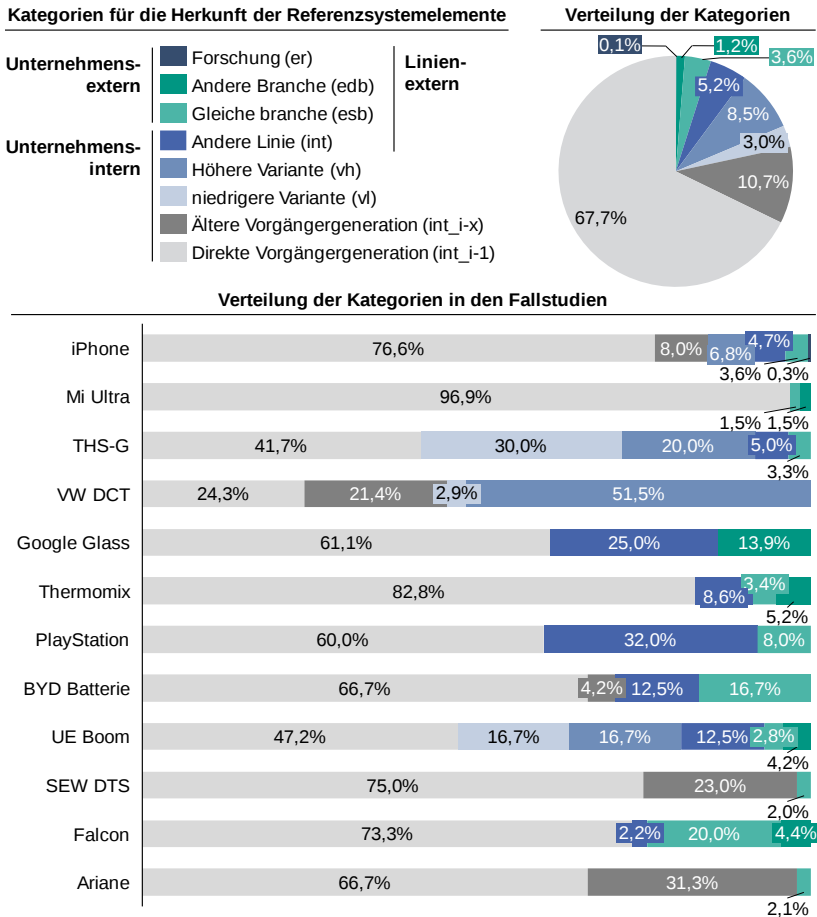


Abbildung 7.32: Überblick über die Kategorien für die Herkunft der Referenzsystemelemente und Verteilung der Kategorien im Datensatz und in den Fallstudien.

7.6.1 RSE aus älteren Vorgängergenerationen und für zukünftige Systemgenerationen

Bei der Entwicklung von Produktvarianten und der Entwicklung mit Standardisierungsmethoden kam es prinzipbedingt vor, dass RSE aus älteren Vorgängergenerationen als der direkten Vorgängergeneration $G_{i=n-1}$ verwendet wurden. Standardisierung wurde bereits in Kapitel 7.3.4 betrachtet und die Entwicklung von Produktvarianten wird in Kapitel 7.7 näher analysiert. In sieben Fällen verteilt über fünf Systemgenerationen und drei Fallstudien wurden auch darüber hinaus mehrere Generationen zurückliegende interne RSE verwendet. Während H22 den Blick aus der Perspektive der $G_{i=n}$ auf die zurückliegenden Systemgenerationen zeigt, nimmt H23 die Perspektive einer $G_{i=n}$ (Abbildung 7.33) auf die weiteren in Planung und Entwicklung befindlichen Systemgenerationen $G_{i=n+x}$ ein.

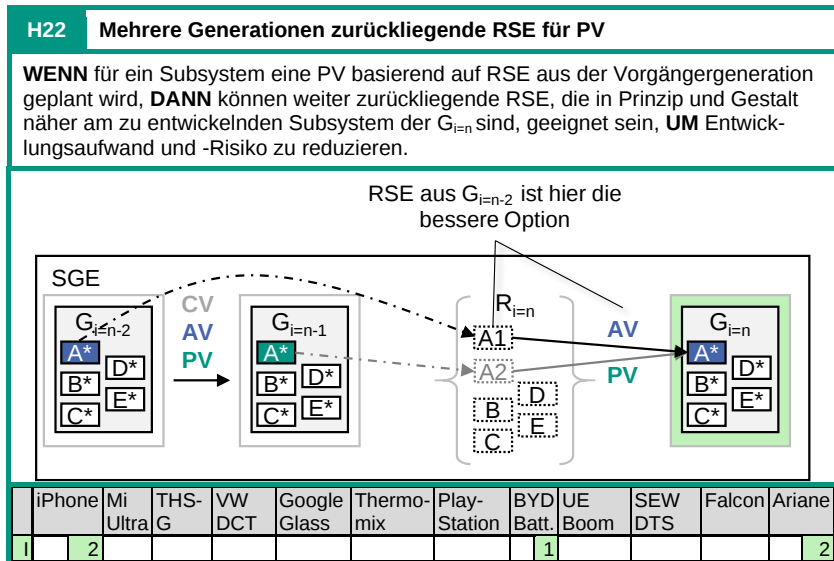


Abbildung 7.33: H22: Mehrere Generationen zurückliegende RSE für PV.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H22 werden kurz zusammengefasst:

- Ariane:** In der G_7^{Ariane} , 5 ECA₁ wurde für die Entwicklung der kryogen betriebenen *Stufe 2 Motoren* und des zugehörigen *Treibstoffs* auf RSE aus der G_4^{Ariane} , 4 zurückgegriffen, die zuletzt über eine kryogene Stufe 2 verfügte. Bei der

$G_{10}^{\text{Ariane, 62 \& 64}}$ wurden analog RSE aus der $G_7^{\text{Ariane, 5 ECA}}$ statt der direkten Vorgängergeneration verwendet.

- **BYD Batterie:** Für das Kühlsystem der $G_5^{\text{BYD Batterie, yuanEV}}$ wurde ein RSE aus der $G_3^{\text{BYD Batterie, qinDM}}$ verwendet. Das Prinzip aus der $G_4^{\text{BYD, qinpro}}$ wurde nicht weiterverfolgt (Sackgassen-PV, M04.4).
- **iPhone:** Bei der Entwicklung des Vibrationsmotors änderte Apple in der $G_5^{\text{iPhone, 4S}}$ das Lösungsprinzip von einer einfachen rotierenden Unwucht zu einem Linearoszillator. Die $G_6^{\text{iPhone, 5}}$ verwendete wieder das Prinzip der rotierenden Unwucht aus der $G_4^{\text{iPhone, 4}}$. In der $G_8^{\text{iPhone, 6/6 Plus}}$ wurde dann der *Vibrationsmotor* der $G_5^{\text{iPhone, 4S}}$ wieder als RSE aufgegriffen und weiterentwickelt.

Die Fallbeispiele in H22 können auch so interpretiert werden, dass in allen Fällen die nicht weiterverwendeten, aber zur Verfügung stehenden RSE für mehrere Systemgenerationen gespeichert wurden, um in einer zukünftigen Systemgeneration eingesetzt zu werden.

H23

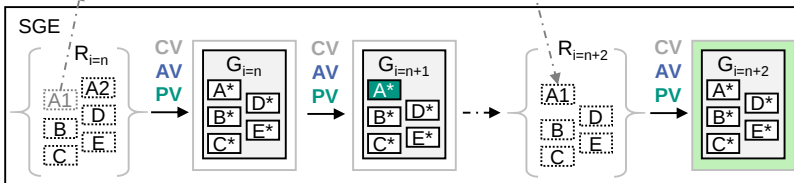
Nicht verwendete RSE nachverfolgbar halten durch einen kontinuierlichen RSE Speicher

WENN zur Verfügung stehende RSE nicht als Basis für die Entwicklung genutzt werden, **DANN** sollten diese über einen kontinuierlichen RSE Speicher nachverfolgbar abgelegt werden, **UM** zukünftig geplant oder bei Bedarf eingesetzt werden zu können.

Unternehmen



Kontinuierlicher RSE Speicher



	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
1		2						1				2

Abbildung 7.34: H23: Nicht verwendete RSE nachverfolgbar halten durch einen kontinuierlichen RSE Speicher.

7.6.2 RSE aus dem Wettbewerbsumfeld

Wie in Kapitel 5.1 bereits diskutiert, wird das Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme in dieser Arbeit für die Evolution eines technischen Systems und dessen Produktprofils im Zentrum genutzt und kann theoretisch auf die parallele Betrachtung mehrerer Unternehmen ausgeweitet werden. Neben dem Wettbewerbsdruck als mikroökonomischen Umfeldfaktor (siehe Kapitel 7.2.3) wurden in den Fallstudien RSE aus dem Wettbewerbsumfeld berücksichtigt.

RSE kamen dabei sowohl von horizontalen Wettbewerbern als auch von vertikalen Wettbewerbern. **Horizontale Wettbewerber** decken ähnliche Produktprofile mit ähnlichen technischen Systemen ab (z. B. BYD Batterie vs. Tesla Batterie), wodurch diese RSE bei Zugang zu den Informationen oder durch Reverse Engineering Subsysteme aus der Vorgängergeneration als RSE quasi substituieren können. Auch **vertikale Wettbewerber**, die ein ähnliches Produktprofil oder einen Teil des Produktprofils mit unterschiedlichen technischen Systemen und Geschäftsmodellen decken (z. B. Vorwerk Thermomix vs. Herd, Küchenmaschine, Stabmixer, Küchenwaage) wurden als Quelle für RSE verwendet. Daraus wurde H24 (Abbildung 7.35) abgeleitet.

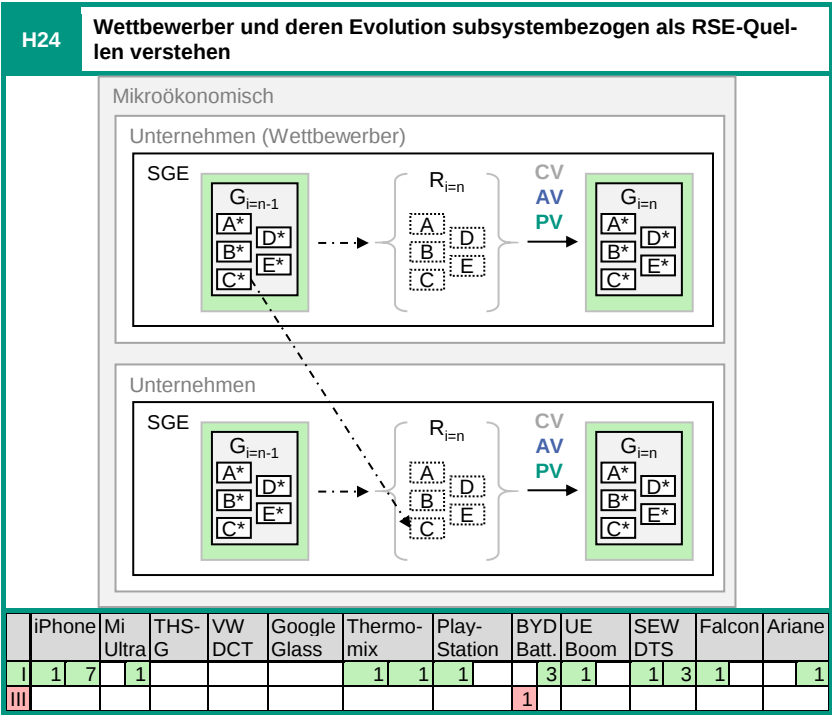


Abbildung 7.35: H24: Wettbewerber und deren Evolution subsystembezogen als RSE-Quellen verstehen.

Heuristik H24 ist keine neue Erkenntnis. Benchmarking mit Wettbewerbern auf Funktions- und Subsystem-Ebene wird z. B. im QFD verwendet (Saatweber, 2016). Wettbewerber, wie in H24 vorgeschlagen, als „natürlichen“ Bestandteil der Evolution und Quelle für RSE zu sehen, kann die Perspektive von einem Analyse-Fokus hin zu einem Synthese-Fokus schärfen. Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H24 werden kurz zusammengefasst:

- iPhone:** Apple nutzte für die Entwicklung der G_1^{iPhone} in fünf von 13 Subsystemen RSE aus dem Wettbewerb (Samsung CPU, ZEISS Kamera aus Nokia N90 sowie existierende Lösungen für Mobilfunk und Vernetzung, Vibrationsmotor und Lautsprecher). Im weiteren Verlauf der Evolution wurden die Kamera, der Vibrationsmotor, das Display und Mobilfunk und Vernetzung mit RSE aus dem Wettbewerb, insbesondere Samsung-Smartphones, weiterentwickelt.

- **Mi Ultra:** Bei der Entwicklung des *Vibrationsmotors* der $G_{10}^{\text{Xiaomi, Ultra}}$ diente das Subsystem aus der parallelen Systemgeneration des iPhones als RSE.
- **Thermomix:** Für die schrittweise Weiterentwicklung des für den Thermomix charakteristischen Produktprofils „Kombination des Nutzens mehrerer technischer Systeme in einem“ (H13.1) dienten für die Subsysteme *Heizplatte* und *Waage* Küchengeräte aus dem vertikalen Wettbewerb als RSE.
- **PlayStation:** Die $G_1^{\text{PlayStation, PS1}}$ nutzte für *Gehäuse*, *Speicherung* und *I/O-Schnittstelle* Subsysteme aus Wettbewerber-Konsolen als RSE.
- **BYD Batterie:** Für die Entwicklung der *Zellen* in der $G_4^{\text{BYD Batterie, qinpro}}$ und der *Struktur* der $G_5^{\text{BYD Batterie, yuanEV}}$ wurden Subsysteme von Tesla-Batteriesystemen als RSE verwendet. In der $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ diente das *Kühlsystem* des Toyota Prius als Basis. Bei der Einführung der *Cell-to-Pack-Struktur* der $G_6^{\text{BYD Batterie, han}}$ dienten ebenfalls Subsysteme von Wettbewerbern als RSE.
- **UE Boom:** Logitech baute bei der Entwicklung der $G_1^{\text{UE Boom, Boom 1}}$ für *Rahmen* und *Bedienschnittstelle* auf frühen Bluetooth-Lautsprechern von Wettbewerbern auf.
- **SEW DTS:** Bei der Einführung neuer Subsysteme auf Ebene 2 in den Subsystemen auf Ebene 1 – *Bedienelemente*, *Information* und *Ladungshandling* – wurden in den ersten vier analysierten Systemgenerationen RSE aus Wettbewerbsprodukten verwendet.
- **Falcon:** Bei der Entwicklung der $G_1^{\text{SpaceX, Falcon 1}}$ baute SpaceX bei sieben von neun Subsystemen auf RSE aus dem Wettbewerb auf.
- **Ariane:** Die *Stufe 1 Motoren* der $G_{10}^{\text{Ariane, 62\&64}}$ wurden basierend auf den Motoren der Avio Vega Rakete entwickelt.

7.6.3 RSE aus und für Standards

Technische Standards entwickelten sich ebenfalls parallel zu den analysierten Evolutionen weiter und waren in zwölf Systemgenerationen verteilt auf vier Fallstudien Quelle für RSE. Die tatsächliche Anzahl liegt sehr wahrscheinlich noch viel höher. RSE aus Standards hatten ihren Ursprung innerhalb und außerhalb der Branche:

- Standards betrafen eine **branchenübergreifende** Technologie und wurden im externen Umfeld weiterentwickelt (z. B. Mobilfunkstandards, Kommunikationsprotokolle und Standard-Schnittstellen in der Fallstudie iPhone oder *Speicher-Technologien* in der Fallstudie PlayStation)
- Standards etablierten sich **innerhalb einer Branche** (z. B. *Flugcomputer* und *Navigation* in der Fallstudie Falcon)

In den Fallstudien sind folgende Strategien vorgekommen, um mit neuen Standards umzugehen:

- **Nutzung** neuer Standards aus dem Umfeld als RSE (iPhone bei Mobilfunkstandards und Kommunikationsprotokollen) bzw. Nutzung aktueller Standards bei G₁-Entwicklung (G₁^{Falcon, 1} bei *Flugcomputern und Navigation*, G₁^{PlayStation, PS1} bei CD-ROM)
- Eigene Lösungen als **Standard etablieren** (PlayStation bei Blu-ray)
- Gezielte **Nichtnutzung** und Etablierung Anbieter-eigener Lösungen (iPhone bei Schnittstellen-Standard Lightning statt USB-C)

Die ersten beiden Strategien erwiesen sich als erfolgreich und sorgten in einigen Fällen für USPs, wenn ein neuer Standard einen Hauptnutzen im Produktprofil erst ermöglichte (3D-Grafik durch CD-ROM bei der G₁^{PlayStation, PS1}). Die dritte Strategie wirkte sich nicht negativ auf den Erfolg des iPhones aus, wurde jedoch von Kunden kritisiert. Daraus wurden H25 und E13 abgeleitet.

H25 Integration neuer Standards												
WENN neue Standards als RSE verfügbar sind, DANN sollten diese ins Referenzsystem aufgenommen werden, UM Wettbewerbern keine einfache Differenzierung über die Umsetzung von Standards zu ermöglichen.												
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I	1	7			1		1				1	
IV		1										

E13 Etablierung eigener Standards als Wettbewerbsvorteil												
Eigene Entwicklungen als Industriestandard zu etablieren und so als RSE für andere Unternehmen verfügbar zu machen kann Wettbewerbsvorteile bringen (z. B.: Marktmacht, Lizenz- und Einnahmemöglichkeiten, Image-Gewinn, Skaleneffekte).												
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane	
							1					

7.6.4 RSE aus anderen Branchen

Neben Wettbewerbern und Standards im näheren Umfeld des eigenen Unternehmens entwickeln sich auch Unternehmen und technische Systeme in anderen Branchen weiter. Deren Evolution scheint auf den ersten Blick unabhängig

zu sein. RSE aus anderen Branchen waren aber in 14 Fällen verteilt über zehn Systemgenerationen und fünf Fallstudien Ausgangspunkt für Variation.

RSE aus anderen Branchen und das mit ihnen verknüpfte Wissen sind weit vom Entwicklungsteam entfernt. Bis auf die Ausnahmen der $G_{i=1}$ -Entwicklung, in denen keine anderen RSE zur Verfügung standen (H06) und der Weiterentwicklung der Architektur (H16), waren branchenexterne RSE immer nur für einen Teil des betrachteten Subsystems Ausgangspunkt und in 12 von 14 Fällen mit PV verbunden. Externe RSE waren also Ausgangspunkt und Inspiration für neue Lösungsprinzipien und neuen Nutzen mit potenziellem Alleinstellungsmerkmal in der Branche, waren aber mit tendenziell hohen Kosten und Risiken verbunden. Aus diesen Fällen wurde H26 abgeleitet.

H26 RSE aus anderen Branchen für Invention nutzen												
RSE aus anderen Branchen können Ausgangspunkt für Invention durch neue Lösungsprinzipien und Nutzen mit Alleinstellungsmerkmal in der Branche sein. Die Integration ist mit tendenziell hohem Aufwand und hohem Risiko verbunden.												
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermomix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I						1	3		1	1		2
III		1			1				1			

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H26 werden kurz zusammengefasst:

- Google Glass:** In der $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ basierte der *Rahmen* auf handelsüblichen Sehhilfen. Die *Lautsprecher* nutzten in der $G_1^{\text{Google Glass, Explorer Ed.}}$ das noch relativ junge Prinzip der Knochenleitung aus Sportkopfhörern und in der $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$ dann wieder klassische dynamische Lautsprecher. In der $G_3^{\text{Google Glass, Enterprise Ed.}}$ wurden weiterhin für die Entwicklung der *Schnittstelle* und der *CPU* branchenexterne RSE genutzt.
- Mi Ultra:** Xiaomi nutzt seit der $G_{12}^{\text{Mi Ultra, 12S}}$ im Rahmen einer Entwicklungspartnerschaft Kamerasysteme des Kamera-Traditionsherstellers Leica als RSE. Auch wenn die $G_{12}^{\text{Mi Ultra, 12S}}$ als nicht erfolgreich eingeordnet wurde, kann das branchenexterne RSE bzw. die Kooperation als erfolgreich angesehen werden.
- Thermomix:** Vorwerk nutzte für die Einführung neuer Subsysteme in der $G_5^{\text{Thermomix, TM21}}$ (*Dampfgaraufsatz*) und in der $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$ (*Anbindung zur Online-Kochplattform*) branchenexterne RSE. Die $G_6^{\text{Thermomix, TM31}}$ führte einen Reluktanzmotor im *Antriebssystem* ein, der aus anderen Anwendungsbereichen bekannt war.
- Falcon:** Bei der Entwicklung des *Reuse Systems* nutzte SpaceX RSE aus der zivilen und militärischen Luftfahrt.

- UE Boom:** Die G₁^{UE Boom, Boom 1} nutzte für den Formfaktor des Gehäuses Trinkflaschen als RSE. Bei der Entwicklung der Dockingstation in der G₃^{UE Boom, Boom 3} wurden Dockingstationen und in der G₁^{UE Boom, M-Boom 1} Beschleunigungssensoren aus der Smartphone-Branche als RSE verwendet.

7.6.5 Interne RSE aus anderen Linien (linienextern)

Linienexterne, interne RSE waren Ausgangspunkt für Variation bei 65 Variationen verteilt über 23 Systemgenerationen und acht Fallstudien. Quellen für linienexterne, unternehmensinterne RSE waren technische Systeme anderer Linien im Produktportfolio und andere als interne Herkunft klassifizierte Unternehmen.

H27 Interne Evolutionen über die Referenzsysteme koppeln

Die Evolution von Produkten innerhalb des Portfolios eines Unternehmens oder einer Unternehmensgruppe kann systematisch über die Referenzsysteme gekoppelt werden, **UM** produktlinienübergreifend Innovationspotenzial durch neue Lösungsprinzipien und niedrigeren Kosten und geringerem Risiko durch möglichst niedrige Neuentwicklungsanteile basierend auf linienexternen RSE zu realisieren.

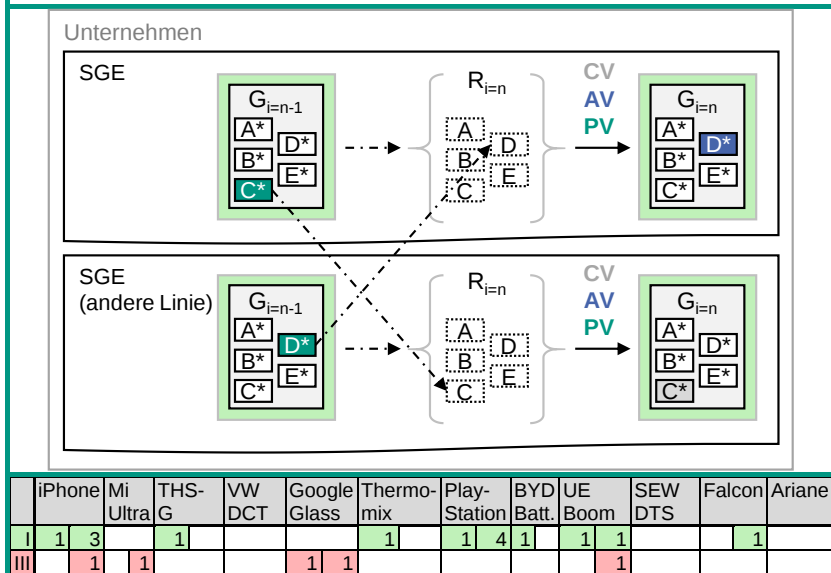


Abbildung 7.36: H27: Interne Evolutionen über die Referenzsysteme koppeln.

Diese Kopplung der Referenzsysteme wurde im Zuge der Generalisierung des Modells der PGE hin zum Modell der SGE erstmals in Albers, Kürten et al. (2022) als Konzept eingeführt. Aufgrund der hohen Anzahl linienexterner, interner RSE werden im Folgenden nur einige Beispiele aus dem Datensatz genannt. Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H27 werden kurz zusammengefasst:

- **Technische Systeme anderer Linien im Produktportfolio:** BYD baute bei der $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ für die *Struktur* auf einem Benzintank und für *Zellen* sowie *BMS* auf den im Unternehmen hergestellten Smartphone-Batterien auf. Apple nutzte für die $G_4^{\text{iPhone, 4}}$ und $G_5^{\text{iPhone, 4s}}$ angepasste *CPUs* aus dem iPad.
- **Vorentwicklungsprojekte:** Toyota nutzte bei der Entwicklung der $G_1^{\text{THS-G, Komp, P110}}$ RSE aus mehreren Vorentwicklungsprojekten.
- **Andere als intern klassifizierte Unternehmen:** Sony **kooperierte** bei der Entwicklung von *CPU* und *GPU* über die Evolution mit verschiedenen Zulieferern (LSI, AMD, IBM, Toshiba). Apple **übernahm** mehrere Unternehmen als RSE-Quelle: Fingerworks (RSE für das *Display* in der G_1^{iPhone}), AuthenTec (RSE für den Fingerabdruck-Sensor in der G_7), PrimeSense (RSE für den Face-ID-Sensor $G_{11}^{\text{iPhone, x}}$).

Ein Risiko, das bei der Aufnahme von RSE aus anderen Produktlinien besteht, zeigte die Fallstudie iPhone. In der $G_8^{\text{iPhone, 6/Plus}}$ wurde das flache Aluminiumgehäuse des iPad Air mit AV auf den Formfaktor des iPhones angepasst, was in zu instabilen Gehäusen und dem „Bendgate“ resultierte. Bei AV sollte demnach die Kritikalität der Anpassung einer Parameterausprägung auch bei der Verwendung interner RSE beachtet werden.

7.6.6 Externe RSE zu internen machen

Anbieter in den Fallstudien gingen strategisch unterschiedlich mit der Evolution technischer Systeme im Umfeld um. Fallübergreifend konnte beobachtet werden, dass insbesondere die Internalisierung von RSE eine erfolgreiche Maßnahme war. Durch diese Internalisierung wurden RSE näher an das Entwicklungsteam gebracht und so das Wissensdefizit und damit Risiko und Aufwand reduziert. Daraus wurde H28 (Abbildung 7.37) abgeleitet.

H28 Externe RSE zu internen machen zur Senkung des Wissensdefizits

Durch strategische Partnerschaften mit Zulieferern, branchenexternen Unternehmen und Wettbewerbern sowie der Übernahme von Technologieunternehmen können externe RSE zu internen gemacht werden, **UM** das Wissensdefizit und damit Entwicklungsrisiko und -Aufwand zu reduzieren.

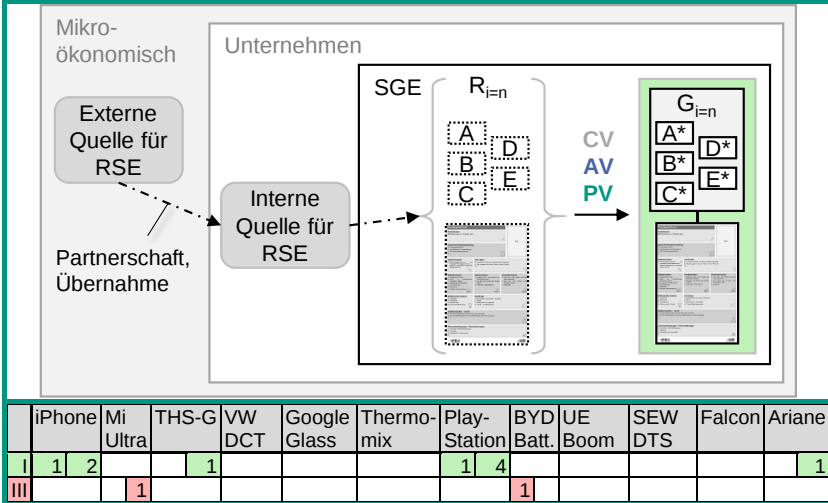


Abbildung 7.37: H28: Externe RSE zu internen machen zur Senkung des Wissensdefizits.

Bei der Neuordnung der Kraftmaschinen in der $G_5^{\text{THS-G, P610}}$ profitierte Toyota von RSE aus Getrieben des **Zulieferers** und strategischen Partners Aisin. Auch Sony ging, wie oben erwähnt, Partnerschaften mit Zulieferern für CPU- und GPU-Entwicklung ein.

Partnerschaften mit **Wettbewerbern** verliefen weniger geradlinig:

- **PlayStation:** Ein Ausgangspunkt für die Entwicklung der $G_1^{\text{PlayStation}}$ war eine gescheiterte Kooperation mit Nintendo bei der Entwicklung eines CD-ROM-Laufwerks. Aus der Perspektive von Sony konnte über das CD-Laufwerk hinaus Wissen zu weiteren Konsolen-RSE gesammelt werden. Aus der Perspektive von Nintendo realisierte sich durch die Kooperation ein Risiko und Sony wurde vom Partner zum Wettbewerber.
- **iPhone:** Apple kooperierte vor der Entwicklung der $G_1^{\text{iPhone, iPhone}}$ mit dem späteren Wettbewerber Motorola bei der Entwicklung des iTunes kompatiblen

Motorola ROKR E1 und sammelte so erste Erfahrung in der Entwicklung von Mobiltelefonen.

- **Ariane:** Avio war als Teil des Ariane-Konsortiums früher Partner, ist zum Zeitpunkt der Entwicklung der $G_{10}^{\text{Ariane, 62\&64}}$ aber selbstständiger Wettbewerber.

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Partnerschaft mit **branchenexternen Unternehmen** zur Internalisierung von RSE ist die Kooperation von Xiaomi mit Leica ab der $G_{12}^{\text{Mi Ultra, 12S}}$.

Beispiele für die **Akquise von Technologieunternehmen** gab es in den Fallstudien iPhone und BYD. Vor der Entwicklung der $G_1^{\text{BYD Batterie, F3DM}}$ übernahm BYD den chinesischen Automobilbauer Xian Qinhuan Automobile und sicherte sich so neben Zugang zu RSE auch die in China notwendige Lizenz zum Automobilbau. Neben der gezielten Nutzung von RSE aus dem Umfeld war auch der Schutz des eigenen geistigen Eigentums vor der Verwendung als RSE durch Wettbewerber, beispielsweise durch angepasste Patentstrategien wie im Fall der $G_7^{\text{Thermomix, TM5}}$.

7.7 Evolution von Produktvarianten

Mit der Entwicklung von $G_{i=1}$ -Systemgenerationen in Kapitel 7.2.3 wurde bereits die Entstehung neuer Produktlinien innerhalb bestehender Produktportfolios in etablierten Unternehmen und in Start-ups analysiert. In Kapitel 7.6.5 wurde untersucht, wie RSE aus anderen Produktlinien in die Referenzsysteme aufgenommen wurden. Dieses Kapitel widmet sich der Evolution mehrerer Produktvarianten innerhalb einer Produktlinie. Von den 12 Fallstudien wurden in sechs Fallstudien – iPhone, THS-G, VW DCT, UE Boom, SEW DTS und Ariane – mehr als eine Produktvariante untersucht, wobei die Fallstudie SEW DTS mit kundenindividuellen, teilweise unikalen technischen Systemen einen Sonderfall darstellt.

Für die Analyse der Evolution von Produktvarianten wird ein Konzept zur Modellbildung aus der Graphentheorie² eingeführt. Die Systemgenerationen mit ihrem zugehörigen Referenzsystem können, wie in Abbildung 7.38 dargestellt, als Knoten eines Graphen modelliert werden. Die Beziehung zwischen den Knoten –

² Die Grundlagen und Begriffe der Graphentheorie werden beispielsweise in Fricke und Overhagen (2025) zusammengefasst.

die Weitergabe von RSE von einer Systemgeneration in das Referenzsystem einer anderen Systemgeneration – kann als gerichtete Kante modelliert werden. Jeder Kante wird ein Gewicht gegeben, das der Anzahl der RSE entspricht, die von der Quelle (Systemgeneration 1, Produktvariante A) ins Referenzsystem einer oder mehrerer Systemgenerationen bzw. Produktvarianten (Systemgeneration 2, Produktvariante A und Systemgeneration 1, Produktvariante B) übertragen wurden.

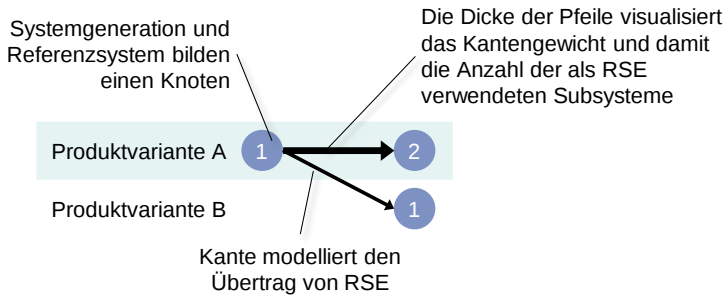


Abbildung 7.38: Gewichtete Kanten im Beschreibungsmodell.

Zusätzlich werden zur Analyse zwei Größen der Graphentheorie verwendet: Der Eingangsgrad und der Ausgangsgrad, die wiederum bezogen auf die Anzahl der Subsysteme einer Systemgeneration als relativer Eingangsgrad und relativer Ausgangsgrad bezeichnet werden. Die Größen werden in den Formeln 7.5, 7.6 und 7.7 eingeführt.

Für einen Knoten K heißt das Gesamtgewicht der Kanten, die K als Endknoten haben,

$$\text{Eingangsgrad von } K: \text{grad}_-(K), \quad 7.5$$

das Gesamtgewicht der Kanten, die K als Anfangsknoten haben,

$$\text{Ausgangsgrad von } K: \text{grad}_+(K). \quad 7.6$$

Im Kontext der Evolution technischer Systeme heißt

$$\text{grad}_{-,rel}(K) \frac{\text{grad}_-(K)}{|S_i|} \quad \text{relativer Eingangsgrad und} \quad 7.7$$

$$\text{grad}_{+,rel}(K) \frac{\text{grad}_+(K)}{|S_i|} \quad \text{relativer Ausgangsgrad}$$

mit $|S_i|$ der Anzahl aller Subsysteme der G_i des Knoten K .

Abbildung 7.39 zeigt die resultierenden Graphen für die Fallstudien mit mehr als einer Produktvariante. Mithilfe dieser Graphen ließen sich im Folgenden die Fallstudien fallübergreifend analysieren.

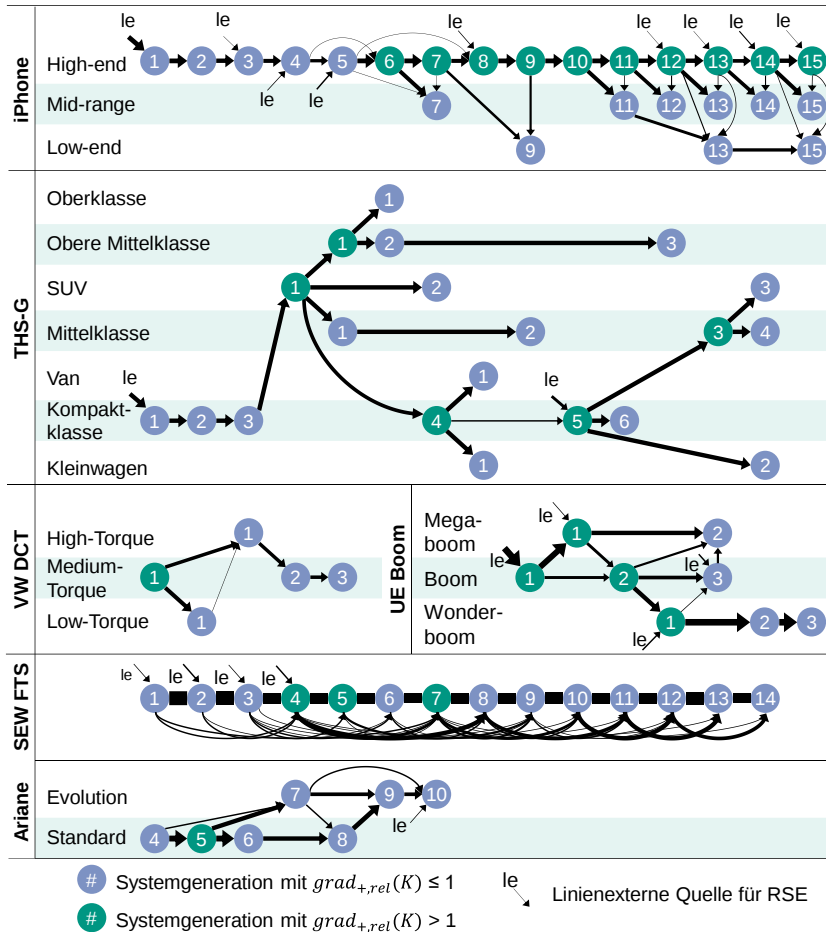


Abbildung 7.39: Graphen zu den Fallstudien im Vergleich.

Aus der fallübergreifenden Analyse wurden zwei Phänomene näher untersucht und Theoriebausteine dazu abgeleitet, die in Tabelle 7.8 dargestellt sind:

- Leitvarianten-Systemgenerationen mit $grad_{+,rel}(K) > 1$
- Entstehung neuer Produktvarianten

Tabelle 7.8: Überblick über die Theoriebausteine zur Evolution von Produktvarianten und deren Anwendung in der Produktentwicklung.

Nr.	Kap.	Beschreibung	Anwendung
E14	7.7.1	A) PV über klare Leitvarianten-Systemgenerationen vs. B) PV über alle Produktvarianten	Aufbauend auf E14 kann eine Strategie zur Einführung neuer Lösungsprinzipien über
H29		Hoch-PV-Systemgenerationen als Leitvarianten-Systemgenerationen planen	Leitvarianten hinweg definiert und im Falle von E14 A) mit H29 unterstützt werden
E15	7.7.3	Produktvarianten bilden sich nach und nach über die Evolution aus.	Produktvarianten vorausschauend evolutionär planen
H30	7.7.4	PV für neuen Nutzen in höher eingeordneten Produktvarianten	Unterstützung bei der Entwicklung neuer, höher eingeordneter Produktvarianten
H31	7.7.5	Unterlegene, dafür preisgünstige niedriger eingeordnete Produktvariante	Unterstützung bei der Entwicklung neuer, niedriger eingeordneter Produktvarianten – insbesondere, um interne Kannibalisierung zu vermeiden und trotzdem kaufentscheidende Differenzierungsmerkmale zu bieten
H32		Gleichziehen im Hauptnutzen, sparen am Nebennutzen	
H33		Retro-Variante zur Steigerung der Kundenakzeptanz	
H34		Niedriger eingeordnete Produktvariante durch Skalierung von Leistungsmerkmalen	

H	Heuristik	H	Einzelfall-Heuristik	E	Weitere Erkenntnis
----------	-----------	----------	----------------------	----------	--------------------

7.7.1 Leitvarianten-Systemgenerationen

Leitvarianten-Systemgenerationen waren durch Weitergabe von mehr RSE, als sie selbst Subsysteme hatten, die Basis für die Entwicklung von mehr als einer weiteren Systemgeneration, was sich in einem relativen Ausgangsgrad $grad_{+,rel}(K) > 1$ äußerte. Auch Systemgenerationen mit einem relativen Ausgangsgrad

$grad_{+,rel} \leq 1$ haben vereinzelt RSE an mehr als eine Systemgeneration weitergegeben, z. B. die $G_7^{Ariane, 5 ECA}$, aber in Summe weniger als die Anzahl ihrer Subsysteme. Leitvarianten-Systemgenerationen hatten also eine überdurchschnittlich hohe Auswirkung auf die weitere Evolution des technischen Systems. In allen sechs Fallbeispielen mit mehr als einer Produktvariante kamen Leitvarianten-Systemgenerationen vor, die auf zwei Arten eingesetzt wurden, was in E14 zusammengefasst wird.

E14 A) PV über klare Leitvarianten-Systemgenerationen vs. B) PV über alle Produktvarianten												
A) Klare Leitvarianten-Systemgenerationen: Leitvarianten-Systemgenerationen wurden systematisch und regelmäßig eingesetzt, um neue Lösungsprinzipien einzuführen und diese über RSE an weitere Produktvarianten weiterzugeben. B) Keine klaren Leitvarianten-Systemgenerationen: Neue Lösungsprinzipien wurden eher Subsystem-weise und über alle Produktvarianten verteilt eingeführt und über RSE weitergegeben.												
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
A		10		5								
B				1					1	3	3	1

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu E14 werden kurz zusammengefasst:

- **iPhone:** In der Fallstudie iPhone waren immer High-End-Varianten Leitvarianten-Systemgenerationen. Alle Hoch-PV-Systemgenerationen waren Leitvarianten-Systemgenerationen (vgl. Abbildung 7.39).
- **THS-G:** In der Fallstudie THS-G gab es ebenfalls regelmäßige Leitvarianten-Systemgenerationen, welche jedoch über die Systemgenerationen in unterschiedlichen Produktvarianten lagen. Vier von fünf Leitvarianten-Systemgenerationen waren Hoch-PV-Systemgenerationen.
- In den Fallstudien **VW DCT**, **UE Boom**, **SEW DTS** und **Ariane** gab es keine klaren, regelmäßigen Leitvarianten-Systemgenerationen. Neue Lösungsprinzipien wurden eher Subsystem-weise eingeführt.

Mit dieser Erkenntnis kann H17 für die Entwicklung mehrerer Produktvarianten durch H29 konkretisiert werden.

H29

Hoch-PV-Systemgenerationen als Leitvarianten-Systemgenerationen planen

WENN klare Leitvarianten-Systemgenerationen geplant werden, **DANN** sollten die Hoch-PV-Systemgenerationen auch Leitvarianten-Systemgenerationen sein, **UM** neue Lösungsprinzipien als RSE für weitere Produktvarianten nutzbar zu machen und so Innovationspotenziale Produktvarianten-übergreifend zu nutzen und Kosten und Risiken zu senken.

	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
1		5		4								

Das **VW DCT** wurde über die Produktvarianten hinweg in **Systemgenerationen** entwickelt. Der einzige Ausreißer war die $G_1^{\text{VW DCT, LT, DQ200}}$ für niedrige Drehmomente, von der nur wenige RSE wieder in das darauffolgende $G_1^{\text{VW DCT, HT, DQ500}}$ übergeben wurden.

7.7.2 Übergreifender Charakter der Evolution von Produktvarianten

Neben der Unterteilung in E14 in klare Leitvarianten und eher Subsystem-weiser Einführung neuer Lösungsprinzipien lassen sich die Graphen in Abbildung 7.39 nicht einfach in Kategorien unterteilen. Für die untersuchten Fallbeispiele war der übergreifende Charakter der Evolution von Produktvarianten sehr unterschiedlich, weshalb kein fallübergreifender Theoriebaustein abgeleitet wurde:

- **iPhone:** In der Evolution des iPhone wurden alle Produktvarianten parallel im gleichen Jahrestakt, teilweise mit Pausen, weiterentwickelt und gleichzeitig oder leicht versetzt, aber immer noch unter dem Dach einer Systemgeneration, in den Markt eingeführt. Die niedriger eingeordneten Produktvarianten wurden basierend auf RSE aus vorangegangenen oder parallelen High-End-Varianten entwickelt, den Leitvarianten-Systemgenerationen. Ausnahmen waren die $G_{13}^{\text{iPhone, SE 2}}$ und die $G_{15}^{\text{iPhone, SE 3}}$, die auch RSE aus der Basis-Variante bzw. vorangegangenen Low-End-Variante nutzten. Niedriger eingeordnete Produktvarianten waren nie Quelle für die Entwicklung höher eingeordneter Produktvarianten.
- **THS-G:** Beim THS-G wurden die Produktvarianten zwischen den Leitvarianten eigenständig in Generationen weiterentwickelt. Die Abfolge der Leitvarianten-Systemgenerationen kann als überlagernde Systemgenerationsentwicklung verstanden werden. Dabei wurden RSE von den Leitvarianten-Systemgenerationen in die unmittelbar nachfolgenden Systemgenerationen in den Produktvarianten verteilt, dazwischen fand kein weiterer Austausch von RSE statt. Die Produktvarianten lassen sich weiter in Varianten ab der

Mittelklasse und unterhalb der Mittelklasse unterteilen. Diese entwickelten sich zwischen 2005 und 2017 weitgehend unabhängig voneinander.

- **VW DCT:** Das VW DCT wurde über die Produktvarianten hinweg in Systemgenerationen entwickelt. Der einzige Ausreißer war die $G_1^{VW\ DCT, LT, DQ200}$ für niedrige Drehmomente, von der nur wenige RSE wieder in das darauffolgende $G_1^{VW\ DCT, HT, DQ500}$ übergeben wurden.
- **UE Boom:** Die Evolution der UE Boom zeigt für die Basis- und Mega-Variante einen stark vernetzten Graphen mit sowohl innerhalb der Produktvarianten als auch übergreifend weitergegebenen RSE. Die Wonder-Variante wurde stark als eigenständige Produktvariante in Generationen weiterentwickelt.
- **SEW DTS:** Für die Evolution ab der $G_4^{SEW\ DTS}$ wurde keine Unterteilung in Produktvarianten vorgenommen. Jede Konfiguration nach Baukasten-Regelwerk kann als individuelle Systemgeneration und Produktvariante betrachtet werden. Subsysteme aus Vorgängergenerationen wurden als Bausteine des Baukastens als RSE verwendet.
- **Ariane:** In der Evolution der Ariane wurden RSE analog zur UE Boom sowohl innerhalb der Produktvarianten in Generationen als auch übergreifend weitergegebenen.

7.7.3 Entstehung neuer Produktvarianten

Über die Fallstudien hinweg wurden 13-mal neue Produktvarianten eingeführt. In allen Fällen bildeten sich die Varianten evolutionär heraus und standen nicht bereits ab der $G_{i=1}$ fest, woraus E15 abgeleitet wurde.

E15		Produktvarianten bilden sich nach und nach über die Evolution aus.											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane		
	2		6	2					2				1

Je nach Einordnung der Ursprungs-Variante wurden neue Produktvarianten hinsichtlich ihres Nutzens und ihres Preises höher oder niedriger als die Ursprungs-Variante eingeordnet.

7.7.4 Bildung höher eingeordneter Produktvarianten

In sieben Fällen dienten niedriger eingeordnete Produktvarianten als Ausgangspunkt für die erstmalige Einführung einer höher eingeordneten Produktvariante. Die Produktprofile der neu eingeführten, höher eingeordneten Produktvarianten wurden mit AV und PV weiterentwickelt. Daraus wurde H30 (Abbildung 7.40) abgeleitet.

H30 PV für neuen Nutzen in höher eingearordneten Produktvarianten

WENN eine höher eingearordnete Produktvariante entwickelt wird, **DANN** kann PV, mindestens in ausgewählten Subsystemen, für das technische System und AV/PV für das Produktprofil zielführend sein, **UM** die höher eingearordnete Produktvariante von der/den Ursprungs-Variante/Varianten durch neuen oder zusätzlichen Nutzen zu differenzieren.

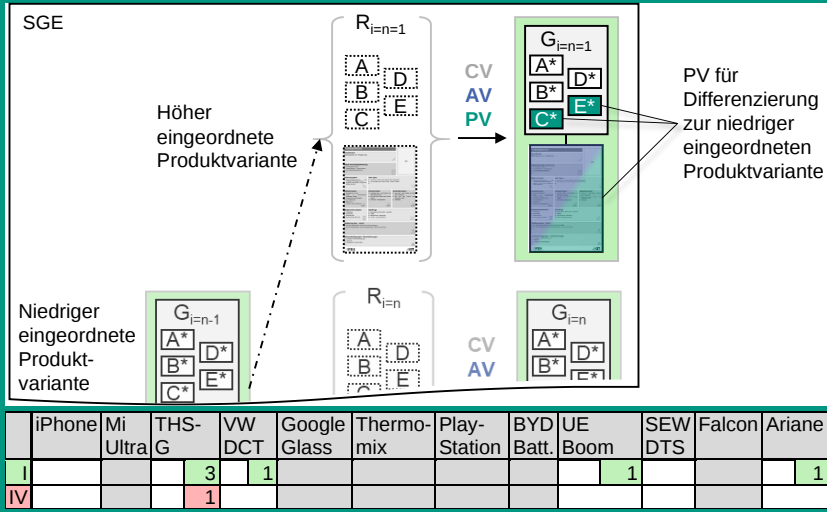


Abbildung 7.40: H30: PV für neuen Nutzen in höher eingearordneten Produktvarianten.

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H30 werden kurz zusammengefasst:

- THS-G:** Die $G_1^{\text{THS-G, SUV, P310}}$, die $G_1^{\text{THS-G, OMK, L110}}$ und die $G_1^{\text{THS-G, Luxus, L110F}}$ wurden basierend auf niedriger eingearordneten Produktvarianten mit PV Umfängen entwickelt. In der $G_1^{\text{THS-G, SUV, P310}}$ wurde der Kettentrieb durch eine effizientere und zuverlässigere Zahnradstufe ersetzt. Die $G_1^{\text{THS-G, OMK, L110}}$ ergänzte das Getriebe um einen Ravigneaux-Satz und die $G_1^{\text{THS-G, OK, L110F}}$ führte einen Allradantrieb über ein Torsen Differenzial ein. Die $G_1^{\text{THS-G, Van, P411}}$ stellt eine Ausnahme dar: Basierend auf der $G_4^{\text{THS-G, Komp, P410}}$ wurde die neue Van-Variante mit geringen Anpassungen an den Schnittstellen mit $\delta_{CV}^{\square} = 100\%$ realisiert. Dies war möglich, da die Anforderungen der Van- und Kompakt-Variante sehr nah beieinander lagen.
- VW DCT:** Die $G_1^{\text{VW DCT, HT, DQ500}}$ baute auf den Produktvarianten für niedrigere Drehmomente ($G_1^{\text{VW DCT, LT, DQ200}}$) und mittlere Drehmomente ($G_1^{\text{VW DCT, MT, DQ250}}$) auf und realisierte durch PV unter anderem ein neues Rückwärtsgang-Konzept.

- **UE Boom:** Die $G_1^{\text{UE Boom, M-Boom 1}}$ wurde basierend auf der mittleren Produktvariante $G_1^{\text{UE Boom, Boom 1}}$ durch Skalierung (AV) der Leistung und damit einhergehend der Größe sowie PV der *Bedienschnittstelle* (Geschwindigkeitssensor → Klopf Funktion) entwickelt.
- **Ariane:** Die erste Generation des Evolution-Programms und damit der höher eingeordneten Produktvariante $G_7^{\text{Ariane, SECA}}$ benötigte neben CV von RSE der niedriger eingeordneten Produktvariante PV des *Stufe 1 Motors* und der *Fahrzeuge Stufe 1 und 2*, um die höhere GTO-Nutzlast zu realisieren.

7.7.5 Bildung niedriger eingeordneter Produktvarianten

In sechs Fällen dienten höher eingeordnete Produktvarianten als Ausgangspunkt für die erstmalige Einführung niedriger eingeordneter Produktvarianten. Die Variantenbildung lief sehr individuell ab, weshalb hier lediglich auf potenziell übertragbare Einzelfälle eingegangen wird.

iPhone: Die erste niedriger eingeordnete Produktvariante des iPhone, die $G_7^{\text{iPhone, 5c}}$, nutzte, bis auf die *Software*, ausschließlich RSE aus der vorangegangenen Systemgeneration über CV und AV. Der einzige erweiterte Nutzen wurde über das in mehreren Farbvarianten angebotene Kunststoffgehäuse realisiert. Sieht man davon ab, war die $G_7^{\text{iPhone, 5c}}$ in allen Subsystemen der parallelen High-End-Variante und der Vorgängergeneration unterlegen. Differenzierung und Kaufanreiz sollten über einen niedrigeren Preis generiert werden, welcher sich letztendlich als nicht niedrig genug erwies und die Verkaufszahlen hinter den Erwartungen zurückbleiben ließ. Daraus wurde H31 (Abbildung 7.41) abgeleitet.

H31 Unterlegene, dafür preisgünstige Produktvariante

WENN eine niedriger eingeordnete Variante rein mit CV und AV auf Basis von RSE aus der Vorgängergenerationen gebildet wird, **DANN** sollte ein ausreichender Preisunterschied zu Vorgänger- und parallelen, höher eingeordneten Varianten vorliegen, **UM** ein Differenzierungsmerkmal zu realisieren.

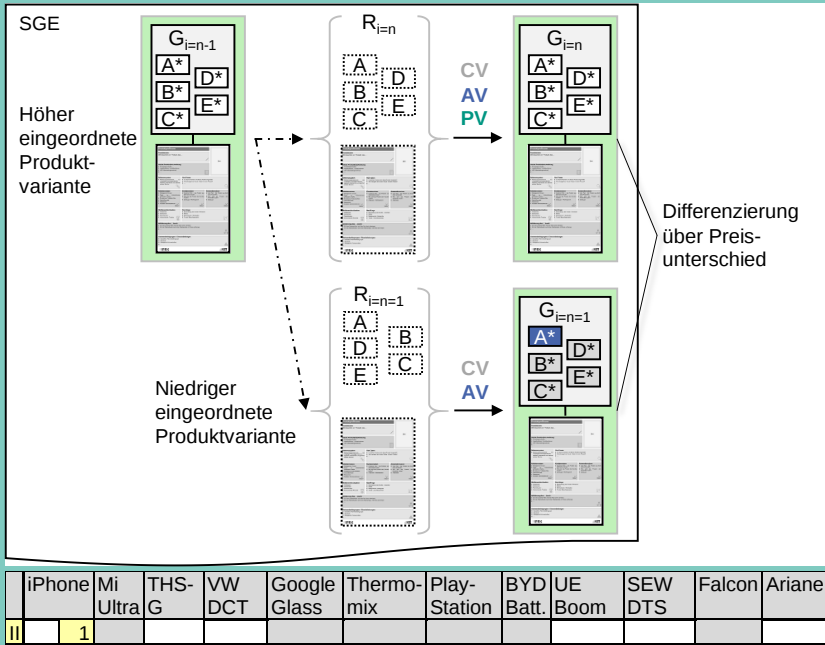


Abbildung 7.41: H31: Unterlegene, dafür niedriger eingeordnete Produktvariante.

iPhone: Die $G_9^{\text{iPhone, SE}}$ übernahm, anders als die zuvor gescheiterte $G_7^{\text{iPhone, 5c}}$, zentrale Subsysteme (z. B. CPU, Kamera) aus der parallelen, höher eingeordneten Produktvariante $G_9^{\text{iPhone, 6s/Plus}}$. Dafür wurde bei den übrigen Subsystemen auf RSE aus der Vor-Vorgängergeneration $G_7^{\text{iPhone, 5s}}$ zurückgegriffen, um Kosten zu reduzieren. Diese erfolgreiche Art der Variantenbildung wurde auch in den nächsten beiden SE-Generationen ($G_{13}^{\text{iPhone, SE}}$, $G_{15}^{\text{iPhone, SE}}$) beibehalten. Daraus wurde H32 (Abbildung 7.42) abgeleitet.

H32 Gleichziehen im Hauptnutzen, sparen am Nebennutzen

WENN eine niedriger eingeordnete Produktvariante mit CV und AV auf Basis von wenigen, den Hauptnutzen realisierenden RSE aus einer parallelen höher eingeordneten Produktvariante gebildet wird, **DANN** können die übrigen Subsysteme durch CV auf Basis von RSE aus älteren Systemgenerationen entwickelt werden, **UM** Kosten zu sparen.

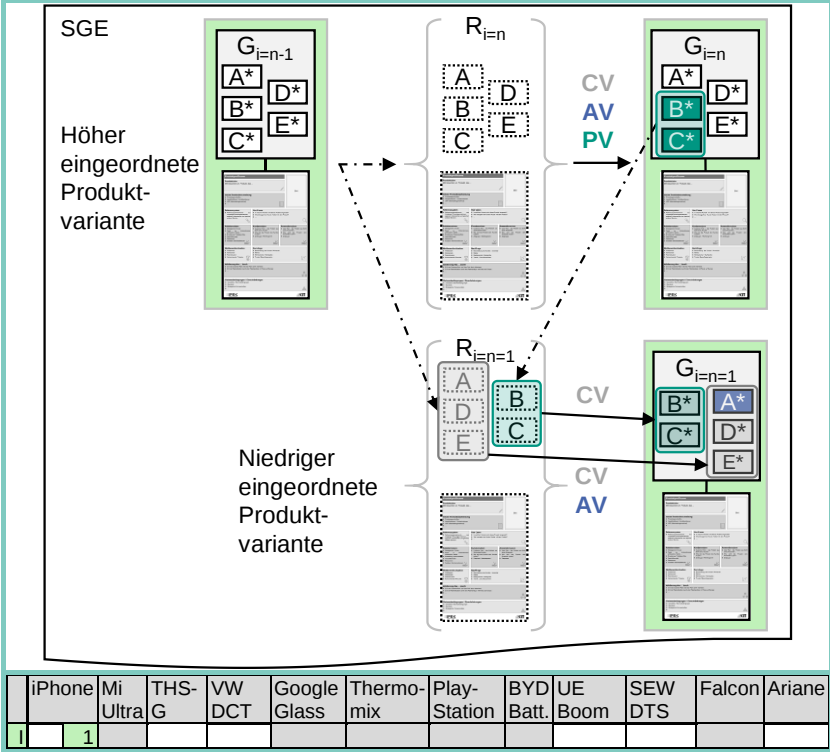


Abbildung 7.42: H32: Gleichziehen im Hauptnutzen, sparen am Nebennutzen.

Eine weitere Art der Bildung niedriger eingeordneter Produktvarianten aus der Fallstudie iPhone zeigte die $G_{11}^{\text{iPhone, 8/Plus}}$. Die parallele höher eingeordnete Produktvariante $G_{11}^{\text{iPhone, X}}$ war eine Hoch-PV-Systemgeneration mit vielen Neuerungen (z. B. Wegfall des Home-Buttons). Die niedriger eingeordnete Produktvariante verfolgte nicht nur das Ziel der Differenzierung über den Preis, sondern auch weniger aufgeschlossenen Kunden eine Retro-Variante mit bekanntem Bedienkonzept zu bieten. Daraus wurde H33 abgeleitet.

H33 Retro-Variante zur Steigerung der Kundenakzeptanz

WENN in der höher eingeordneten Produktvariante viele Neuerungen (Hoch-PV-Systemgeneration) eingeführt werden, **DANN** kann es sinnvoll sein, für weniger aufgeschlossene Kunden und Anwender eine Retro-Variante auf Basis von RSE aus älteren Systemgenerationen anzubieten, **UM** einer niedrigen Akzeptanz großer Änderungen zuvorzukommen.

	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I		1										

In drei Fallbeispielen wurden niedriger eingeordnete Produktvarianten durch die Skalierung von Leistungsmerkmalen gebildet, was in H34 zusammengefasst wird.

H34 Niedriger eingeordnete Produktvariante durch Skalierung von Leistungsmerkmalen

WENN eine niedriger eingeordnete Produktvariante für die Skalierung der Leistungsmerkmale nach unten benötigt wird, **DANN** können sowohl

- A) CV/AV bestehender als auch
- B) neue, ggf. einfachere und kostengünstigere Lösungsprinzipien (PV) zielführend sein.

	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
A				2						1		
B					1					1		

Die relevanten Aspekte der Fallstudien zu H34 werden kurz zusammengefasst:

- **THS-G:** Bei der Einführung der Van-Variante $G_1^{\text{THS-G, Van, P311}}$ übernahm Toyota bewährte Subsysteme aus der Mittelklasse-Variante $G_1^{\text{THS-G, MK, P310}}$ und änderte lediglich die Übersetzung des *Abtriebs zum Differenzial*. Bei der Entwicklung der ersten Kleinwagen-Variante, des $G_1^{\text{THS-G, Klein, P510}}$, wurde aufgrund der geringeren vom Verbrennungsmotor zur Verfügung gestellten Leistung das *Power Split Device (PSD)* kleiner ausgeführt.
- **VW DCT:** Während Toyota für die Entwicklung der niedriger eingeordneten Produktvarianten die Funktionsprinzipien beibehielt, vereinfachte VW für die

auf niedrigere Drehmomente ausgelegte $G_1^{VW DCT, LT, DQ200}$ die Architektur (7-Gang $\rightarrow$ 6-Gang) und den Großteil der Teilsysteme mit PV (z. B. von nasslaufenden, radial geschachtelten Lamellenkupplungen zu axial gestaffelten Einscheiben-Trockenkupplungen).

- **UE Boom:** Die auf der $G_2^{UE Boom, Boom 2}$ basierende $G_1^{UE Boom, W-Boom 1}$ kombinierte A) und B) – ein Großteil der Subsysteme wurde von der höher eingeordneten $G_2^{UE Boom, Boom 2}$ mit CV oder AV entwickelt. Das Lösungsprinzip der *Batterie* wurde von Lithium-Ionen auf LiFePO₄, basierend auf linienexternen RSE variiert und die *Bedienschnittstelle*, ausgehend von negativem Kundenfeedback, vereinfacht.

7.8 Ursachen für und Reaktionen auf Scheitern

Wie in Kapitel 6.2 angemerkt, ist eine Einschränkung des Datensatzes der „Survivor Bias“ durch den geringen Anteil nicht erfolgreicher Systemgenerationen. Die elf als nicht erfolgreich eingeordneten Systemgenerationen waren über fünf Fallstudien verteilt und werden im Folgenden näher untersucht. Die Ursachen für den Misserfolg von Innovationsversuchen bzw. neuen Systemgenerationen sind in der Regel nicht monokausal (Bauer, 2006). Tabelle 7.9 gibt einen Überblick für die in den Fallstudien als relevant identifizierten Ursachen des Scheiterns und ordnet diese den fünf Ursachen-Kategorien nach Bauer (2006) zu: 1. technische Probleme, 2. Konkurrenzsituation, 3. Fehleinschätzung der potenziellen Nutzer, 4. zu hoher Neuheitsgrad, 5. instabiles Produktumfeld (vgl. Kapitel 2.1.3).

Die Kategorien für gescheiterte Innovationsversuche nach Bauer lassen sich nur eingeschränkt auf die Misserfolge in den Fallbeispielen anwenden, da sich die Kategorien nach Bauer vor allem auf $G_{i=1}$ -Entwicklungen beziehen und die Entwicklung technischer Systeme in Generationen nicht explizit berücksichtigen. Aus der geringen Anzahl nicht erfolgreicher Systemgenerationen lassen sich keine neuen Kategorien für Ursachen für Misserfolg ableiten.

Tabelle 7.9: Ursachen des Scheiterns in den Fallstudien und Einordnung in die Ursachen-Kategorien nach Bauer (2006): 1) technische Probleme, 2) Konkurrenzsituation, 3) Fehleinschätzung der potenziellen Nutzer, 4) zu hoher Neuheitsgrad, 5) instabiles Produktumfeld

Generation	Fall-studie	Ursachen	Kategorie nach Bauer
G ₇ ^{iPhone, 5c}	iPhone	Interne Kannibalisierung: Niedriger eingeordnete Produktvariante mit geringerem Nutzen gegenüber höher eingeordneter Produktvariante, aber zu hohem Preis (Jacobsen, 2017).	(2), (3), (5)
G ₁₂ ^{iPhone, XS/Max}	iPhone	Interne Kannibalisierung: Zu geringe Differenzierung gegenüber Vorgängergeneration und paralleler, preislich attraktiverer niedriger eingeordneter Produktvariante (Su, 2018).	(2), (3), (5)
G ₁₂ ^{Xiaomi, 12S Ultra}	Mi Ultra	Markteinführung, Umfeld: Nicht international verfügbar (Huch, 2022).	5
G ₁ ^{Glass, Explorer Ed.} G ₂ ^{Glass, Explorer Ed. 2}	Google Glass	Produktprofil: Unklare Use-Cases und unklarer Kunden/Anwendernutzen (Kuhn & Bernau, 2014; Reynolds, 2015). Akzeptanz: Ablehnung der Technologie in der Gesellschaft (Beuth, 2014).	3
G ₄ ^{Glass, Enterprise Ed. 2}	Google Glass	Produktprofil: Kein breiter Kunden-/Anwendernutzen in der Industrie (Bezmalinovic, 2023). Invention: Innerhalb von 4 Jahren wurde keine weitere Generation veröffentlicht, Konkurrenz technologisch weiter (Bradshaw, 2023).	(3), 2
G ₁ ^{BYD, F3DM}	BYD Batterie	Markteinführung: BYD fasste Fuß in einer neuen Nische, die Verkaufszahlen der ersten Systemgeneration waren noch gering.	keine
G ₃ ^{UE, Boom 3} , G ₂ ^{UE, Megaboom 2} , G ₂ ^{UE, Wonderboom 2} , G ₃ ^{UE, Wonderboom 3}	UE Boom	Invention: Einzige echte Neuerung ab 2018 war die Einführung einer Docking-Station. Umfeld: Ab 2019 sank das Marktwachstum (gfu & GfK, 2021) und ab 2020 wirkte sich die Corona-Krise zusätzlich negativ aus (Logitech, 2024a).	(5)

Aus den individuellen Fällen und den erfolgreichen oder nicht erfolgreichen Reaktionen auf gescheiterte Systemgenerationen konnten die in Tabelle 7.10

aufgelisteten Theoriebausteine für Reaktionen auf das Scheitern früher und das Scheitern später Systemgenerationen abgeleitet werden.

Tabelle 7.10: Überblick über die Theoriebausteine zu Ursachen für und Reaktionen auf Scheitern und deren Anwendung in der Produktentwicklung.

Nr.	Kap.	Beschreibung	Anwendung
H35	7.8.1	Produktprofil-PV bei frühem Scheitern	Reaktion auf frühes Scheitern
E16	7.8.2	Ohne Invention kein Innovationspotenzial	Reaktion auf spätes Scheitern bzw. proaktives Verhindern
E17		Der internen Kannibalisierung mit H30–H34 entgegenwirken	

H	Einzelfall-Heuristik	E	Erkenntnis
----------	----------------------	----------	------------

7.8.1 Scheitern früher Systemgenerationen

Die G_1 BYD Batterie, F3DM, die G_1 Glass, Explorer Ed. und die G_2 Glass, Explorer Ed. 2 erreichten keine ausreichenden Verkaufszahlen. Die folgenden Systemgenerationen der BYD Batterie wurden langfristig zum Erfolg, die der Google Glass nach einem Teilerfolg in der G_3 Google Glass, Enterprise Ed. nicht. Aus dem Vergleich der beiden Fälle wird ersichtlich, dass Ursachenforschung beim Scheitern früher Systemgenerationen für die Maßnahmenwahl besonders wichtig ist. Das frühe Scheitern der G_1 BYD, F3DM ebnete den Weg zur Bildung einer neuen Nische, die G_1 Google Glass, Explorer Ed. und G_2 Google Glass, Explorer Ed. 2 scheiterten am Produktprofil ohne klaren Use-Case und Nutzen. Daraus wurde H35 abgeleitet.

H35 Produktprofil-PV bei frühem Scheitern												
WENN frühe Systemgenerationen am Produktprofil scheitern, DANN sollte das Produktprofil mit PV weiterentwickelt werden.												
	iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
I					1			1				

7.8.2 Scheitern später Systemgenerationen

Die G_4 Google Glass, Enterprise Ed. 2 konnte das neue Produktprofil der G_3 Google Glass, Enterprise Ed. nicht auf weitere Use-Cases erweitern und blieb zu lange ohne Neuerungen am Markt. Eventuell hätte Google den Teilerfolg der G_3 Google Glass, Enterprise Ed. durch weitere

Systemgenerationen und gezielte Weiterentwicklung des Produktprofils ausweiten können. Die nicht erfolgreichen Systemgenerationen der UE Boom nach 2018 wurden ebenfalls ohne nennenswerte neue Lösungsprinzipien und neuen Kunden/Anwendernutzen weiterentwickelt. Daraus wurde E16 in Abbildung 7.43 abgeleitet.

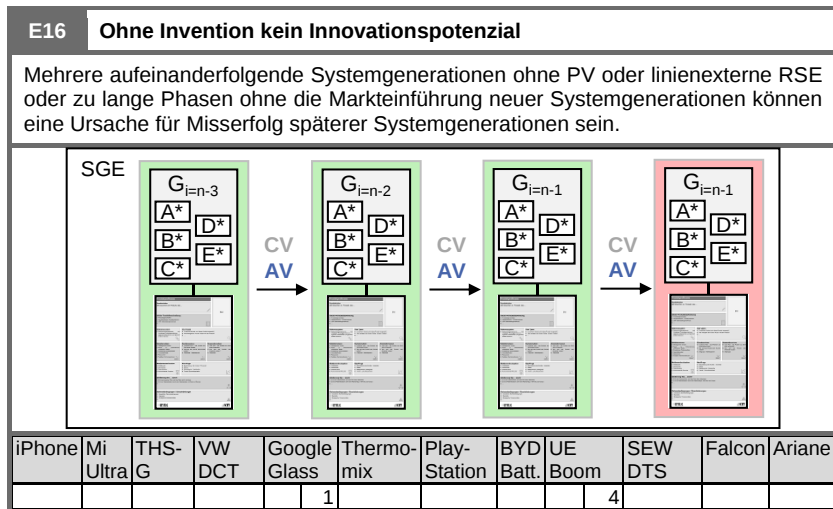


Abbildung 7.43: E16: Ohne Invention kein Innovationspotenzial.

Auf den Misserfolg der $G_7^{\text{iPhone, 5c}}$ reagierte Apple mit einer stärkeren Differenzierung der nächsten niedriger eingeordneten Produktvariante $G_9^{\text{iPhone, SE}}$ über den Preis (H31 und H32). Aus dem Misserfolg der High-End-Variante $G_{12}^{\text{iPhone, XS/Max}}$, die durch die parallele niedriger eingeordnete Produktvariante und die Vorgängergeneration kannibalisiert wurde, reagierte Apple mit klaren Alleinstellungsmerkmalen durch PV und linienexterne RSE in den folgenden High-End-Varianten (H30). Aus diesen beiden Fällen wurde E17 abgeleitet.

E17 Der internen Kannibalisierung mit H30–H34 entgegenwirken											
iPhone	Mi Ultra	THS-G	VW DCT	Google Glass	Thermo-mix	Play-Station	BYD Batt.	UE Boom	SEW DTS	Falcon	Ariane
	2										

7.9 Zwischenfazit

Ziel von Kapitel 7 als zentrales Ergebniskapitel dieser Arbeit war es, die Forschungsfragen FF2 und FF3 zu beantworten und das Forschungsziel zu erreichen. Dazu wurden aus der fallübergreifenden Analyse der zwölf Fallstudien aus Kapitel 6 insgesamt 79 Theoriebausteine – 14 Muster, 39 Heuristiken und 26 weitere Erkenntnisse – zu Zusammenhängen von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation synthetisiert und in das Beschreibungsmodell für die Evolution technischer Systeme aus Kapitel 5 eingeordnet.

Die Theoriebausteine beantworten Forschungsfrage **FF2**: *Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation und wie lassen sich diese Zusammenhänge erklären*, indem sie identifizierte Zusammenhänge aufzeigen und erklären.

Die Theoriebausteine adressieren Forschungsfrage **FF3**: *Wie kann das Wissen über diese Zusammenhänge in der Produktentwicklung für die Entwicklung von technischen Systemen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und niedrigem Risiko angewendet werden*, indem mögliche Entwicklungssituationen für die Anwendung in der Produktentwicklung und mögliche Auswirkungen auf Entwicklungszielgrößen beschrieben werden.

Eine abschließende Diskussion der Ergebnisse, ihrer Limitationen und ihres Beitrags zur Zielsetzung der Arbeit sowie des Forschungsvorgehens erfolgt nachfolgend im Gesamtfazit (Kapitel 8).

8 Zusammenfassung und Gesamtfazit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und die Ergebnisse sowie das Forschungsvorgehen diskutiert.

8.1 Motivation, Forschungsziel und Forschungsvorgehen

Produzierende Unternehmen sehen sich heute zunehmend mit einem durch Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität gekennzeichneten Umfeld konfrontiert – dem sogenannten VUKA-Umfeld des 21. Jahrhunderts (vgl. Kapitel 2.1). Um in diesem Umfeld zu bestehen und neue technische Systeme mit hohem Innovationspotenzial bei gleichzeitig geringen Kosten und geringem Risiko zu entwickeln, benötigen Produktentwickelnde neue methodische Unterstützung. Die systematische Produktplanung und Produktentwicklung mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers bietet hier großes Potenzial (vgl. Kapitel 2.2): Subsysteme neuer Systemgenerationen können gezielt durch Übernahmevariation und die Nutzung unternehmensinterner Referenzen entwickelt werden, wodurch sich Kosten und Risiken deutlich reduzieren lassen. Andere Subsysteme können hingegen durch Ausprägungs- oder Prinzipvariation sowie durch die Verwendung unternehmensexterner Referenzen entwickelt werden, um technische Systeme mit neuem Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen und hohem Innovationspotenzial zu realisieren.

Damit lässt sich die Problemstellung, Produkte mit hohem Innovationspotenzial und geringen Kosten und Risiken zu entwickeln, herunterbrechen: Referenzen und Variationsarten für Produktprofile und technische Systeme müssen passend für das zukünftige Umfeld und die Erreichung der Entwicklungsziele ausgewählt werden. Da technische Systeme in Generationen und in Produktportfolios entwickelt werden, gilt es, die Auswahl von Referenzen und Variationsarten generations- und portfolioübergreifend zu orchestrieren. Um die Auswahl von Variationen und Referenzen zu unterstützen, wird neues Wissen über die zugrunde liegenden Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation benötigt. Aus diesem Forschungsbedarf folgt die Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Kapitel 3):

Zielsetzung: Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, explorativ Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE nach Albers sowie Innovation zu identifizieren und zu erklären.

Sowohl die Beschreibung der Zusammenhänge als auch der Forschungsansatz dieser Arbeit wurden durch eine Analogie zur natürlichen Evolution motiviert: Technische Systeme befinden sich analog zu Populationen biologischer Organismen im „Survival of the fittest“ und müssen sich unter Innovations- bzw. Evolutionsdruck durch Variation an sich ändernde Umfeldbedingungen anpassen und sich gegen Konkurrenten durchsetzen. Der Ansatz der Technischen Vererbung nach Lachmayer et al. (2014) verdeutlicht das Potenzial der Evolutionsanalogie in der Entwicklungsmethodik, hat mit Nutzungsdaten und Optimierung jedoch einen anderen Fokus als die Zielsetzung dieser Arbeit. Andere Ansätze greifen meist nur Teilaspekte der Evolutionstheorie auf (vgl. Kapitel 2.4). Motiviert durch die Evolutionsanalogie wurde folgende Arbeitsthese als Leitlinie dieser Arbeit formuliert:

Arbeitsthese: Zusammenhänge zwischen Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation können analog zur Evolutionstheorie beschrieben und untersucht werden.

Mithilfe der Arbeitsthese wurden die folgenden Forschungsfragen (FF) zur Operationalisierung der Zielsetzung abgeleitet:

FF1: Welche Elemente und Relationen sind für ein Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme erforderlich?

FF2: Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation und wie lassen sich diese Zusammenhänge erklären?

FF3: Wie kann das Wissen über diese Zusammenhänge in der Produktentwicklung für die Entwicklung von technischen Systemen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und niedrigem Risiko angewendet werden?

Die in der Zielsetzung beschriebenen Zusammenhänge wurden bislang noch nicht systematisch untersucht, daher wurde in dieser Arbeit ein **induktiver, theoriebildender Forschungsansatz** zur explorativen Identifikation und Erklärung der Zusammenhänge gewählt (vgl. Kapitel 4.1). Als Forschungsmethode zum Aufbau eines Fallstudien-Datensatzes wurden, angelehnt an die Methode der theoriebildenden **Fallstudienforschung** nach Eisenhardt (1989), 12 retrospektive,

literaturbasierte Fallstudien zur Evolution technischer Systeme durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2.1), die in Tabelle 8.1 aufgelistet sind. Die Fallstudien wurden literaturbasiert durchgeführt, um in kurzer Zeit einen möglichst umfassenden Datensatz zu erhalten und retrospektiv, um über den Markterfolg gescheiterte Inventionen von Innovationen unterscheiden zu können.

Tabelle 8.1: Überblick über die Fallstudien.

Titel (Anbieter: Produkt)	Branche	Zeitraum	Generationen (Produktvarianten)	Subsysteme	Umfeld- faktoren
Apple: iPhone	Smartphones	2007-2023	26 (3)	13	108
Xiaomi: Mi Ultra	Smartphones	2020-2024	5	13	10
Toyota: Getriebe des Hybrid Synergy Drive	Automotive	1997-2020	20 (7)	3	92
Volkswagen: Doppelkupplungsgetriebe	Automotive	2003-2016	6 (3)	25-28	10
Google: Glass	Wearable	2014-2019	4	8	16
Vorwerk: Thermomix	Haushaltsgeräte	1971-2019	8	6-9	40
Sony PlayStation	Unterhaltungs- elektronik	1994-2020	5	9	29
BYD: Traktionsbatterie	Automotive	2008-2020	6	4	25
Ultimate Ears: Boom	Bluetooth-Lautsprecher	2013-2022	8 (3)	9	20
SEW: Fahrerloses Transportsystem	Maschinenbau	2018-2024	14	16-23	14
SpaceX: Falcon	Luft- und Raumfahrt	2008-2019	5	9	23
ArianeGroup: Ariane	Luft- und Raumfahrt	1998-2024	6 (2)	8	18

Zur **fallübergreifenden Analyse und Theoriesynthese** wurde ein fallbasierter, iterativer Ansatz (Corbin & Strauss, 1990; Eisenhardt, 1989) mit einem variablenbasierten Ansatz (Cash, 2018) kombiniert (vgl. Kapitel 4.2.2). Das gewählte Vorgehen erwies sich als geeignet, um die Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation explorativ zu identifizieren und sowohl theorie- als auch anwendungsgeleitet zu erklären.

8.2 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit lassen sich entlang der Forschungsfragen zusammenfassen und diskutieren. Zur Beantwortung von **Forschungsfrage FF1** und als Grundlage für das weitere Vorgehen der Arbeit wurden in Kapitel 5.1 Konstrukte aus dem Stand der Forschung zu Produktumfeld, Innovation und SGE – Systemgenerationsentwicklung den zentralen Konstrukten der Evolutionstheorie vergleichend gegenübergestellt und zu einem **Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme** integriert, das in Abbildung 8.1 dargestellt ist. Zentrale Elemente und Relationen in Analogie zur Evolutionstheorie sind:

- **Zentrum der Betrachtung:** Die Systemgeneration G_i wird als technisches System mit deren Produktprofil modelliert und steht im Zentrum der Evolution.
- **Anpassungsmechanismus und Wechselwirkung mit der Umwelt:** Die Systemgeneration G_i mit deren Produktprofil wird unter Innovationsdruck entwickelt und stellt sich nach der Markteinführung analog zur Selektion der natürlichen Evolution als Innovation oder gescheiterte Invention heraus. Umfeldfaktoren auf den drei Umfeld-Ebenen makroökonomisch, mikroökonomisch, unternehmensintern haben Einfluss auf die SGE. Unternehmen gestalten ihr mikroökonomisches Umfeld analog zur reziproken Kausalität der Erweiterten Synthese (EES) aktiv mit. Ein fundamentaler Unterschied im Anpassungsmechanismus ist der Mensch im Mittelpunkt der Produktentstehung, der als Teil des Handlungssystems das technische System entwickelt und produziert.
- **Informationsweitergabe an die nächste Generation:** Das Referenzsystem und dessen Elemente sind Ausgangspunkt für die Variationen. Über die Aufnahme von Referenzsystemelementen (RSE) aus externen und internen Quellen werden Informationen weitergegeben („vererbt“).
- **Variationsmechanismus:** Variation erfolgt gezielt durch Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation (CV, AV, PV) auf Subsystemebene.
- **Generationsübergreifende Evolution:** Technische Systeme und Produktprofile werden in Generationen entwickelt. Variationen kommen in verschiedensten Anteilen vor.
- **Makro-Evolution:** Variation und Informationsweitergabe gelten auch auf höheren Ebenen des Produktportfolios.

Die einzelnen Elemente und Relationen werden in Kapitel 5.1 ausführlich erklärt.

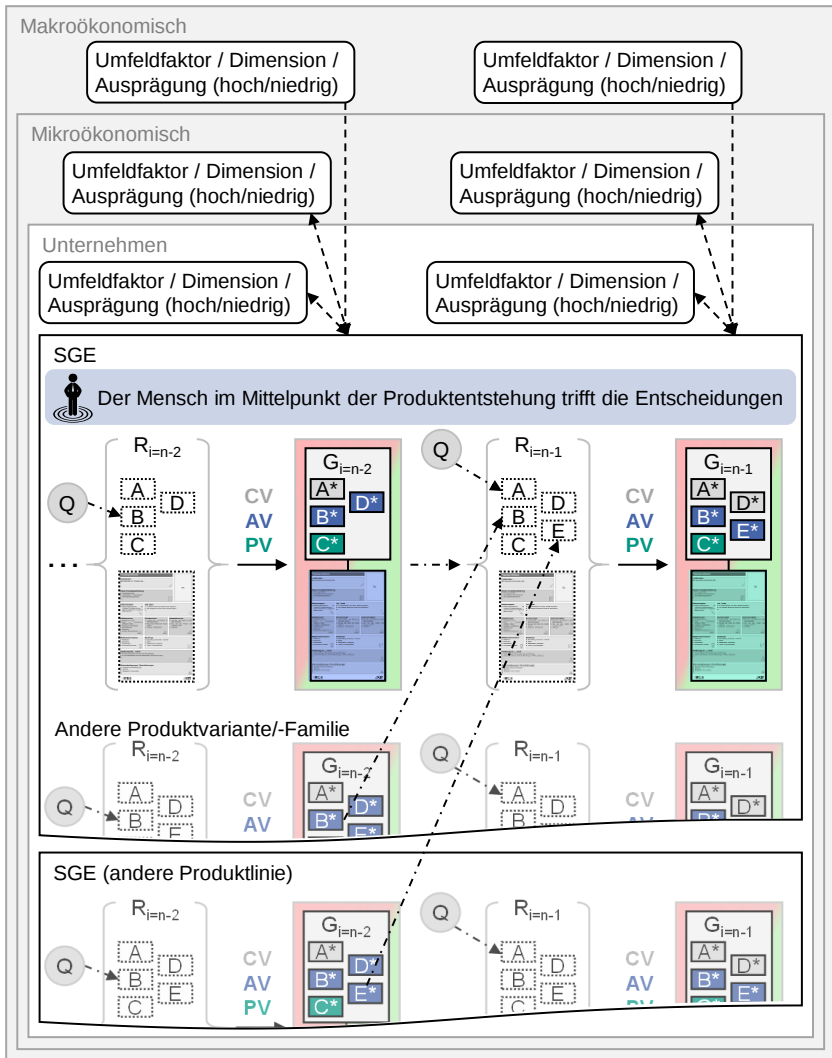


Abbildung 8.1: Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme mit zentralen Elementen und Relationen. Dargestellt ist die im Rahmen der Arbeit gezeigte retrospektive Anwendung – das Modell kann theoretisch auch für die Beschreibung geplanter zukünftiger Systemgenerationen angewendet werden.

Mit der Entity-Relationship-Modellierungsmethode (Chen, 1976) wurde das Beschreibungsmodell in Kapitel 5.2 in ein **Datenmodell** überführt, das sich als Grundlage für den Aufbau des Fallstudien-Datensatzes bewährte.

Durch die Fallstudien konnte gezeigt werden, dass das auf der Evolutionsanalogie basierende Beschreibungsmodell der Evolution technischer Systeme und das daraus abgeleitete Datenmodell grundsätzlich dazu geeignet sind, die Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation zu beschreiben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die retrospektive Anwendung gezeigt. Das Modell kann theoretisch auch für die Beschreibung geplanter zukünftiger Systemgenerationen angewendet werden. Die in Kapitel 5.3 aufgeführten pragmatischen Verkürzungen des Beschreibungsmodells stellen Limitationen dar und können Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschung sein. Das Datenmodell wurde für die Excel-basierte Umsetzung in dieser Arbeit entwickelt und sollte für den Aufbau einer SQL-basierten relationalen Datenbank weiter normalisiert werden.

Forschungsfrage FF2 wurde durch die Fallstudien in Kapitel 6 und die fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese in Kapitel 7 durch ein Vorgehen mit vier Stadien beantwortet (vgl. Kapitel 4.2.2). Ergebnis sind 79 **Theoriebausteine** für Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation, die sich weiter in 14 Muster, 39 Heuristiken und 26 weitere Erkenntnisse unterteilen lassen. Die Theoriebausteine wurden in das Beschreibungsmodell als theoretisches Rahmenwerk für die Evolution technischer Systeme eingeordnet, was in Abbildung 8.2 im Gesamtzusammenhang dargestellt wird. **Forschungsfrage FF3** wurde parallel zu Forschungsfrage FF2 in Kapitel 7 beantwortet. Die Theoriebausteine wurden so formuliert, dass sie sich für die Entwicklung von Produktprofilen und Systemkonzepten in der Frühen Phase der Produktentwicklung mit dem Integrationsbereich der Strategischen Produktentwicklung eignen. Dabei wurden auf Grundlage der Literatur Prämisse 1 (Musterbasierte Ansätze sind geeignet), Prämisse 2 (Variationsarten und Herkunft von RSE sind Schlüsselfaktoren für Kosten und Risiko) und Prämisse 3 (induktiv hergeleitete Zusammenhänge gelten grundsätzlich auch für die zukünftige Entwicklung) als wahr angenommen.

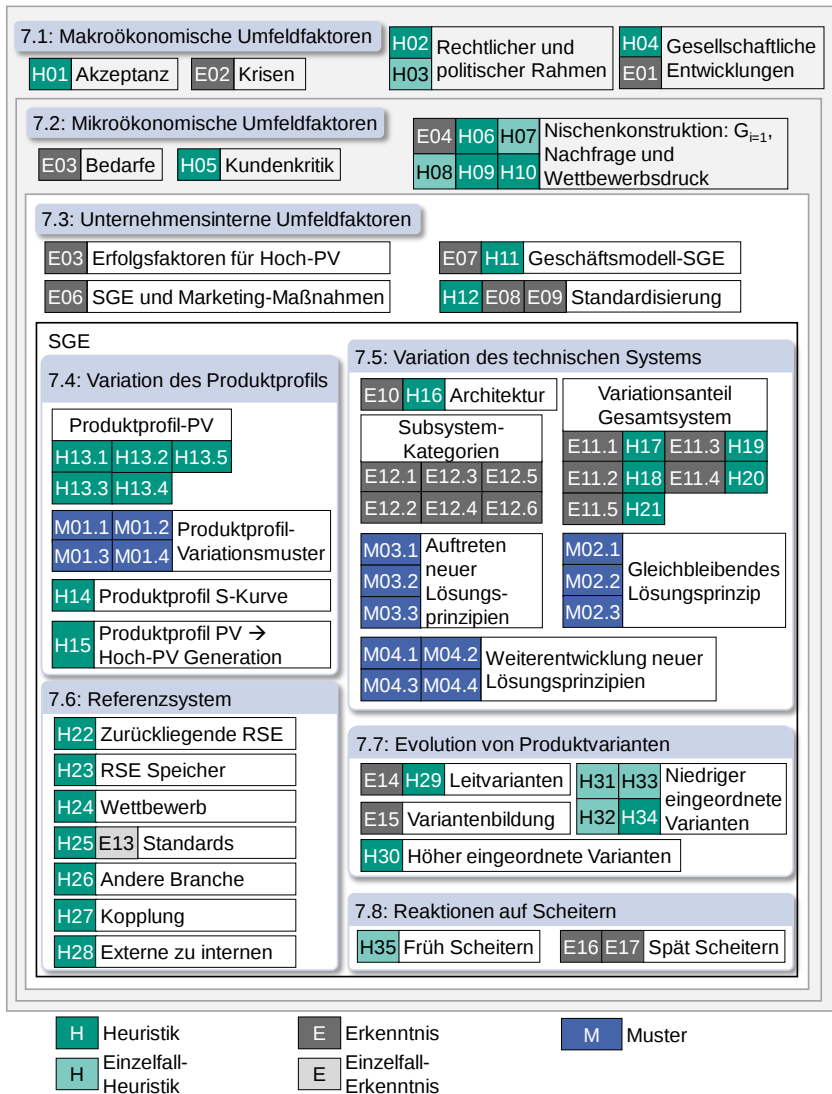


Abbildung 8.2: Überblick über die Theoriebausteine.

Die Theoriebausteine zu **makroökonomischen Umfeldfaktoren** (Kapitel 7.1) – Akzeptanz, rechtliche und politische Rahmenbedingungen, gesellschaftliche Entwicklungen, Krisen – zeigen Strategien auf, wie mit nicht beeinflussbaren externen Rahmenbedingungen umgegangen werden kann, um den „Umfeld-Fit“ der Systemgeneration und damit das Innovationspotenzial zu erhöhen.

Zu **mikroökonomischen Umfeldfaktoren** (Kapitel 7.2) wurden neben Theoriebausteinen zu Bedarfen und Kritik insbesondere die Nischenkonstruktion untersucht. Ausgehend von der $G_{i=1}$ konnten je nach Ausgangssituation Heuristiken für die erfolgreiche Entwicklung von $G_{i=1}$ -Systemgenerationen und deren Weiterentwicklung unter steigendem Wettbewerbsdruck und steigender Nachfrage abgeleitet werden.

Unternehmensinterne Umfeldfaktoren (Kapitel 7.3) standen nicht im Fokus der Untersuchung. Dennoch wurden Zusammenhänge zu Projektplanung, Marketing, Geschäftsmodellen und Theoriebausteine zur Gestaltung der Einführung von Standardisierungsmethoden abgeleitet.

Zur **Variation des Produktprofils** (Kapitel 7.4) wurden fünf Heuristiken für die grundlegende Neuentwicklung von Produktprofilen (Prinzipvariation von Produktprofilen) und vier Muster für die generationsübergreifende Weiterentwicklung von Produktprofilen synthetisiert. Weitere zentrale Erkenntnisse waren die S-kurvenartige Weiterentwicklung von Produktprofilen und der Zusammenhang von Prinzipvariation von Produktprofilen und technischen Systemen.

Aus der fallübergreifenden Analyse der **Variation des technischen Systems** (Kapitel 7.5) wurden zwei Theoriebausteine zur Weiterentwicklung der Architektur, zehn zu Variationsanteilen im Gesamtsystem, sechs zu Variationsanteilen auf Subsystemebene und zehn Variationsmuster auf Subsystemebene synthetisiert. Diese Theoriebausteine können die systematische generationsübergreifende Planung von Variationen auf Gesamtsystem- und Subsystemebene unterstützen.

Für das **Referenzsystem** (Kapitel 7.6) konnten Theoriebausteine hinsichtlich der situativen Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen – weiter zurückliegende Systemgenerationen, Wettbewerber, Standards, andere Produktlinien – und zur Überführung von externen RSE in interne RSE synthetisiert werden. Für nicht verwendete RSE wurde ein kontinuierlicher RSE Speicher für zukünftige Systemgenerationen vorgeschlagen.

Mithilfe von Graphen wurde die **Evolution von Produktvarianten** (Kapitel 7.7) untersucht. Daraus wurden zwei Theoriebausteine zu Systemgenerationen mit

hohem Einfluss auf die Weiterentwicklung weiterer Produktvarianten, den Leitvarianten-Systemgenerationen, eine Erkenntnis zur evolutionären Entstehung neuer Produktvarianten und eine Heuristik zur Bildung höher eingeordneter Produktvarianten sowie vier Heuristiken zur Bildung niedriger eingeordneter Produktvarianten synthetisiert.

Hinsichtlich **Ursachen für und Reaktionen auf Scheitern** (Kapitel 7.8) wurden drei Theoriebausteine unterteilt in das Scheitern früher und das Scheitern späterer Systemgenerationen abgeleitet.

Forschungsfrage FF2 wurde mit den im Rahmen dieser Arbeit in den Theoriebausteinen identifizierten und erklärten Zusammenhängen umfassend beantwortet. Die Theoriebausteine zu den Zusammenhängen basieren auf einer qualitativen, theoriebildenden fallübergreifenden Analyse und wurden induktiv hergeleitet. Demnach können die Ergebnisse nicht als allgemeingültige Aussagen zur Evolution technischer Systeme verstanden werden, sondern als im Rahmen der Fallstudien identifizierte Zusammenhänge, die in einen Gesamtzusammenhang gesetzt wurden. Die Analyse der fallübergreifenden Gültigkeit der einzelnen Theoriebausteine lässt eine Bewertung der Relevanz und Validität innerhalb der untersuchten Fälle zu, ersetzt jedoch keine quantitative Validierung, wie sie beispielsweise von Cash (2018) als nächster Schritt gefordert wird.

Mit 112 Datenpunkten zu Systemgenerationen und Produktprofilen, 1195 Variationen und Referenzsystemelementen und 405 Umfeldfaktoren war der in dieser Arbeit erstellte Datensatz umfassend und inhaltlich tief genug für das qualitative, induktive und theoriebildende Forschungsdesign. Die größtenteils nominal-skalierten Merkmale und die pragmatischen Verkürzungen des Beschreibungsmodells, das Klassenungleichgewicht zwischen erfolgreichen Innovationen und gescheiterten Inventionen („Survivor Bias“) sowie die unausgewogene Verteilung von Datenpunkten zwischen den Fallstudien konnte durch ebendieses Forschungsdesign gut berücksichtigt werden. Für quantitative und weiterführende statistische Verfahren, wie beispielsweise Korrelationsanalysen und damit einhergehend auch Data-Mining-Ansätzen, stellten diese Eigenschaften des Datensatzes jedoch eine Barriere dar. Durch die Forschungsmethode für den Aufbau des Fallstudien-Datensatzes konnte durch hohe methodische Sorgfalt und Transparenz eine hohe, aber nicht uneingeschränkte Validität der Daten sichergestellt werden. Empirische Fallstudien in Kooperation mit Unternehmen hätten eine höhere Datentiefe und Validität geliefert, wären aber nach bisherigen Erfahrungen des Autors mit geringerer Datentransparenz durch Geheimhaltung einhergegangen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Beantwortung der **Forschungsfrage FF3** keine Methode im Sinne eines „planmäßigen Vorgehens“ (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, S. 6) entwickelt. Es wurden keine umfassenden empirischen deskriptiven Studien zur Zielsystementwicklung und zur Evaluation der entwickelten Unterstützung durchgeführt, wie beispielsweise von Blessing und Chakrabarti (2009) oder Marxen (2014) gefordert. Daher ist der Geltungsanspruch der Theoriebausteine hinsichtlich ihrer praktischen Anwendbarkeit, der erwarteten Unterstützungsleistung sowie ihres potenziellen Erfolgsbeitrags hinsichtlich Innovationspotenzial, Kosten und Risiko nur unter Annahme der Prämissen 1, 2 und 3 gegeben (vgl. Kapitel 3.3) und insgesamt als eingeschränkt zu betrachten. Im Rahmen der Arbeit wurde dennoch ausblickhaft eine methodische Unterstützung zur Anwendung der Theoriebausteine entwickelt und initial evaluiert (siehe Kapitel 9.3).

8.3 Beitrag und Implikationen

Trotz der genannten Limitationen leistet die Arbeit einen Beitrag zur Adressierung des in Kapitel 3 formulierten Forschungsbedarfs: Es wurden erstmals systematisch Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation untersucht und ein zusammenhängender Forschungsdatensatz dazu veröffentlicht. Insgesamt zeigt die Arbeit, dass die KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung und die Analogie zur natürlichen Evolution ein geeignetes theoretisches Fundament bieten, um Zusammenhänge von Produktumfeld, Variationen technischer Systeme und deren Produktprofile im Sinne des Modells der SGE sowie Innovation zu beschreiben und zu erforschen. Durch das zugrunde liegende Datenmodell sind die Ergebnisse anschlussfähig an bestehende und zukünftige datenbasierte Ansätze im ASE – Advanced Systems Engineering.

Die Ergebnisse bilden eine fundierte Grundlage für die Entwicklung zukünftiger methodischer Unterstützungsansätze, die Produktentwickelnde dabei unterstützen können, Systemgenerationen mit hohem Innovationspotenzial sowie niedrigen Kosten und niedrigem Risiko zu planen und umzusetzen. Im Gesamtzusammenhang ermöglichen die Theoriebausteine sowie die evolutionäre Perspektive auf Produktumfeld, SGE – Systemgenerationsentwicklung und Innovation ein ganzheitlicheres Verständnis von Innovation und Produktentwicklung, aus dem sich übergeordnete Handlungsempfehlungen ableiten lassen: Makroökonomische Umfeldfaktoren sollten vorausschauend und positiv als Chancen für neue Innovationspotenziale verstanden werden. Mikroökonomische Wechselwirkungen können gezielt zur Nischenbildung genutzt werden, insbesondere für $G_{i=1}$ Entwicklung. Im unternehmensinternen Umfeld gilt es,

geeignete Voraussetzungen für Innovation zu schaffen und SGE ganzheitlich zu denken, inklusive Geschäftsmodellen und Marketing-Maßnahmen. Das Produktprofil und das technische System entwickeln sich in einem Co-Evolutionsprozess als Einheit weiter. Diese Einheit lässt sich durch die gezielte Orchestrierung von Referenzen aus internen und externen Quellen sowie durch geplante Variation über mehrere Generationen hinweg weiterentwickeln – über Generationen des Gesamtsystems, über Generationen einzelner Subsysteme und portfolioübergreifend über Produktlinien, -Familien und -Varianten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit leisten einen Beitrag dazu, den Menschen im Mittelpunkt der Evolution technischer Systeme vom Betroffenen zum Handelnden zu machen.

9 Ausblick

Die Ergebnisse der Arbeit bieten Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsvorhaben, die im Folgenden vorgestellt werden.

9.1 Weitere Untersuchung der Evolution technischer Systeme

Bei der Erweiterung des **Fallstudien-Datensatzes** sollte darauf geachtet werden, die aktuell vorliegenden Klassenungleichgewichte durch Fallstudien mit gescheiterten Systemgenerationen auszugleichen. Zukünftig können KI-Methoden einen Teil des Vorgehens zum Aufbau des Fallstudiendatensatzes automatisieren. Für die Analyse der Variationen von technischen Systemen könnten Benchmarking- und Zerlege-Datenbanken kombiniert mit Ähnlichkeitsanalysen verwendet werden. Für die Analyse der Variation von Produktprofilen könnten sich Large Language Models (LLMs) eignen, die unter anderem die öffentlich zugänglichen Marketing-Materialien der Anbieter auswerten und interpretieren könnten. Für die Umfeldanalyse können öffentlich zugängliche Datenbanken, wie beispielsweise das Data Hub der Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung (UNCTAD, 2025), das Data360 Portal der World Bank (World Bank Open Data, 2025) und die ILOSTAT-Datenbank der International Labour Organization (International Labour Organization, 2025) eingebunden werden.

Durch eine Erweiterung des Datensatzes können zukünftig auch quantitative Analysen, statistische Verfahren sowie Data-Mining-Ansätze zur **Theoriebildung und -validierung** verwendet werden. Eine erste explorative Studie mit dem vorhandenen Datensatz hat gezeigt, dass mit überwachten Verfahren (z. B. Regression, Klassifikation, Entscheidungsbäume) die Zusammenhänge, die aktuell in Form von Heuristiken, Mustern und weiteren Erkenntnissen formuliert sind, hinsichtlich Korrelationen untersucht werden können. Mithilfe von unüberwachten Verfahren (z. B. Dimensionsreduktion, Clustering, Muster- und Regelentdeckung) können weitere Zusammenhänge in den Daten erkannt werden, die aber wiederum der Interpretation durch den Menschen bedürfen.

Eine weitere Richtung für zukünftige Forschungsvorhaben ist die Erweiterung des Datenmodells um weitere **Abstraktionsebenen**, z. B. auf Funktionen und Eigenschaften nach dem generischen Referenzmodell der SGE (Albers, Hirschter et al., 2020) oder den Abstraktionsebenen des Systems Engineering –

Requirements, Functional, Logical, Physical (RFLP) nach dem International Council on Systems Engineering (INCOSE) (Walden et al., 2015).

Eine weitere Analyseperspektive für die fallübergreifende Analyse und Theoriesynthese kann zukünftig **Kreislauffähigkeit** sein. Das Modell der SGE hat großes Potenzial, Systemgenerationen vorausschauend kreislauffähig zu gestalten (Albers, Tusch et al., 2024). Daher sollte Kreislauffähigkeit, neben Kosten, Risiko und Innovationspotenzial, als weitere Zielgröße berücksichtigt werden.

9.2 Weiterentwicklung des Modells der SGE

In der intensiven Auseinandersetzung mit dem Modell der SGE in dieser Arbeit wurden Weiterentwicklungspotenziale festgestellt. Um Hinzukommende und Wegfallende Subsysteme auf tiefer liegenden Systemebenen einheitlich abbilden zu können, wird eine **Konvention für die fraktale Anwendung** des Modells der SGE und der Berechnung von Variationsanteilen benötigt (siehe Kapitel 5.1.4). Auch für die in H23 beschriebene **Nachverfolgbarkeit von Referenzsystemelementen**, die nicht direkt verwendet werden, wird eine Lösung benötigt. Eventuell kann hier eine zusätzliche Variationsart, die Referenzsystemelemente nicht auf die entwickelte Systemgeneration, sondern den RSE-Speicher abbildet, zur Nachverfolgbarkeit beitragen. Der über Formel 2.1 beschriebene Grundzusammenhang der SGE bliebe auch mit einer vierten Variationsart erhalten. Die zukünftig geplante Verwendung von RSE sollte auch im Kontext von evolutionären Diffusionstheorien (Loch & Huberman, 1999) sowie Technologie- und Produkt-Roadmapping (Fink & Siebe, 2016) weiter betrachtet werden.

9.3 Entwicklung methodischer Unterstützung

Die Theoriebausteine können Grundlage für zukünftige Forschungsvorhaben zur Entwicklung methodischer Unterstützung sein. Im Rahmen der Arbeit wurde ein **Playbook** entwickelt, das angelehnt an die Spielzug-Sammlungen von American-Football-Teams die Heuristiken als situative „Spielzüge“ zur Verfügung stellt. Ähnlich dem Aufbau eines Konstruktionskatalogs bietet das Playbook einen Zugriffsteil und einen Lösungsteil. Im Zugriffsteil werden die Heuristiken nach ihrem Problem- und Situationsbezug („WENN...“) kategorisiert. Der Lösungsteil enthält neben dem „DANN...“-Teil der Heuristik und der generalisierten Beschreibung auch

detaillierte Beispiele zur Unterstützung von Assoziationen und weitere Hinweise wie Methodenempfehlungen. Ein Spielzug aus dem Playbook ist in Anhang B enthalten.

Diese erste Version des Playbooks wurde im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung¹ von studentischen Entwicklungsteams im Jahrgang 2023/24 in einem 60-minütigen Workshop zur Ideengenerierung angewandt und mit einem Fragebogen (n=37) initial hinsichtlich Anwendbarkeit, Erfolgsbeitrag und Unterstützungsleistung auf einer fünfstufigen Likert-Skala evaluiert. Ergebnis der Studie war, dass der Playbook-Ansatz durchaus Potenzial hinsichtlich Unterstützungsleistung hat, aber noch keine ausreichende Anwendbarkeit bietet und daher in der konkreten Anwendung wenig Erfolgsbeitrag lieferte (siehe Auswertung der Umfrage in Anhang B). Barrieren waren unter anderem das benötigte Wissen über das Modell der SGE und die Menge an Informationen, die für die richtige Einordnung der Entwicklungssituation im Zugriffsteil verarbeitet werden mussten. Für die Anwendung der Heuristiken im Lösungsteil wurde die zur Verfügung stehende Zeit als nicht ausreichend angesehen. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich zwei Richtungen für zukünftige Forschungsvorhaben ableiten: Eine Unterstützung bei der Einordnung der Entwicklungssituation und eine Unterstützung beim Übertrag der Zusammenhänge auf die Entwicklungssituation.

Bei der **Einordnung der Entwicklungssituation** hinsichtlich des Umfelds kann eine Verknüpfung mit dem Zukunftsmanagement und dem strategischen Management (vgl. Kapitel 2.1.2) zielführend sein. Bei der Einordnung der Entwicklungssituation hinsichtlich des Produktprofils und des technischen Systems werden Informationen über vorangegangene, aktuell in Entwicklung befindliche und zukünftig geplante Systemgenerationen benötigt. Informationen über vorangegangene und zukünftig geplante Systemgenerationen können durch konsequente retrospektive und präskriptive Modellierung von Produktprofilen und technischen Systemen aufbauend auf dem Modell der SGE expliziert und zugänglich gemacht werden. Informationen zur aktuell in Entwicklung befindlichen Systemgeneration und deren Entwicklungsgenerationen sollen zukünftig in Echtzeit

¹ Ein Live-Lab ist eine Forschungsumgebung, in der Methoden und Prozesse in einem kontrollierten, realitätsnahen Produktentwicklungs-Umfeld untersucht werden können (Albers, Walter et al., 2018). Im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung bearbeiten bis zu sieben Studierendenteams eine Aufgabenstellung eines Industriepartners in einem methodisch unterstützten Entwicklungsprozess mit den Phasen Analyse, Potenzialfindung, Konzipierung, Präzisierung und Realisierung.

erhoben werden können, was aktuell in zwei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekten näher untersucht wird:

- Analyse wiederkehrender Wissenstransfersituationen zur Ableitung methodischer Interventionen zur Verbesserung der agilen Mechatroniksystementwicklung unter Nutzung KI-basierter Ansätze (559141885)
- Entwicklung eines ontologischen Modells der PGE und einer methodischen Unterstützung zur Reduktion von Variations- und Planungsabweichungen in der Blechkonstruktion (530789856)

Basierend auf diesen Informationen kann auch der **Übertrag der Zusammenhänge** auf die konkrete Entwicklungssituation zur Unterstützung der Synthese verbessert werden. Ein vielversprechender Ansatz sind Assistenzsysteme in Form von KI-Agenten, die Produktentwickelnden basierend auf der Einordnung der Entwicklungssituation Heuristiken und Muster automatisiert zur Verfügung stellen und so die Barrieren des Playbook-Ansatzes überwinden. Dieser Ansatz eines KI-Assistenzsystems für die SGE wurde in einer Co-betreuten Abschlussarbeit (Eloy, 2025)² konzipiert und wird ebenfalls in den beiden DFG-geförderten Forschungsprojekten näher untersucht.

9.4 Datenbasierte Ansätze im Advanced Systems Engineering

Sowohl für die weitere Untersuchung der Evolution technischer Systeme (Kapitel 9.1) als auch für darauf aufbauende methodische Unterstützung (Kapitel 9.3) werden datenbasierte Ansätze benötigt. Das Leitbild ASE – Advanced Systems Engineering, speziell das Handlungsfeld des Advanced Engineerings, zielt unter anderem darauf ab, neue Daten- und KI-basierte Methoden und Tools in Produktentstehungsprozesse zu integrieren. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können ein Ausgangspunkt sein, um neue Daten- und KI-basierte Methoden zu entwickeln.

Das Beschreibungs- und Datenmodell der Arbeit kann zukünftig Grundlage für eine stärkere **Integration des Modells der SGE in technische Informationssysteme**, beispielsweise PDM- und PLM-Systeme sein, um Daten aus der Evolution portfolio- und generationsübergreifend für Daten- und KI-basierte Methoden zugänglich zu machen. Für die Integration von Nutzungsdaten bietet der Ansatz der **Technischen**

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Vererbung nach Lachmayer et al. (2014) in Kombination mit dem Modell der SGE eine vielversprechende Grundlage. Die Forschungsgruppen um Prof. Albers, Prof. Düser und Prof. Lachmayer arbeiten aktuell eng zusammen, um die beiden komplementären Ansätze synergetisch zu verbinden. Aufbauend auf einer derartigen umfassenden Datenbasis aus generationsübergreifenden retrospektiven Daten zu Produktprofilen, technischen Systemen, Produktumfeld, Markterfolg sowie Nutzungsdaten und darauf aufbauender Analyse und Theoriesynthese kann zukünftig integriert und prozessbegleitend neues Wissen zur Evolution technischer Systeme – unternehmensintern oder unternehmensübergreifend – generiert und über Assistenzsysteme zugänglich gemacht werden.

Literaturverzeichnis

- Adachi, M., Endo, H., Mikami, T., Yagi, K., Wakuta, S. & Uchida, T. (2006). Development of a new hybrid transmission for RWD car. In *Proceedings of the SAE 2006 World Congress & Exhibition*, Detroit, Michigan, USA, 03.–06.04.2006. Warrendale, PA: SAE International.
- Adunka, R. (2016). Die Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ). In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 673–689). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.023>
- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. (2012). *Faszination Konstruktion – Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel. Empfehlungen zur Ausbildung qualifizierter Fachkräfte in Deutschland*. Herausgegeben von A. Albers, B. Denkena & S. Matthiesen. Berlin: acatech.
- Albers, A. (1994). Simultaneous engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik – Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. In VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.), *Deutscher Konstrukteurtag – Entwicklung und Konstruktion im Strukturwandel. VDI Berichte* (Bd. 1120, S. 73–106). Düsseldorf: VDI Verlag.
- 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 2010)*, Ancona, Italien, 12.–16.04.2010 (S. 343–356).
- Albers, A. (2023a). *Engineering neu denken und gestalten. Herausforderungen, Anwendungsszenarien und das neue Leitbild Advanced Systems Engineering*. acatech Impuls. https://doi.org/10.48669/aca_2023-7
- Albers, A. (2023b). Gestaltung technischer Systeme/Produktgestaltung. In B. Sauer (Hrsg.), *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen* (S. 163–205). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66823-8_4

- Albers, A. & Braun, A. (2011). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81(1), 13–31. <https://doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)*, Stuttgart, Deutschland, 19.06.2015 (S. 1–10). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Albers, A., Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Lindow, K., Riedel, O. & Stark, R. (Hrsg.). (2022). *Strategie Advanced Systems Engineering – Leitinitiative zur Zukunft des Engineering und Innovationsstandorts Deutschland*. München: acatech. <https://www.advanced-systems-engineering.de>
- Albers, A., Ebertz, J., Rapp, S., Heimicke, J., Kürten, C., Zimmermann, V. et al. (2020). *Produktgeneration 1 im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Verständnis, Zusammenhänge und Auswirkungen in der Produktentwicklung* (KIT Scientific Working Papers, Nr. 149). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000127971>
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Endl, M., Ewert, R. & Rapp, S. (2020). Model of PGE – Product Generation Engineering by the example of autonomous driving. In *Proceedings of the 30th CIRP Design Conference 2020 (Procedia CIRP, Bd. 91, S. 665–677)*, Pretoria, Südafrika. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.113>
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T. & Rapp, S. (2021). Application of the generic variation operator in the model of PGE – Product Generation Engineering onto the element types of properties and functions of technical systems. In *Proceedings of the 31st CIRP Design Conference 2021 (Procedia CIRP, Bd. 100, S. 870–875)*, Amsterdam, Niederlande. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.147>
- Albers, A. & Gausemeier, J. (2012). Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung. In R. Anderl, M. Eigner, U. Sandler & R. Stark (Hrsg.),

Smart Engineering (acatech DISKUSSION, S. 17–29). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29372-6_3

- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T., Richter, T., Reiß, N., Maier, A. et al. (2018). Managing systems of objectives in the agile development of mechatronic systems by ASD – Agile Systems Design. In *Proceedings of NordDesign 2018: Design in the Era of Digitalization*, Linköping, Schweden, 14.–17.08.2018. Design Society.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiß, N., Breitschuh, J., Richter, T. et al. (2019). A systematic approach to situation-adequate mechatronic system development by ASD – Agile Systems Design. In *Proceedings of the 29th CIRP Design Conference 2019 (Procedia CIRP, Bd. 84, S. 1015–1022)*, Póvoa de Varzim, Portugal. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.312>
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G., Reiß, N., Heitger, N. et al. (2018). Product profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In *Proceedings of the 28th CIRP Design Conference 2018 (Procedia CIRP, Bd. 70, S. 253–258)*, Nantes, Frankreich. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.044>
- 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 R&D Management Conference*, Mailand, Italien (13 S.). RADMA.
- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Wöhrle, G., Reinemann, J. & Rapp, S. (2020). Generic reference product model for specifying complex products by the example of the automotive industry. In I. Horváth & G. Keenaghan (Hrsg.), *Proceedings of the 12th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE 2020)*, Dublin, Irland, 11.–15.05.2020 (S. 353–370). Delft: Delft University of Technology.
- Albers, A., Kürten, C., Rapp, S., Birk, C., Hünemeyer, S. & Kempf, C. (2022). *SGE – Systemgenerationsentwicklung: Analyse und Zusammenhänge von Entwicklungspfaden in der Produktentstehung* (KIT Scientific Working Papers, Nr. 199). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000151151>

- Albers, A., Lanza, G., Klippert, M., Schäfer, L., Frey, A., Hellweg, F. et al. (2022). Product-production-co-design: An approach on integrated product and production engineering across generations and life cycles. In *Proceedings of the 30th CIRP Design Conference 2022 (Procedia CIRP*, Bd. 109, S. 167–172), Grenoble, Frankreich. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.231>
- 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 11): Impacting society through engineering design*, Kopenhagen, Dänemark, 15.–18.08.2011 (Bd. 2, S. 256–265). Design Society.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme. *Konstruktion*, 54(7–8), 55–60.
- Albers, A., Ohmer, M. & Alink, T. (2011). Accessibility of the innovative principles to further levels of abstraction in product development. *Procedia Engineering*, 9, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.114>
- Albers, A. & Rapp, S. (2022). Model of SGE: System Generation Engineering as basis for structured planning and management of development. In D. Krause & E. Heyden (Hrsg.), *Design Methodology for Future Products: Data Driven, Agile and Flexible* (S. 27–46). Cham: Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6_2
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017). Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017*, Stuttgart, Deutschland (S. 345–354). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschter, T., Revfi, S., Schulz, M. et al. (2020). Proposing a generalized description of variations in different types of systems by the model of PGE – Product Generation Engineering. In *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 2020*, Dubrovnik, Kroatien (Bd. 1, S. 2235–2244). Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/dsd.2020.315>

- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F. et al. (2019). The reference system in the model of PGE: Proposing a generalized description of reference products and their interrelations. In P. B. Schaub & M. Kleinsmann (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED 19). Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, Bd. 94, Vol. 1, S. 1693–1702. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.175>
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 years of SPALTEN problem solving methodology in product development. In *Proceedings of NordDesign 2016*, Trondheim, Norwegen, 10.–12.08.2016 (S. 411–420). Design Society.
- 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 2016 (Procedia CIRP*, Bd. 50, S. 100–105), Stockholm, Schweden. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.168>
- Albers, A., Saak, M. & Burkardt, N. (2002). Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In *47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (IWK 2002)*, Ilmenau, Deutschland (S. 83–84). Ilmenau: Technische Universität Ilmenau.
- Albers, A. & Sauer, B. (2023). Einleitung. In B. Sauer (Hrsg.), *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen* (S. 1–16). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66823-8_1
- Albers, A., Scherer, H., Bursac, N. & Rachenkova, G. (2015). Model based systems engineering in construction kit development – Two case studies. In M. Shpitalni, A. Fischer & G. Molcho (Hrsg.), *Proceedings of the 25th CIRP Design Conference: Innovative Product Creation (Procedia CIRP*, Bd. 36, S. 129–134), Haifa, Israel. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.044>
- Albers, A., Tusch, L., Jäckle, M., Seidler, M. & Kempf, C. (2024). Circularity in Product Engineering – Towards a Forward-Looking Approach Across Product Generations. In D. Marjanovic (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2024, 18th International Design Conference*. Glasgow: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.3>

- Albers, A., Walter, B., Wilmsen, M. & Bursac, N. (2018). Live-labs as real-world validation environments for design methods. In D. Marjanovic, M. Storga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Design Conference (DESIGN 2018)* (S. 13–24), Dubrovnik, Kroatien. Design Society. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0303>
- Alblas, A. & Jayaram, J. (2015). Design resilience in the fuzzy front end (FFE) context: An empirical examination. *International Journal of Production Research*, 53(22), 6820–6838. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.899718>
- Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M. & Jacobson, M. (1977). *A pattern language: Towns, buildings, construction* (Center for Environmental Structure Series, Bd. 2, 41st ed.). New York: Oxford University Press.
- Allan, G. (2003). A critique of using grounded theory as a research method. *The Electronic Journal of Business Research Methods*, 2(1), 1–10.
- Altshuller, G. S. (1986). *Erfinden: Wege zur Lösung technischer Probleme*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Apple Inc. (2007, 09.01.). *Apple erfindet mit dem iPhone das Mobiltelefon neu*. Apple. <https://www.apple.com/de/newsroom/2007/01/09Apple-Reinvents-the-Phone-with-iPhone/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Apple Inc. (2013, 12.09.). *Burberry verwendet iPhone 5s, um die Modenschau Frühjahr/Sommer 2014 einzufangen*. Apple. <https://www.apple.com/de/newsroom/2013/09/12Burberry-Uses-iPhone-5s-to-Capture-Spring-Summer-2014-Runway-Show/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Apple Inc. (2019, 02.01.). *Brief von Tim Cook an die Investoren von Apple*. Apple. <https://www.apple.com/de/newsroom/2019/01/letter-from-tim-cook-to-apple-investors/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Apple Inc. (2025). *iPhone archive*. Apple. <https://www.apple.com/newsroom/archive/iphone/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Arianespace. (2021). *Ariane 6 user's guide* (Issue 2). https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2021/03/Mua-6_Issue-2_Revision-0_March-2021.pdf (Zugriff am 16.09.2024).

- Arianespace. (2024). *In depth – Ariane 62*.
<https://www.arianespace.com/vehicle/ariane-6/in-depth-ariane-62/?stage=lowerstage> (Zugriff am 16.09.2024).
- Arthur, W. B. (2009). *The nature of technology: What it is and how it evolves*. New York: Simon & Schuster.
- Baccarini, D. (1999). The logical framework method for defining project success. *Project Management Journal*, 30(4), 25–32.
- Bailom, F., Hinterhuber, H. H., Matzler, K. & Sauerwein, E. (1996). Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit. *Marketing ZFP*, 18(2), 117–126.
<https://doi.org/10.15358/0344-1369-1996-2-117>
- Banh, L. & Strobel, G. (2023). Generative artificial intelligence. *Electronic Markets*, 33(1), 63. <https://doi.org/10.1007/s12525-023-00680-1>
- Bauer, R. (2006). *Gescheiterte Innovationen: Fehlschläge und technologischer Wandel* (Campus-Forschung, Bd. 893). Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Habilitationsschrift, 2004. Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Bäumer, S. (2017). Eins für fünfzehn. Jeder zweite VW wird mit einem Doppelkupplungsgetriebe verkauft. Das neue DQ381 füllt die Lücke im Wolfsburger DSG-Programm. *AMZ – Die Aftermarketzeitschrift*, 09/2017, 16–19.
- Bentley, P. J. (1999). *Evolutionary design by computers*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Beuth, P. (2014, 31.03.). Die Anti-Cyborgs. *Die Zeit*.
<https://www.zeit.de/digital/datenschutz/2013-03/stop-the-cyborgs-google-glass>
 (Zugriff am 16.09.2024).
- Bezmalinovic, T. (2023, 16.03.). *Ende einer Ära: Google killt Glass-Datenbrille*. Mixed.de. <https://mixed.de/google-glass-enterprise-edition-2-eingestellt/>
 (Zugriff am 16.09.2024).
- Bissantz, N. & Hagedorn, J. (2009). Data mining (Datenmustererkennung). *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, 51(1), 139–144.
<https://doi.org/10.1007/s11576-008-0108-z>

- Biswas, S., Ali, I., Chakraborty, R. K., Turan, H. H., Elsayah, S. & Ryan, M. J. (2022). Dynamic modeling for product family evolution combined with artificial neural network based forecasting model: A study of iPhone evolution. *Technological Forecasting and Social Change*, 178, 121549. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121549>
- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology*. Dordrecht: Springer.
- Blume, M. (2023). *BYD blade batteries at IAA Summit 2023 in Munich, Germany* [Fotografie]. Wikimedia Commons. Verfügbar unter [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IAA_Summit_2023,_Munich_\(P1110715\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IAA_Summit_2023,_Munich_(P1110715).jpg) (Zugriff am 19.03.2026).
- Bradshaw, K. (2023, 15.03.). *Google has discontinued the Glass Enterprise Edition*. 9to5Google. <https://9to5google.com/2023/03/15/google-glass-enterprise-edition-discontinued/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Büchler, J.-P. (2018). *Fallstudienkompendium Hidden Champions*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17829-1>
- Buhtz, M. (2023, 21.09.). *Was machte die PlayStation so erfolgreich?* Retro Gaming Crew. <https://www.retrogamingcrew.com/sony-was-machte-die-PlayStation-so-erfolgreich/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Bursac, N. (2016). Model based systems engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 93). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000054484>
- Cash, P. J. (2018). Developing theory-driven design research. *Design Studies*, 56, 84–119. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2018.03.002>
- Chen, P. P.-S. (1976). The entity-relationship model – Toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*, 1(1), 9–36. <https://doi.org/10.1145/320434.320440>

- Chong, Y. T. & Chen, C.-H. (2010). Customer needs as moving targets of product development: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(1–4), 395–406. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2282-6>
- Clauß, U. (2015, 25.01.). Google Glass: Der Markt enttarnt Scheininnovation. *Die Welt*. <https://www.welt.de/debatte/kommentare/article136740013/Warum-Goo-gles-Datenbrille-an-Produktbetrug-grenzt.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Cobb, J. (2016, 14.01.). *No surprise here: Tesla Model S was world's best-selling plug-in car in 2015*. AutoGuide. <https://www.autoquote.com/auto-news/2016/01/no-surprise-here-tesla-model-s-was-world-s-best-selling-plug-in-car-in-2015.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Connect. (2019, 22.08.). *Xiaomi kommt offiziell nach Deutschland*. connect.de. <https://www.connect.de/news/xiaomi-deutschland-offiziell-smartphone-angebot-3199815.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Cooper, R. G. & Kleinschmidt, E. J. (1987). Success factors in product innovation. *Industrial Marketing Management*, 16(3), 215–223.
- Cooper, R. G. & Kleinschmidt, E. J. (1993). Screening new products for potential winners. *Long Range Planning*, 26(6), 74–81. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(93\)90208-W](https://doi.org/10.1016/0024-6301(93)90208-W)
- Cooper Hewitt – Design Museum. (2017). *Google Glass Explorer Edition*. <https://collection.cooperhewitt.org/objects/1158789273/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Corbin, J. & Strauss, A. (1990). Grounded theory research: Procedures, canons and evaluative criteria. *Zeitschrift für Soziologie*, 19(6), 418–427. <https://doi.org/10.1515/zfsoz-1990-0602>
- CSIS Aerospace Security. (2022, 01.09.). *Cost for space launch to low Earth orbit*. <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Damanpour, F. & Wischnevsky, J. D. (2006). Research on innovation in organizations: Distinguishing innovation-generating from innovation-adopting organizations. *Journal of Engineering and Technology Management*, 23(4), 269–291. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2006.08.002>

- Dammers, J. (2020, 20.08.). Vorwerk Thermomix: TM5 gegen TM31 – Welcher Thermomix ist besser? *Augsburger Allgemeine*. <https://www.augsburger-allgemeine.de/geld-leben/Vorwerk-Thermomix-TM5-gegen-TM31-Welcher-Thermomix-ist-besser-id37237327.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Darwin, C. (2003). *The origin of species*. 150th anniversary edition (2nd ed.). East Rutherford, NJ: Penguin Publishing Group. (Originalwerk erschienen 1859).
- Deigendesch, T. (2009). Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 41). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000015688>
- DIN EN ISO 9000. (2015). *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN ISO 31000. (2018). *Risikomanagement*. Berlin: Beuth Verlag.
- Disselkamp, M. (2012). *Innovationsmanagement: Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen* (2., überarb. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler.
<https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4472-6>
- DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (2023, 01.07.). *Versionen der Ariane 5*. https://www.dlr.de/de/bilder/raumfahrt/missionen/ariane5_versionen (Zugriff am 16.09.2024).
- Dörner, D. (1979). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Dumitrescu, R., Albers, A., Riedel, O., Stark, R. & Gausemeier, J. (Hrsg.). (2021). *Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering*. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut. <https://www.advanced-systems-engineering.de> (Zugriff am 16.09.2024).
- Ebel, B. (2015). Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 85).

Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

<https://doi.org/10.5445/IR/1000048334>

Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M. (2014). *Kostengünstig entwickeln und konstruieren*. Berlin, Heidelberg: Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-41959-1>

Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (6. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446449084>

Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *The Academy of Management Review*, 14(4), 532–550.

<https://doi.org/10.2307/258557>

ESA – European Space Agency. (2004, 27.04.). *Ariane 5 ECA*.

https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Ariane/Ariane_5_ECA (Zugriff am 16.09.2024).

ESA – European Space Agency. (2009). *Die Versionen der Ariane 5*.

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Die_Versionen_der_Ariane_5 (Zugriff am 16.09.2024).

European Commission. (2025). *Open science*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-research-and-innovation/our-digital-future/open-science_en (Zugriff am 13.12.2025).

Fink, A. & Siebe, A. (2011). *Handbuch Zukunftsmanagement: Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung* (2., akt. und erw. Aufl.). Frankfurt am Main: Campus Verlag.

Fink, A. & Siebe, A. (2016). *Szenario-Management: Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen*. Frankfurt am Main, New York: Campus Verlag.

Fischer, A. (2018, 08.07.). *Moderne Datenbrillen erobern die Industrie*. Internet World. <https://www.internetworld.de/marketing-trends/virtual-reality/moderne-datenbrillen-erobern-industrie-1582885.html> (Zugriff am 16.09.2024).

- Forbes. (2014, 05.01.). Google Glass meets prescription lenses—Something every geek will love. *Forbes*.
<https://www.forbes.com/sites/johnnosta/2014/01/05/google-glass-meets-prescription-lenses-something-every-geek-will-love/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Forbes. (2024, 13.11.). 8 game-changing smartphone trends that will define 2025. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2024/10/22/8-game-changing-smartphone-trends-that-will-define-2025/> (Zugriff am 13.12.2025).
- Förg, A., Karrer-Müller, E. & Kreimeyer, M. (2016). Produktarchitektur. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 99–109). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.005>
- Fricke, J. & Overhagen, T. (2025). *Graphentheorie: Eine elementare Einführung in Begriffe, Konzepte, Probleme und Algorithmen* (Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-70247-5>
- Fröhlich, P. (2021, 27.05.). *PlayStation Direct: Sony plant PS5-Direktvertrieb in Deutschland (Update)*. GamesWirtschaft.
<https://www.gameswirtschaft.de/wirtschaft/PlayStation-direct-ps5-kaufen-sony-direktvertrieb/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Fushiki, S. (2016). The new generation front wheel drive hybrid system. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 5(1), 109–114.
<https://doi.org/10.4271/2016-01-1167>
- Futuyma, D. J. (1998). *Evolutionary biology* (3rd ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Gadatsch, A. (2019). *Datenmodellierung: Einführung in die Entity-Relationship-Modellierung und das Relationenmodell* (essenzials, 2., aktualisierte Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25730-9>
- Game – Verband der deutschen Games-Branche. (2021). *Spielgeschichte*.
<https://www.game.de/spielgeschichte/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Galfione, A., Meyer zu Westerhausen, S., Stauß, T., Wawer, M. L., Ameduri, S., Totaro, G., Esposito, M., Lachmayer, R., & Gherlone, M. (2025). Methodology for consideration of different load cases in the design of a sensor-integrating,

gentelligent antenna. *Proceedings of the Design Society*, 5, 2401–2410.
<https://doi.org/10.1017/pds.2025.10254>

Gärtner, C. & Heinrich, C. (2018). *Fallstudien zur digitalen Transformation*.
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Garvin, D. A. (1984). What does “product quality” really mean? *Sloan Management Review*, 26(1), 25–43.

Gausemeier, J., Echterfeld, J. & Amshoff, B. (2016). Strategische Produkt- und Prozessplanung. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 9–35). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.002>

Gausemeier, J. & Plass, C. (2014). *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen* (2., überarb. Aufl.). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446438422>

Gerhard, D. (2016). Daten- und Informationsmanagement PDM/PLM. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 215–246). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.009>

Gericke, K., Meißner, M. & Paetzold, K. (2013). Understanding the context of product development. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. S. Kim & S. W. Lee (Hrsg.), *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED 13)* (S. 191–200), Seoul, Südkorea. Design Society.

Gesellschaft für Konsumforschung (GfK). (2006). *Umfassende Studie über die Ursachen von Produktflops bei Fast Moving Consumer Goods*. München. http://presse.serviceplan.de/uploads/tx_sppresse/301.pdf (Zugriff am 16.09.2024).

GfK & gfu Consumer & Home Electronics GmbH. (2021). *Bluetooth-Lautsprecher – Absatz in Deutschland bis 2023*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28277/umfrage/absatzzahlen-fuer-docking-stations-seit-2007/> (Zugriff am 16.09.2024).

Gglib. (2019). *Break down BYD Qin Pro 500 to reveal its core technology*. <https://www.gg-lib.com/asdisp2-65b095f4-36946-.html> (Zugriff am 16.09.2024).

- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning* (1st ed.). Reading, MA: Addison-Wesley.
- Goldheart, S. (2017). *iPhone X teardown*. iFixit.
<https://de.ifixit.com/Teardown/iPhone+X+Teardown/98975> (Zugriff am 16.09.2024).
- Google. (2021a, 14.04.). *Case studies – Glass*.
<https://www.google.com/glass/case-studies/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Google. (2021b, 22.05.). *Discover Glass Enterprise Edition*.
<https://www.google.com/glass/start/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Google. (2023, 15.03.). *Glass Enterprise Edition announcement FAQ*.
<https://support.google.com/glass-enterprise/customer/answer/13417888>
 (Zugriff am 16.09.2024).
- Gottwald, P. R. (2016). *Prozess einer generationsübergreifenden Produktentwicklung durch technische Vererbung*. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover; TEWISS – Technik und Wissen GmbH.
- Grant, R. M. (2016). *Contemporary strategy analysis: Text and cases* (9th ed.). Chichester, West Sussex: Wiley.
- Graw, J. (Hrsg.). (2015). *Genetik* (Lehrbuch, 6., überarb. und aktualisierte Aufl.). Berlin: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44817-5>
- Green Car Congress. (2008). *BYD F3DM plug-in hybrid goes on sale in China*.
<https://www.greencarcongress.com/2008/12/byd-f3dm-plug-i.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Green Car Congress. (2010). *40 BYD e6-based electric taxis enter service in Shenzhen City*. <https://www.greencarcongress.com/2010/05/byd-20100518.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Griffin, A. & Page, A. L. (1996). PDMA success measurement project: Recommended measures for product development success and failure. *Journal of Product Innovation Management*, 13(6), 478–496.

- Hadler, J., Metzner, F.-T., Schäfer, M., Gröhlich, H. & John, M. (2008). Das Siebengang-Doppelkupplungsgetriebe von Volkswagen. *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, 110(6), 512–521.
<https://doi.org/10.1007/BF03221986>
- Hadler, J., Schäfer, M., Gröhlich, H. & Lindemann, K. (2009). DQ500 – Das neue Volkswagen Siebengang-Doppelkupplungsgetriebe für hohe Drehmomente. In *18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2009*. Aachen.
- Hales, C. & Gooch, S. (2004). *Managing engineering design*. London: Springer.
- Hall, S. (2017, 24.07.). *Google Glass Enterprise Edition: The full spec sheet revealed*. 9to5Google. <https://9to5google.com/2017/07/24/google-glass-enterprise-edition-specs/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Hatchuel, A. & Weil, B. (2003). A new approach of innovative design: An introduction to CK theory. In A. Folkesson (Hrsg.), *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED 03)* (Design Society, Bd. 31). Glasgow: Design Society.
- Hauschildt, J., Salomo, S., Schultz, C. & Kock, A. (2023). *Innovationsmanagement* (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 7., vollst. akt. u. überarb. Aufl.). München: Verlag Franz Vahlen.
- Heinecke, D. G. & Kirsch, J. (2023). *The race to space: How to achieve profitable growth in an accelerating space economy*. Porsche Consulting.
- 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.
<https://doi.org/10.2307/2393549>
- Herbig, D. (2020, 05.02.). Augmented-Reality-Brille Google Glass: Enterprise Edition 2 wird direkt verkauft. *heise online*.
<https://www.heise.de/newsticker/meldung/Google-Glass-Enterprise-Edition-2-wird-direkt-verkauft-4653631.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Hisada, H., Taniguchi, T., Tsukamoto, K., Yamaguchi, K., Suzuki, K., Iizuka, M. et al. (2005). AISIN AW new full hybrid transmission for FWD vehicles. In *SAE Technical Paper Series*. Warrendale, PA: SAE International.

- Hofmann, P. (2014). *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft* (2. Aufl.). Wien: Springer Wien.
- Hruska, J. (2016, 14.09.). *iPhone 7 review roundup: A very good iPhone, but not a clean leap forward*. ExtremeTech. <https://www.extremetech.com/mobile/235567-iphone-7-review-roundup-a-very-good-iphone-but-not-a-clean-leap-forward> (Zugriff am 16.09.2024).
- Huch, M. (2022, 23.08.). Xiaomi 12S Ultra im Praxis-Test: Besser als das Mi 11 Ultra? *COMPUTER BILD*. <https://www.computerbild.de/artikel/cb-Tests-Handy-Test-Xiaomi-12S-Ultra-33368665.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Hungenberg, H. (2014). *Strategisches Management in Unternehmen: Ziele – Prozesse – Verfahren* (Lehrbuch, 8., aktualisierte Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-06681-9>
- Hungenberg, H. & Wulf, T. (2015). Unternehmen und Unternehmensführung im Überblick. In H. Hungenberg & T. Wulf (Hrsg.), *Grundlagen der Unternehmensführung. Einführung für Bachelorstudierende* (Lehrbuch, 5., aktualisierte Aufl., S. 1–40). Berlin: Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46997-2_1
- IDC. (2024). *Apple iPhones – Absatz weltweit bis Q2 2024*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12743/umfrage/absatz-von-apple-iphones-seit-dem-jahr-2007-nach-quartalen/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Ili, S., Albers, A. & Miller, S. (2010). Open innovation in the automotive industry. *R&D Management*, 40(3), 246–255. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2010.00595.x>
- International Labour Organization. (2025, 29.11.). *ILOSTAT – The leading source of labour statistics*. <https://ilostat.ilo.org/> (Zugriff am 16.09.2024).
- IPEK – Institut für Produktentwicklung. (2020a). *Glossar der KaSPro: Innovation*. <https://www.ipek.kit.edu/11459.php> (Zugriff am 16.09.2024).
- IPEK – Institut für Produktentwicklung. (2020b). *Glossar der KaSPro: Produktprofil*. <https://www.ipek.kit.edu/11459.php> (Zugriff am 16.09.2024).

- Isakeit, T. (2018). *Thermomix TM5 teardown*. iFixit.
<https://de.ifixit.com/Teardown/Thermomix+TM5+Teardown/117133> (Zugriff am 16.09.2024).
- Isaksson, O., Eckert, C., Borgue, O., Hallstedt, S. I., Hein, A. M., Gericke, K. et al. (2019). Perspectives on innovation: The role of engineering design. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (S. 1235–1244). Cambridge: Design Society.
- Ito, M., Adachi, M., Endo, H., Isogai, A., Omote, K. & Uchida, T. (2007). Hybrid transmission development for AWD luxury cars. In *SAE Technical Paper Series*. Warrendale, PA: SAE International.
- Jäckle, M., Seidler, M., Tusch, L., Rapp, S. & Albers, A. (2023). Towards a consistent understanding of sustainability in product engineering – A systematic literature review and explication framework. *Procedia CIRP*, 119, 770–775. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.123>
- Jacobsen, N. (2017). *Das Apple-Imperium 2.0*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09548-2>
- Jansen, J. (2021, 26.05.). Der Thermomix lässt nichts anbrennen. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/der-thermomix-von-vorwerk-laesst-nichts-anbrennen-17359494.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- 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.
- Kato, S., Ando, I., Ohshima, K., Matsubara, T., Hiasa, Y. & Mori, Y. (2017). Development of multi-stage hybrid system for new Lexus coupe. *SAE International Journal of Electrified Vehicles*, 6(1), 136–144.
<https://doi.org/10.4271/2017-01-1173>
- Kempf, C., Rapp, S., Behdinan, K. & Albers, A. (2023). Reference system element identification atlas – Methods and tools to identify reference system elements in product engineering. *World Patent Information*, 75, 102239.
<https://doi.org/10.1016/j.wpi.2023.102239>
- Kempf, C. (2025). University research results in corporate product engineering – A core aspect of reference system management in system generation

- engineering. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 186). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000181286>
- Kempf, C., Molz, J., Ritzer, K., Schlegel, M., Haberkern, P., Behdinin, K. et al. (2025). Recommendations to improve the usability of research results as reference system elements addressing corporate engineers, researchers, and politics. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1–30. <https://doi.org/10.1177/08927057251318722>
- Kharatyan, A., Humpert, L., Anacker, H., Dumitrescu, R., Wäschle, M., Albers, A. et al. (2022). Künstliche Intelligenz im Engineering. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 117(6), 427–431. <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1074>
- Kimmig, K.-L., Bührle, P., Henneberger, K., Ehrlich, M., Rathke, G. & Martin, J. (2010). Mit Effizienz und Komfort zum Erfolg: Die trockene Doppelkupplung etabliert sich auf dem Automatikmarkt. In *Schaeffler Kolloquium 2010*. https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/symposia_1/downloads_11/Schaeffler_Kolloquium_2010_10_de.pdf (Zugriff am 16.09.2024).
- King, D. (2012, 19.04.). *BYD's Qin sedan will replace poor-selling F3DM*. Autoblog. <https://www.autoblog.com/2012/04/19/byds-qin-sedan-will-replace-poor-selling-f3dm/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Kirchner, E. (2020). *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung: Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61762-5>
- Kirchner, E. & Neudörfer, A. (2021). Grundregeln der Gestaltung. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., S. 467–523). Berlin: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_14
- Klein, B. (2014). *TRIZ/TIPS: Methodik des erfinderischen Problemlösens* (Studium, 3. Aufl., elektronische Ressource). Berlin: De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783486859126>

- Kleuker, S. (2013). *Grundkurs Software-Engineering mit UML: Der pragmatische Weg zu erfolgreichen Softwareprojekten* (3., korr. und erw. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00642-6>
- Knieke, C., Rausch, A., Schindler, M., Strasser, A. & Vogel, M. (2022). Managed evolution of automotive software product line architectures: A systematic literature study. *Electronics*, 11(12), 1860. <https://doi.org/10.3390/electronics11121860>
- Köllner, C. (2024). Was ist die Cell-to-Pack-Technologie? *Springer Professional*. <https://www.springerprofessional.de/en/batterie/automobilproduktion/was-ist-die-cell-to-pack-technologie-/23684340> (Zugriff am 16.09.2024).
- Kotler, P., Keller, K. L. & Opresnik, M. O. (2017). *Marketing-Management. Konzepte - Instrumente - Unternehmensfallstudien* (15., aktualisierte Auflage). Hallbergmoos, Deutschland: Pearson.
- Krause, D., Vietor, T., Inkermann, D., Hanna, M., Richter, T. & Wortmann, N. (2021). Produktarchitektur. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl., S. 335–393). Berlin: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_12
- Kubin, A. (2025). Beitrag zu Advanced Systems Engineering in der Sportwagenentwicklung: Spezifizieren von Zielen und Anforderungen anhand von Bedarfen. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 185). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000181914>
- Kubin, A., Wagenmann, S., Reichert, F., Mandel, C. & Albers, A. (2023). Stakeholder needs in systems engineering: A proposal for a formal definition. In *Proceedings of the 17th Annual IEEE International Systems Conference (SYSCON 2023)* (S. 1–8). Piscataway, NJ: IEEE.
- Kuebler, M., Lickefett, M. S. & Albers, A. (2024). Investigating influences on product profiles – A retrospective case study. In *Proceedings of the XXXV ISPIIM Innovation Conference*. Tallinn, Estland.

- Kuebler, M., Schuster, W., Schwarz, S. E., Braumandl, A., Siebe, A. & Albers, A. (2023). Upgradeable mechatronic systems – An approach to determine changing product properties using foresight. *Procedia CIRP*, 119, 78–83.
- Kuhn, J. & Bernau, V. (2014, 23.04.). Markteinführung von Google Glass: Symbol für reiche Nerds. *Süddeutsche Zeitung*.
<https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/markteinfuehrung-von-google-glass-nur-nicht-gruseln-1.1937589-2> (Zugriff am 16.09.2024).
- Lachmayer, R., Mozgova, I., Reimche, W., Colditz, F., Mroz, G. & Gottwald, P. (2014). Technical inheritance: A concept to adapt the evolution of nature to product engineering. *Procedia Technology*, 15, 178–187.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.070>
- Lachmayer, R., Mozgova, I., Sauthoff, B., & Gottwald, P. (2013). Product evolution and optimization based on gentelligent components and product life cycle data. In M. Abramovici & R. Stark (Hrsg.), *Smart product engineering* (S. 685–694). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_67
- Lachmayer, R., Mozgova, I., & Scheidel, W. (2016). An approach to describe gentelligent components in their life cycle. *Procedia Technology*, 26, 199–206.
<https://repo.uni-hannover.de/bitstreams/915d3325-b870-48ca-9cbf-1ba8f24d8e3f/download>
- Laland, K. N., Uller, T., Feldman, M. W., Sterelny, K., Müller, G. B., Moczek, A. et al. (2015). The extended evolutionary synthesis: Its structure, assumptions and predictions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1813). <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1019>
- Lange, A. (2020). *Evolutionstheorie im Wandel: Ist Darwin überholt?* Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60915-6>
- Li, Y., Ni, Y., Zhang, N., Liu, Q. & Cao, J. (2022). Towards the evolution characteristics of product structural properties based on the time-dependent network. *Journal of Engineering Design*, 33(3), 207–233.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2022.2030683>
- Linde, H., Drews, R. & Cohausz, H. B. (1996). WOIS – Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie: Theoretische Kernelemente und Erfahrungen in der Automobilentwicklung. *Zukunftschance Produktentwicklung*, 1270, 41–84.

- Linde, H., Hall, D. M. & Herr, G. H. (1999). Powerful and structured innovation using contradictions for gaining orientation. *Journal of Engineering Design*, 10(3), 205–222. <https://doi.org/10.1080/095448299261281>
- Linde, H. & Hill, B. (1993). *Erfolgreich erfinden: Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie für Entwickler und Konstrukteure* (Fachbuch Konstruktion). Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag.
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (VDI-Buch, 3., korrigierte Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>
- Liu, H. (2010). Dynamics of pricing in the video game console market: Skimming or penetration? *Journal of Marketing Research*, 47(3), 428–443. <https://doi.org/10.1509/jmkr.47.3.428>
- Lloyd, C. (2019). *Teardown der Sony PlayStation*. iFixit. <https://de.ifixit.com/Teardown/Teardown+der+Sony+PlayStation/128089> (Zugriff am 16.09.2024).
- Loch, C. H. & Huberman, B. A. (1999). A Punctuated-Equilibrium Model of Technology Diffusion. *Management Science*, 45(2), 160–177. <https://doi.org/10.1287/mnsc.45.2.160>
- Logitech. (2014, 07.07.). *UE BOOM from Ultimate Ears wins gold Industrial Design Excellence Award from the Industrial Designers Society of America*. <https://ir.logitech.com/press-releases/press-release-details/2014/UE-BOOM-from-Ultimate-Ears-Wins-Gold-Industrial-Design-Excellence-Award-from-Industrial-Designers-Society-of-America/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).
- Logitech. (2015, 05.01.a). *Ultimate Ears delivers unrivaled sound in a life-proof design with new UE MEGABOOM speaker*. <https://ir.logitech.com/press-releases/press-release-details/2015/Ultimate-Ears-Delivers-Unrivaled-Sound-in-a-Life-Proof-Design-with-New-UE-MEGABOOM-Speaker/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).
- Logitech. (2015, 15.09.b). *Ultimate Ears ups the ante with UE BOOM 2*. <https://ir.logitech.com/press-releases/press-release-details/2015/Ultimate-Ears-Ups-the-Ante-with-UE-BOOM-2/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).

- Logitech. (2017, 29.03.). *Ultimate Ears WONDERBOOM: Pint-size speaker with surprisingly big sound*. <https://ir.logitech.com/press-releases/press-release-details/2017/Ultimate-Ears-WONDERBOOM-Pint-Size-Speaker-with-Surprisingly-Big-Sound/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).
- Logitech. (2018, 30.08.). *Introducing Ultimate Ears BOOM 3 and MEGABOOM 3, packed with new features*. <https://ir.logitech.com/press-releases/press-release-details/2018/Introducing-Ultimate-Ears-BOOM-3-and-MEGABOOM-3-Packed-With-New-Features/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).
- Logitech. (2019, 04.07.). *Ultimate Ears brings even bigger sound and bass in the portable WONDERBOOM™ 2*. <https://ir.logitech.com/press-releases/press-release-details/2019/Ultimate-Ears-Brings-Even-Bigger-Sound-and-Bass-in-the-Portable-WONDERBOOM-2/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).
- Logitech. (2022, 17.08.). *Ultimate Ears launches new editions of award-winning WONDERBOOM and HYPERBOOM speakers*. <https://ir.logitech.com/press-releases/press-release-details/2022/Ultimate-Ears-Launches-New-Editions-of-Award-Winning-WONDERBOOM-and-HYPERBOOM-Speakers/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).
- Logitech. (2024a). *Financial information – Annual reports*. <https://ir.logitech.com/financial-info/annual-reports/default.aspx> (Zugriff am 16.09.2024).
- Logitech. (2024, 16.09.b). *Mobile Ultimate-Ears Lautsprecher, Bluetooth-Lautsprecher, kabellose Lautsprecher*. <https://www.ultimateears.com/de-de> (Zugriff am 16.09.2024).
- Lucabon. (2017). *Falcon rocket family*. Wikimedia Commons. https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Falcon_rocket_family4.svg (Zugriff am 16.09.2024).
- Marthaler, F. (2021). *Zukunftsorientierte Produktentwicklung – Eine Systematik zur Ableitung von generationsübergreifenden Zielsystemen zukünftiger Produktgenerationen durch strategische Vorausschau*. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 186). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000134977>

- Marthaler, F., Uhlig, E. O., Marthaler, P., Kühfuss, D., Strauch, M., Siebe, A. et al. (2019). Strategische Potenzialfindung zur generationsübergreifenden Produktentwicklung mit langfristigem Zeithorizont: Eine qualitative Studie im Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (S. 233–242). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Marxen, L. (2014). A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 74). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000045823>
- McConnell, V., Leard, B. & Kardos, F. (2019). *California's evolving zero emission vehicle program: Pulling new technology into the market*. <https://trid.trb.org/view/1689709> (Zugriff am 16.09.2024).
- McCulloch, W. S. & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
- Meboldt, M. (2008). Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – Als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 29). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000028850>
- Meyer zu Westerhausen, S., Kyriazis, A., Hühne, C., & Lachmayer, R. (2024). Design methodology for optimal sensor placement for cure monitoring and load detection of sensor-integrated, intelligent composite parts. *Proceedings of the Design Society*, 4, 673–682. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.70>
- Michael, C., Roberts, R., Yee, L., Hazan, E., Singla, A., Smaje, K. et al. (2023). *The economic potential of generative AI: The next productivity frontier*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-economic-potential-of-generative-ai-the-next-productivity-frontier#/> (Zugriff am 16.09.2024).

- Mizuno, Y., Ibaraki, R., Kondo, K., Odaka, K., Watanabe, H. et al. (2009). Development of new hybrid transmission for compact-class vehicles. *SAE International Journal of Engines*, 2(1), 742–749. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0726>
- Moore, G. E. (2006). Cramming more components onto integrated circuits (reprinted from *Electronics*, Vol. 38, No. 8, April 19, 1965). *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, 11(3), 33–35. <https://doi.org/10.1109/NSSC.2006.4785860>
- Mozgova, I., Lachmayer, R. & Gottwald, P. (2015). Formulations of paradigms on technical inheritance. In S. Weber, S. Husung, G. Cascini, M. Cantamessa & D. Marjanović (Hrsg.), *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)*. Glasgow: Design Society.
- Müller, H.-E. (2009). *Autozulieferer: Partner auch in der Krise? Lieferantenmanagement bei Toyota, General Motors und Volkswagen* (Wirtschaft und Finanzen, Bd. 230). Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung.
- Muschik, S. (2011). Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering. Dissertation. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 50). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000023768>
- Nachtigall, W. (2010). *Bionik als Wissenschaft: Erkennen – Abstrahieren – Umsetzen*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10320-9>
- Naunheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J., Novak, W. & Fietkau, P. (2019). *Fahrzeuggetriebe*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58883-3>
- Nonaka, I. & Peltokorpi, V. (2009). Knowledge-based view of radical innovation: Toyota Prius case. In J. Hage (Hrsg.), *Innovation, science, and institutional change: A research handbook*. Oxford: Oxford University Press.
- North, K. (2016). *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wissensmanagement gestalten* (6., aktualisierte und erweiterte Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-11643-9>

Notebookcheck. (2017, 19.07.). *Google Glass: Rückkehr der Datenbrille als Enterprise Edition*. <https://www.notebookcheck.com/Google-Glass-Rueckkehr-der-Datenbrille-als-Enterprise-Edition.235818.0.html> (Zugriff am 16.09.2024).

Notebookcheck. (2020, 18.12.). *Test Xiaomi Mi 10 Ultra Smartphone – Ist der Hype um das Xiaomi-Handy gerechtfertigt?* <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-Mi-10-Ultra-Smartphone-Ist-der-Hype-um-das-Xiaomi-Handy-gerechtfertigt.508566.0.html> (Zugriff am 16.09.2024).

Notebookcheck. (2021, 18.12.). *Test Xiaomi Mi 11 Ultra – Ein wahrhaftiges Schwergewicht im Smartphone-Bereich*. <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-Mi-11-Ultra-Ein-wahrhaftiges-Schwergewicht-im-Smartphone-Bereich.541996.0.html> (Zugriff am 16.09.2024).

Notebookcheck. (2022, 02.09.). *Test Xiaomi 12S Ultra: 5G-Smartphone mit riesiger Leica-Kamera hinterlässt Unverständnis*. <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-12S-Ultra-5G-Smartphone-mit-riesiger-Leica-Kamera-hinterlaesst-Unverstaendnis.641453.0.html> (Zugriff am 16.09.2024).

Notebookcheck. (2023, 23.05.). *Test Xiaomi 13 Ultra – Spektakuläres Smartphone mit variabler Kamera-Blende für Leica-Fans*. <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-13-Ultra-Spektakulaeres-Smartphone-mit-variabler-Kamera-Blende-fuer-Leica-Fans.717210.0.html> (Zugriff am 16.09.2024).

Notebookcheck. (2024, 23. 04.). *Test Xiaomi 14 Ultra – Das Leica Phone trumpft mächtig auf*. <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-14-Ultra-Das-Leica-Phone-trumpft-maechtig-auf.817895.0.html> (Zugriff am 19.03.2026).

Okuda, K., Yasuda, Y., Adachi, M., Tabata, A., Suzuki, H., Takagi, K. et al. (2017). Development of multi stage hybrid transmission. *SAE International Journal of Electrified Vehicles*, 6(1), 77–83. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1156>

Olesen, J., Wenzel, H., Hein, L. & Andreasen, M. M. (1996). *Design for environment*. Copenhagen: Ministry for Environment and Energy, Environmental Protection Agency.

- Pahl, G., Beitz, W., Blessing, L., Feldhusen, J., Grote, K.-H. & Wallace, K. (2007). *Engineering design: A systematic approach* (3rd ed.). London: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2>
- PCGROUP. (2024, 12.11.). 2021 年元新能源销量_2021 年元新能源累计销量排名_太平洋汽车. <https://price.pcauto.com.cn/salescar/sg21423/y2021/> (Zugriff am 16.09.2024).
- PCMag Australia. (2014, 15.04.). *Google Glass Explorer Edition Version 2*.
<https://au.pcmag.com/wearables/11364/google-glass-explorer-edition-version-2> (Zugriff am 16.09.2024).
- Pearson, A. W. (1990). Innovation strategy. *Technovation*, 10(3), 185–192.
[https://doi.org/10.1016/0166-4972\(90\)90023-D](https://doi.org/10.1016/0166-4972(90)90023-D)
- Peglow, N., Powelske, J., Birk, C., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Systematik zur Differenzierung von Varianten im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In K. Brökel, K.-H. Grote, R. Stelzer, F. Rieg, J. Feldhusen, N. Müller et al. (Hrsg.), *Tagungsband 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017: Interdisziplinäre Produktentwicklung* (S. 9–18). Duisburg.
- Pindyck, R. S. & Rubinfeld, D. L. (2018). *Mikroökonomie* (Studium Economic VWL, 9., aktualisierte Aufl.). Hallbergmoos: Pearson.
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20580-4>
- Porter, M. E. (1980). *Competitive strategy: Techniques for analyzing industries and competitors*. New York: Free Press.
- Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. New York; London: Free Press; Collier Macmillan.
- Die Presse. (2019). *25 Jahre PlayStation: Die Geschichte der Sony-Konsole*.
<https://www.diepresse.com/4609966/25-jahre-PlayStation-die-geschichte-der-sony-konsole> (Zugriff am 16.09.2024).

- Probst, G. J. B., Raub, S. P. & Romhardt, K. (2012). *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen* (7. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4563-1>
- PwC. (2021, 11.06.). *Vorwerk: Mit der Digitalisierung neue Märkte erschließen*. <https://www.pwc.de/de/mittelstand/european-private-business-survey-2019/erfolgsgeschichten-so-gelingt-dem-mittelstand-der-sprung-ins-digitale-zeitalter/vorwerk-mit-der-digitalisierung-neue-maerkte-erschliessen.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Rapp, S., Moeser, G., Eichhorn, P. & Albers, A. (2018). Identifying expedient variations in PGE – Product Generation Engineering. In P. Ekströmer, S. Schütte & J. Ölvander (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2018*. Linköping: Design Society.
- Rapp, S., Barg, M., Klotz, T., Birk, C. & Albers, A. (2020). Influencing factors on the retrospective analysis of variation shares with C&C²A-based criteria in product generation engineering. *Procedia CIRP*, 91, 781–788. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.235>
- Rapp, S. (2021). Beitrag zur empirisch basierten Planung, Steuerung und methodischen Unterstützung von Variationen auf der Basis eines Referenzsystems im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 136). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000134971>
- Reynolds, S. (2015). Why Google Glass failed: A marketing lesson. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/siimonreynolds/2015/02/05/why-google-glass-failed/?sh=75464b7b51b5> (Zugriff am 16.09.2024).
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Rosen, R. (1969). Putting a science back on track. *Science*, 164(3880), 681–682. <https://doi.org/10.1126/science.164.3880.681>

- Roth, K. (2001). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Kataloge* (3., erw. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17467-4>
- Saatweber, J. (2016). Produkte entwickeln mit QFD – Quality Function Deployment. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 629–671). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446445819.022>
- Sauthoff, B., & Lachmayer, R. (2014). Generative design approach for modelling of large design spaces. In T. D. Brunoe et al. (Hrsg.), *Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2014)* (S. 241–251). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04271-8_21
- Sawaguchi, M. (2011). Innovation activities based on S-curve analysis and patterns of technical evolution – From the standpoint of engineers, what is innovation? *Procedia Engineering*, 9, 596–610. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.145>
- Schaal, S. (2013, 14.11.). DSG-Rückruf bei VW: Das Problem ist der Schwefel. *Handelsblatt*. <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/motor/dsg-rueckruf-bei-vw-das-problem-ist-der-schwefel/9076570.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Schaal, S. & Heide, F. G. (2013, 14.11.). Doppelkupplungsgetriebe: DQ200 – Das große Problem des VW-Konzerns. *Handelsblatt*. <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/motor/doppelkupplungsgetriebe-dq200-grosse-problem-des-vw-konzerns/9074256.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Scheidel, W., Mozgova, I., & Lachmayer, R. (2017). Product data management in the context of Industry 4.0. In *Engineering for a Changing World: Proceedings of the 59th Ilmenau Scientific Colloquium (IWK), Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany, 11–15 September 2017*. Ilmenau: Universitätsbibliothek Ilmenau (ilmedia). Verfügbar unter https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00033233
- Schlegel, M., Kempf, C., Thümmel, C., Düser, T. & Albers, A. (2025). Validating a process model for future-robust product portfolios – Two cases. *Proceedings of the Design Society*, 5, 3371–3380. <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10351>

- Schlegel, M., Wiederkehr, I., Rapp, S., Koldewey, C., Albers, A. & Dumitrescu, R. (2023). Design of a descriptive model for product portfolio evolution based on the model of SGE – System Generation Engineering. In *Proceedings of the R&D Management Conference*. Sevilla, Spanien.
- Schoemaker, P., Heaton, S. & Teece, D. (2018). Innovation, dynamic capabilities, and leadership. *California Management Review*, 61(1), 15–42.
<https://doi.org/10.1177/0008125618790246>
- Schreiber, W., Rudolph, F. & Becker, V. (2003). Das neue Doppelkupplungsgetriebe von Volkswagen. *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03224465.pdf>
- Schumpeter, J. A. (1934). *The theory of economic development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle* (R. Opie, Übers.). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Schumpeter, J. A. (1947). The creative response in economic history. *The Journal of Economic History*, 7(2), 149–159.
<https://doi.org/10.1017/S0022050700054279>
- Schwarz, S. E., Dilger, L. J., Nana, B. A. & Albers, A. (2025). Validity criteria for need and benefit situations in early stages of product engineering projects. *Procedia CIRP*, 136, 798–803. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.136>
- SEW-EURODRIVE. (2024). *Mobile Transportsysteme*. <https://www.sew-eurodrive.de/automatisierung/maxolution-systemloesungen/mobile-systeme/mobile-transportsysteme/mobile-transportsysteme.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Shahin, T. M. M., Andrews, P. T. J. & Sivaloganathan, S. (1999). A design reuse system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 213(6), 621–627.
<https://doi.org/10.1243/0954405991517065>
- Shavit, Y., Agarwal, S., Brundage, M., Adler, S., O'Keefe, C., Campbell, R. et al. (2023). *Practices for governing agentic AI systems*. Research paper. OpenAI.
- Shpakovsky, N. (2006). Abstract of book *Evolution Trees*. *TRIZ Journal*. <https://triz-journal.com/abstract-book-evolution-trees/> (Zugriff am 16.09.2024).

- Sivaloganathan, S. & Shahin, T. M. M. (1999). Design reuse: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 213(7), 641–654.
<https://doi.org/10.1243/0954405991517092>
- Smetana, T., Weiß, L., Sauberschwarz, L. & Grübel, C. (2025). *Innovation for growth: Wachstum traditioneller Industrieunternehmen durch strategische Innovation* (essenzials). Wiesbaden: Springer Gabler.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-47410-2>
- Snell, J. (2016). *iPhone 7 review: Many additions and one subtraction*.
<https://sixcolors.com/post/2016/09/iphone7review/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Sony. (2024). *Business data & sales*. <https://sonyinteractive.com/en/our-company/business-data-sales/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Sony. (2025). *PlayStation 1994: Zeitleiste der PlayStation-Geschichte*.
<https://www.PlayStation.com/de-de/PlayStation-history/1994-ps-one/> (Zugriff am 16.09.2024).
- SpaceX. (2021). *Falcon 9 Full Thrust & Falcon Heavy User's Guide*.
<https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf> (Zugriff am 16.09.2024).
- SpaceX. (2024). *Falcon 9*. <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Spinnler, T. (2021, 09.02.). *Konsolen im Corona-Boom: Nintendo hat die Nase vorn – noch*. tagesschau.de.
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/im-schatten-von-nintendo-playstation-xbox-corona-konsolen-101.html> (Zugriff am 16.09.2024).
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stern, T. & Jaberg, H. (2010). *Erfolgreiches Innovationsmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8846-1>
- Su, J. (2018, 02.12.). Why the iPhone XR is Apple's best-selling iPhone, hurting sales of iPhone XS and XS Max. *Forbes*.
<https://www.forbes.com/sites/jeanbaptiste/2018/12/01/why-the-iphone-xr-is->

[apples-best-selling-iphone-hurting-sales-of-iphone-xsxs-max/](#) (Zugriff am 16.09.2024).

Suzuki, Y., Nishimine, A., Baba, S., Miyasaka, K., Tsuchida, M., Endo, H. et al. (2017). Development of new plug-in hybrid transaxle for compact-class vehicles. *SAE Technical Paper Series*. Warrendale, PA: SAE International.

Terpitz, K. (2021, 26.05.). Vorwerk-News: Thermomix beschert Vorwerk ein Rekordjahr. *Handelsblatt*. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/direktvertrieb-der-thermomix-beschert-vorwerk-ein-rekordjahr-neuer-verkaufskanal-startet/27221400.html> (Zugriff am 16.09.2024).

Thao, J. (2023). *UE BOOM 3 complete teardown!!!*
<https://www.youtube.com/watch?v=0-R46ZLkiMk> (Zugriff am 16.09.2024).

Torborg, S. & Simpson, S. (2014). *What's inside Google Glass?* Catwig.
<http://www.catwig.com/google-glass-teardown/> (Zugriff am 16.09.2024).

Toyota Motor Corporation. (1997). *News release*.
<https://global.toyota/en/detail/7901703> (Zugriff am 16.09.2024).

Toyota Motor Corporation. (2017). *Toyota Sports 800 gas turbine-hybrid*.
<https://global.toyota/en/detail/17852379> (Zugriff am 16.09.2024).

Toyota Motor Corporation. (2022, 29.03.). *Worldwide sales of Toyota hybrids surpass 10 million units*. <https://global.toyota/en/detail/14940871> (Zugriff am 16.09.2024).

Toyota Motor Corporation. (2024). *Sales, production, and export results*.
<https://global.toyota/en/company/profile/production-sales-figures/> (Zugriff am 16.09.2024).

Tusch, L., Pirc, V., Jäckle, M., Düser, T. & Albers, A. (2025). Cross-generational remanufacturing: Identifying high-potenzial subsystems through differenzial analysis of product generations. *Procedia CIRP*, 135, 1234–1239.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.12.124>

Ultimate Ears. (2023, 04.10.). *Über Ultimate Ears, unsere Audio-Produkte und unser Markenversprechen*. <https://www.ultimateears.com/de-de/features/about-ultimate-ears.html> (Zugriff am 16.09.2024).

- UNCTAD. (2024). *UNCTAD Data Hub*. <https://unctadstat.unctad.org/EN/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Vajna, S., Clement, S., Jordan, A. & Bercsey, T. (2005). The autogenetic design theory: An evolutionary view of the design process. *Journal of Engineering Design*, 16(4), 423–440. <https://doi.org/10.1080/09544820500267781>
- Vajna, S., Kittel, K. & Bercsey, T. (2011). The autogenetic design theory. In H. Birkhofer (Hrsg.), *The future of design methodology. Papers written for the colloquium held in honour of Professor Herbert Birkhofer on the occasion of his retirement* (S. 169–179). London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-615-3_15
- Vajna, S. & Wegner, B. (1997). Autogenetische Konstruktionstheorie – Evolutionärer Ansatz einer erweiterten Konstruktionstheorie. In *DFX 1997: Proceedings of the 8th Symposium on Design for Manufacturing*, Schnaittach/Erlangen, Deutschland, 16.–17.10.1997 (S. 116–125).
- VDI-Richtlinie 2223. (2004). *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Berlin: Beuth.
- VDI-Richtlinie 2510. (2005). *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*. Berlin: Beuth.
- VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1. (2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*. Berlin: Beuth.
- VDI-Richtlinie 2221 Blatt 2. (2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*. Berlin: Beuth.
- Verworn, B. & Herstatt, C. (2007). Strukturierung und Gestaltung der frühen Phasen des Innovationsprozesses. In C. Herstatt & B. Verworn (Hrsg.), *Management der frühen Innovationsphasen. Grundlagen – Methoden – Neue Ansätze* (2., überarb. u. erw. Aufl., S. 111–134). Wiesbaden: Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9293-2_6
- VGChartz. (2024). *Meistverkaufte Konsolen weltweit bis 2021*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160549/umfrage/anzahl-der-weltweit-verkauften-spielkonsolen-nach-konsolentypen/> (Zugriff am 16.09.2024).

- VGChartz. (2025). *Gaming – Verkaufszahlen ausgewählter Spielkonsolen weltweit bis 2024*. Statista.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1198957/umfrage/weltweiter-absatz-der-PlayStation-5-und-xbox-xs-pro-monat/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Volkswagen Newsroom. (2019, 15.01.). *Der Sieg der Automatik*.
<https://www.volkswagen-newsroom.com/de/stories/der-sieg-der-automatik-4567>
 (Zugriff am 16.09.2024).
- Vorwerk. (2021a). *Die Geschichte des Thermomix. Vom Mixer zur Multifunktions-Küchenmaschine*. <https://thermomix.vorwerk.at/50jahre/> (Zugriff am 16.09.2024).
- Vorwerk. (2021b). *Die Thermomix®-Erfolgsgeschichte*.
<https://www.vorwerk.com/de/de/c/home/rezepte-und-ideen/ideenreich/thermomix/lifestyle/die-thermomix-erfolgsgeschichte> (Zugriff am 16.09.2024).
- Vorwerk. (2024). *Publikationen*. <https://www.vorwerk-group.com/de/home/presse/publikationen> (Zugriff am 16.09.2024).
- Vorwerk. (2025b, 01.03.). *Der neue Thermomix® TM7*.
<https://www.vorwerk.com/de/de/thermomix/tm7> (Zugriff am 16.09.2024).
- Walden, D. D., Roedler, G. J., Forsberg, K. J., Hamelin, R. D. & Shortell, T. M. (2015). *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities* (4. Aufl.). San Diego, CA: Wiley.
- Wang, J. G., Qin, S. & Wang, A. (2023). BYD – A disrupter of the emerging market. In J. G. Wang, S. Qin & A. Wang (Hrsg.), *Yes Logo* (S. 91–106). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6608-0_5
- Wäschle, M., Timucin, M., Radimersky, A., Mandel, C., Fahl, J. & Hirschter, T. (2021). Vorgehen zur systematischen Verknüpfung von Produkthanforderungen und Systemarchitektur unter Berücksichtigung der PGE. In H.-G. Binz, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021: Stuttgart, 20. Mai 2021* (Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Bd. 6). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

- Weber, C. (2014). Modelling products and product development based on characteristics and properties. In L. T. M. Blessing & A. Chakrabarti (Hrsg.), *An anthology of theories and models of design. Philosophy, approaches and empirical explorations* (Bd. 22, S. 327–352). London: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_16
- Weber, C. & Husung, S. (2016). Solution patterns – Their role in innovation, practice and education. In *DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference* (S. 99–108).
- Wesner, E. (1977). *Die Planung von Marketing-Strategien auf der Grundlage des Modells des Produktlebenszyklus*. Dissertation. Berlin: Freie Universität Berlin.
- West, J. & Mace, M. (2007). Entering a mature industry through innovation: Apple's iPhone strategy. In *Appropriability, proximity, routines and innovation*.
https://www.researchgate.net/profile/joel-west-2/publication/267362458_entering_a_mature_industry_through_innovation_apple_s_iphone_strategy (Zugriff am 16.09.2024).
- Wolf, A. (2017, 10.07.). *iPhone 8 could be a victim of its own success*. TWICE: This Week in Consumer Electronics, 11, 8.
<https://web.p.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer> (Zugriff am 16.09.2024).
- Woodside, A. G. & Wilson, E. J. (2003). Case study research methods for theory building. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 18(6/7), 493–508.
<https://doi.org/10.1108/08858620310492374>
- World Bank Open Data. (2025). *World Bank Open Data*.
<https://data.worldbank.org/> (Zugriff am 16.09.2025).
- Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2018). Process models in design and development. *Research in Engineering Design*, 29(2), 161–202.
<https://doi.org/10.1007/s00163-017-0262-7>
- Xiaomi Corporation. (2025, 30.07.). *Quarterly results*. <https://ir.mi.com/financial-information/quarterly-results> (Zugriff am 16.09.2025).

Xu, X., Dong, P., Liu, Y. & Zhang, H. (2018). Progress in automotive transmission technology. *Automotive Innovation*, 1(3), 187–210.
<https://doi.org/10.1007/s42154-018-0031-y>

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6. Aufl.). Los Angeles et al.: Sage.

Zeihisel, F., Thurnes, C. M., Zlotin, B. & Zusman, A. (2013). Guided innovation by using directed evolution for next product generation. In *Proceedings of the XXIV ISPIM Conference – Innovating in Global Markets: Challenges for Sustainable Growth*, Helsinki, Finland, 16.–19.06.2013.

Zhao, X., Jiang, C., & Chen, Y. (2006). *Battery pack shell, battery pack, and backup box* (CN100595946C) [Patent]. Google Patents. Verfügbar unter <https://patents.google.com/patent/CN100595946C/en> (Zugriff am 19.03.2026).

Zlotin, B. & Zusman, A. (2013). Patterns of technological evolution. In *Encyclopedia of creativity, invention, innovation and entrepreneurship* (S. 1438–1446). New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3858-8_40

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Forschungsarbeit am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden:

Dayan, E. (2024). *Systematische Analyse zur Wechselwirkung zwischen Produktumfeld und Systemgenerationsentwicklung als Evolution der tragbaren Lautsprecher der Ultimate-Ears-BOOM-Familie*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Demuth, T. (2024). *Success factors for the development of major and complex engineering projects – A benchmark study of the launcher industry*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Ding, S. (2022). *Analysis of the evolution of BYD batteries with the model of PGE – Product Generation Engineering*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

- Eberhardt, C. (2022). *Analyse der Wechselwirkungen zwischen Produktumfeld und Produktgenerationsentwicklung der Toyota Hybridantriebe*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Eloy, M. C. (2025). *Konzeption eines KI-basierten Assistenzsystems zur Unterstützung der Systemgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Goetz, G. T. (2022). *Analyse der Wechselwirkung zwischen Produktumfeld und Produktgenerationsentwicklung des Apple iPhone*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Kempf, S. (2020). *Analyse evolutionstheoretischer Ansätze in der Technik und Evaluation der Anwendbarkeit in der Produktentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Kubisch, J. (2021). *Charakterisierung der Produktentwicklung von Start-ups und Entwicklung methodischer Unterstützung mit dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Müller, K. A. (2023). *Entwicklung einer Methode zur Modularisierung mechatronischer Systeme für verschiedene Use-Cases anhand des Fallbeispiels eines mobilen Assistenzsystems*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Nowak, M. (2021). *Erfolgreiche und gescheiterte Produkte – Analyse von Fallbeispielen im Bereich mechatronischer Produkte mit dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Patlakis, C. (2021). *Einfluss des Produktumfelds auf den Innovationserfolg von Produkten – Retrospektive Analyse von Fallbeispielen im Bereich mechatronischer Produkte*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Völk, T. (2021). *Die retrospektive Analyse einer Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Turmuhrenfabrik J. F. Weule*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind:

- Albers, A., Düser, T., Kuebler, M., Schwarz, S. E., Lickefett, M. S. M., Pfaff, F. & Thümmel, C. (2023). Upgradeable mechatronic systems – Definition and model of upgrades in the context of the model of SGE – System Generation Engineering. In *Proceedings of the FISITA – Technology and Mobility Conference Europe 2023*, Barcelona, Spanien, 12.–15.09.2023. Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA). <https://doi.org/10.46720/fwc2023-sel-009>
- Albers, A., Düser, T., Klippert, M. & Pfaff, F. (2024). Den Transfer von Entwicklungsmethoden in die Unternehmenspraxis durch Kooperation gestalten. In Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP e. V. (Hrsg.), *WiGeP News*, 1/2024, 4–5.
- Albers, A., Düser, T., Ott, S., Klippert, M., Pfaff, F., Schwarz, S., Kübler, M., Thümmel, C., Schlegel, M. & Bause, K. (2025). Co-Creation between universities and companies: ASD – Agile Systems Design innovation formats. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2025 – Tagungsband*, Stuttgart, 22.05.2025. Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Düser, T., Pfaff, F. & Schlegel, M. (2025). SGE – Systemgenerationsentwicklung: Grundlage für KI und datengetriebene Methoden. In Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP e. V. (Hrsg.), *WiGeP News*, 1/2025, 6–7.
- Albers, A., Hahn, C. H., Brecht, P., Cetinkaya, Ü., Pfaff, F., Schlegel, M. & Fischer, M. (2025). Digital platform business model within the model of SGE – System Generation Engineering: Definition and classification in cyber-physical systems. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (S. 273–284). IEOM Society International. <https://doi.org/10.46254/AU02.20230078>
- Albers, A., Hünemeyer, S., Kubin, A., Pfaff, F., Schlegel, M. & Rapp, S. (2023). Modeling technical systems in the early phase: Proposing a formal definition for the system concept. *Proceedings of the Design Society*, 3, 2695–2704. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.270>

- Albers, A., Pfaff, F., Braumandl, A., Frank, N., Tusch, L., Renz, R. & Ott, S. (2025). Kundenorientierte Innovationspotenziale durch KI. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 120(S1), 85–89. <https://doi.org/10.1515/zwf-2024-0126>
- Albers, A., Pfaff, F. & Jäckle, M. (2023). Studierende auf dem Weg zur verantwortungsvollen Forschung und Produktentwicklung begleiten. *Konstruktion*, 75(1–2). Düsseldorf: VDI Fachmedien. <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2023-01-02>
- Albers, A., Pfaff, F., Thümmel, C. & Düser, T. (2025). *Insights into system evolution from a cross-case analysis using the model of SGE – System Generation Engineering*. In *Proceedings of the 8th European Industrial Engineering and Operations Management Conference*, Paris, Frankreich (S. 373–385). IEOM Society International. <https://doi.org/10.46254/EU08.20250255>
- Brecht, P., Hendriks, D., Niever, M., Hahn, C., Pfaff, F., Rapp, S. & Albers, A. (2023). Linking digital B2B platform business models and product development: A bibliometric analysis and literature review. *Proceedings of the Design Society*, 3, 2465–2474. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.247>
- Brecht, P., Keller, S., Niever, M., Hahn, C., Pfaff, F. & Albers, A. (2023). Product digital-platform-business co-design: A systematic sprint approach. *Procedia CIRP*, 119, 495–500. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.111>
- Grauberger, P., Bremer, F., Pfaff, F., Tröster, P., Nelius, T., Eisenmann, M., Stöberl, T., Albers, A. & Matthiesen, S. (2022). Gaining insights through qualitative modelling – Industrial project analysis with focus on derived hypotheses based on the contact and channel approach. *Procedia CIRP*, 109, 478–483. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.281>
- Krüger, M., Jäckle, M. & Pfaff, F. (2023). Teaching ethics as a practical exercise in reflexion in a project-based engineering course. In *Proceedings of the 51st Annual Conference of the European Society for Engineering Education (SEFI)* (S. 2332–2343). European Society for Engineering Education. <https://doi.org/10.21427/rxtm-f615>
- Schlegel, M., Kempf, C., Pfaff, F., & Albers, A. (2025). Evaluation of a descriptive approach for product portfolio modeling – A no-success story and what we can

learn from it. *Procedia CIRP*, 136, 1039–1044.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.176>

Pfaff, F., Eberhardt, C., Patlakis, C., Nowak, M., Rapp, S. & Albers, A. (2022).

Descriptive model for evolutionary innovation research in product generation engineering. In *Proceedings of the XXXIII ISPIIM Innovation Conference: Innovating in a Digital World*, Kopenhagen, Dänemark.

Pfaff, F., Götz, G. T., Rapp, S. & Albers, A. (2023). Evolutionary perspective on

system generation engineering by the example of the iPhone. *Proceedings of the Design Society*, 3, 1715–1724. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.172>

Pfaff, F., Kubisch, J., Rapp, S. & Albers, A. (2021). Characterizing product

development processes in start-ups – An empirical study. In *Proceedings of the XXXII ISPIIM Innovation Conference*, Berlin, Deutschland, 20.–23.06.2021.

Pfaff, F., Kempf, S., Rapp, S. & Albers, A. (2022). Review of evolutionary

approaches in design research to support PGE – Product Generation Engineering. In *Proceedings of NordDesign 2022*, Kopenhagen, Dänemark, 16.–18.08.2022. <https://doi.org/10.35199/NORDDESIGN2022.15>

Pfaff, F., Rapp, S. & Albers, A. (2021a). Modelling and visualizing knowledge on

the reference system and variations based on the model of PGE – Product Generation Engineering for decision support. *Proceedings of the Design Society*, 1, 2167–2176. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.478>

Pfaff, F., Rapp, S. & Albers, A. (2021b). Virtual-Reality-Umgebung für die

Visualisierung von Entwicklungszielgrößen auf Basis des Referenzsystems im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In *EEE 2021 – Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2021* (S. 175–187).

Hrsg.: R. Stelzer. TUDpress. <https://doi.org/10.25368/2021.20>

Pfaff, F., Schlegel, M., Völk, T. A., Reinheckel, K. T. & Albers, A. (2024). Using

product profiles for retrospective case studies in SGE – System Generation Engineering. *Proceedings of the Design Society*, 4, 2695–2704. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.272>

Schlegel, M., Just, M., Pfaff, F., Wiederkehr, I., Koldewey, C., Kempf, C.,

Dumitrescu, R., & Albers, A. (2024). Future robust product portfolio

development: Modelling innovation potentials in product portfolios. *Procedia CIRP*, 128, 555–560. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.036>

Schlegel, M., Kempf, C., Pfaff, F., & Albers, A. (2025). Evaluation of a descriptive approach for product portfolio modeling – A no-success story and what we can learn from it. *Procedia CIRP*, 136, 1039–1044. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.176>

Schlegel, M., Pfaff, F., Rapp, S., & Albers, A. (2022). Implications of creating solution concepts based on the use of references. *Proceedings of the Design Society*, 2, 781–790. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.80>

Völk, T. A., Dehghani, R., Klippert, M., Pfaff, F., Stolpmann, R., Nowak, K., Koziol, A. & Albers, A. (2025). Structuring inconsistency situations in engineering of cyber-physical systems – A description template proposal. *Procedia CIRP*, 136, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.011>

Völk, T. A., Nowak, K., Pfaff, F., Dehghani, R., Düser, T., Koziol, A., & Albers, A. (2025). Consistently inconsistent: AI-analyzed patterns in inconsistency situations of cyber-physical systems development. In *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE 2025)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/ISSE65546.2025.11370100>

Anhang A Fallstudien

Im Folgenden werden die elf weiteren Fallstudienkapitel präsentiert, die in Kapitel 6 aufgrund der Lesbarkeit des Hauptteils der vorliegenden Dissertation nicht ausgeführt wurden.

Xiaomi: Mi Ultra

Mi Ultra ist die High-End-Smartphone-Produktfamilie des chinesischen Elektronikherstellers Xiaomi Tech (im Folgenden kurz: Xiaomi), der 2011 mit dem Xiaomi Mi 1 zunächst in den chinesischen Smartphone-Markt einstieg. 2019 kommt Xiaomi mit dem Mi 9T Pro über Amazon auch auf den deutschen Markt (connect, 2019). Ab 2020 wird mit der „Ultra“-Variante erstmals eine gezielt als High-End-Smartphone vermarktete Produktvariante auf den Markt gebracht. Folgender Produktprofil-Claim wurde für die G_{10}^{10} Ultra rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das mit der Leistung anderer High-End-Smartphones in-best-class liegt und sich über Kamera und Design differenziert.

In der Fallstudie wurden die fünf bis 2024 erschienenen Systemgenerationen G_{10}^{10} Ultra, G_{11}^{11} Ultra, G_{12}^{12S} Ultra, G_{13}^{13} Ultra und G_{14}^{14} Ultra analysiert, die in Abbildung A.1 dargestellt sind. Eine initiale Datengrundlage wurde durch eine wissenschaftliche Hilfskraft erzeugt, die durch den Autor angeleitet wurde. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.



Abbildung A.1: Die fünf untersuchten Systemgenerationen des Mi Ultra
(Bildquellen: Notebookcheck, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024).¹

Systemmodell für das Mi Ultra

Die Systemgenerationen des Mi Ultra wurden ähnlich der des iPhones mit **13 Subsystemen** auf einer Ebene modelliert.

Evolution des Mi Ultra

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.2 dargestellt. Xiaomi veröffentlicht lediglich den Umsatz für die gesamte Smartphone-Sparte (Xiaomi Corporation, 2025). Es wurde angenommen, dass der Umsatz der Smartphone-Sparte insgesamt ein Indikator für den Erfolg der High-End-Variante ist. Die $G_{12}^{12S\ Ultra}$ wurde aufgrund des gegenüber dem Vorjahr stark gesunkenen Umsatzes und des wahrscheinlich aufgrund der eingeschränkten globalen Verfügbarkeit (Huch, 2022) zusätzlich geringeren Anteils am Gesamtumsatz als eher **nicht**

¹ Verwendung gemäß Notebookcheck-Hinweis: ein Foto für nicht-kommerzielle Seiten mit sichtbarem Link und Nennung „Notebookcheck“:
 2020: <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-Mi-10-Ultra-Smartphone-Ist-der-Hype-um-das-Xiaomi-Handy-gerechtfertigt.508566.0.html>
 2021: <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-Mi-11-Ultra-Ein-wahrhaftiges-Schwergewicht-im-Smartphone-Bereich.541996.0.html>
 2022: <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-12S-Ultra-5G-Smartphone-mit-riesiger-Leica-Kamera-hinterlaesst-Unverstaendnis.641453.0.html>
 2023: <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-13-Ultra-Spektakulaeres-Smartphone-mit-variabler-Kamera-Blende-fuer-Leica-Fans.717210.0.html>
 2024: <https://www.notebookcheck.com/Test-Xiaomi-14-Ultra-Das-Leica-Phone-trumpft-maechtig-auf.817895.0.html>

erfolgreich eingeordnet. Die übrigen Generationen wurden als **erfolgreich** eingeordnet.

		Xiaomi: Mi Ultra														
SGE		Umfeld											Markterfolg			
	Produktprofil-Claim	Batterie	Kamera	Gehäuse	Mobilität und Konnektivität	CPU	Display	Physische Bedienelemente	Sensoren	Software	Speicher	Lautsprecher	Vibrationsmotor			
																Smartphone-Umsatz [Mrd. RMB]
															Markteintritt	

Abbildung A.2: Zentrale Visualisierung der Fallstudie Mi Ultra.

In der Fallstudie wurden aufgrund begrenzter öffentlich zugänglicher Informationen lediglich **Umfeldfaktoren** im mikroökonomischen Umfeld – Wettbewerbsdruck und Nachfrage – identifiziert.

Der **Produktprofil-Claim** der G₁₀^{10 Ultra} wurde gegenüber Vorgängergenerationen als AV eingestuft, da Xiaomi erstmals auf das High-End-Marktsegment zielte, die Grundfunktion des Produkts sich jedoch nicht wesentlich veränderte. Mit der G₁₂^{12S Ultra} fokussierte Xiaomi dann vorrangig auf eine Differenzierung zum Wettbewerb über die *Kamera*, unter anderem durch eine Kooperation mit dem Kamera-Traditionshersteller Leica. Durch diese Kooperation wurde die *Kamera* der

$G_{12}^{12S \text{ Ultra}}$ ausgehend von einem branchenexternen **RSE** mit PV entwickelt. Bei der Entwicklung der *Lautsprecher* arbeitete Xiaomi mit dem High-End-Lautsprecherhersteller Harman Kardon zusammen. Der *Vibrationsmotor* der $G_{10}^{10 \text{ Ultra}}$ hat starke Ähnlichkeit mit dem des Apple iPhone, dessen Vibrationsmotor sehr wahrscheinlich als externes RSE als Basis für die PV zur Verfügung stand. Alle anderen Variationsbeziehungen gingen von der jeweiligen Vorgängergeneration aus.

In der Verteilung der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** und die **Subsysteme** in Abbildung A.3 zeigen sich fünf PVs beschränkt auf die Subsysteme *Kamera*, *Display*, *Software* und *Vibrationsmotor*. Auf den Misserfolg der $G_{12}^{12S \text{ Ultra}}$ reagierte Xiaomi ohne PV und mit sehr hohem AV-Anteil von $\delta AV = 77\%$ in der $G_{13}^{13 \text{ Ultra}}$. Der Neuentwicklungsanteil war in allen fünf untersuchten Systemgenerationen auf hohem Niveau mit $\delta_{ND} > 50\%$. Die Prinzipvariationen des *Displays* kamen durch ein in der $G_{11}^{11 \text{ Ultra}}$ eingeführtes zusätzliches Display auf der Rückseite zustande, das in der $G_{12}^{12S \text{ Ultra}}$ wieder entfernt wurde. In der $G_{14}^{14 \text{ Ultra}}$ wurde mit dem Xiaomi HyperOS ein neues Betriebssystem eingeführt und damit ein neues Lösungsprinzip im Subsystem *Software* (PV).

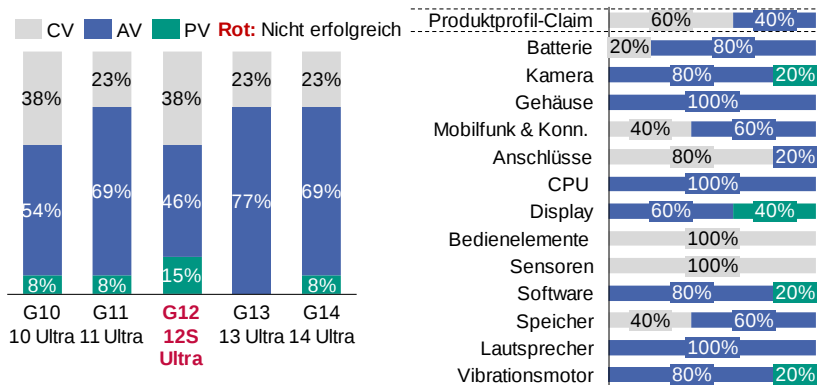


Abbildung A.3: Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (links) und Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (rechts) für die Fallstudie Mi Ultra.

Toyota: Getriebe des Hybrid Synergy Drive

Die erste Generation des Toyota Hybrid Synergy Drive Antriebsstrangs (THS) und des darin zentralen Hybridgetriebes (THS-G) wurde 1997 mit der ersten Produktgeneration des Toyota Prius in den japanischen Markt eingeführt. Dabei handelte es sich um einen leistungsverzweigten Hybridantrieb, der einen Verbrennungsmotor mit zwei elektrischen Maschinen (EM1 und EM2) kombiniert. Die Leistungsflüsse der drei Kraftmaschinen werden in einem Getriebe kombiniert, wobei die beiden E-Maschinen sowohl motorisch als auch generatorisch wirken können und der Hybridantrieb verschiedene Fahrmodi realisieren kann. Für weitere Details zur Funktionsweise siehe Hofmann (2014, 249 f.). Folgender Produktprofil-Claim wurde für die $G_1^{\text{Komp, P110}}$ rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das einen leistungsverzweigten, selbstladenden Hybridantrieb für Fahrzeuge der Kompaktklasse mit Frontantrieb realisiert, um einen effizienten Betrieb zu ermöglichen.

In der Fallstudie wurden 20 Systemgenerationen von 1997 bis 2020 untersucht. Die Systemgenerationen wurden weiter in die sieben Produktvarianten Kleinwagen (Klein), Kompaktklasse (Komp), Van, Mittelklasse (MK), SUV, obere Mittelklasse (OMK) und Oberklasse (OK) unterteilt. Der Generationen-Index wird dabei innerhalb der Produktvarianten gezählt. Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen einer Co-betreuten Abschlussarbeit (Eberhardt, 2022)² erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Ein Teil der Ergebnisse wurde in einem früheren Stand auf einer Fachkonferenz (Pfaff, Eberhardt et al., 2022) veröffentlicht. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für das THS-G

Für die Analyse wurde das Hybridgetriebe (THS-G), wie in Abbildung A.4 dargestellt, mit drei Subsystemen auf einer Ebene modelliert.

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

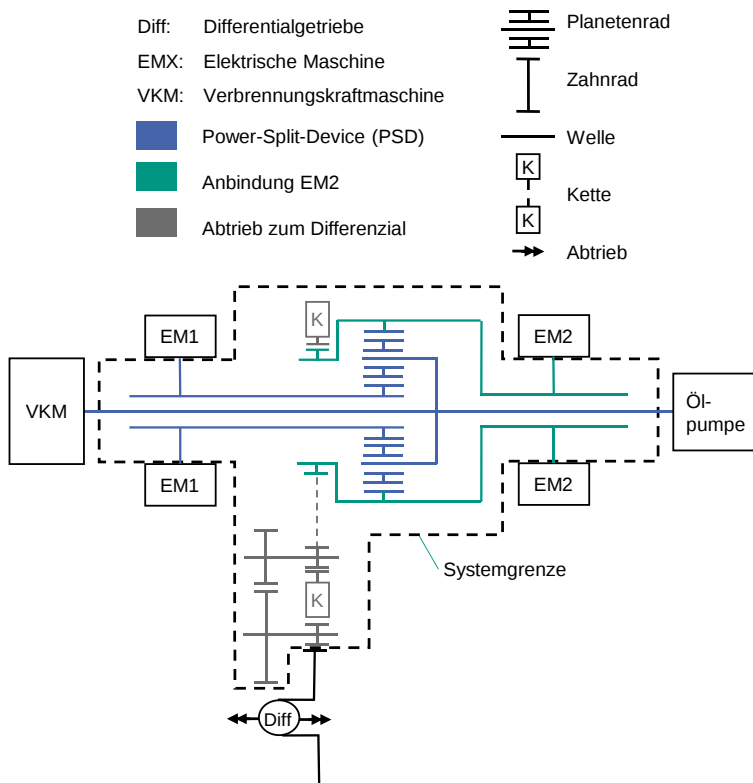


Abbildung A.4: Systemmodell für die Fallstudie Toyota Hybrid Synergy Drive Hybridgetriebe anhand des $G_1^{THS-G, P110}$. Charakteristisch sind die Kette im Abtrieb zum Differential, das einfache Planetengetriebe und das koaxiale Layout der Kraftmaschinen. Abbildung nach Eberhardt (2022)³.

Das *Power-Split-Device (PSD)* teilt die Leistung des Verbrennungsmotors auf einen mechanischen und einen elektrischen Pfad auf. Dieses Subsystem umfasst die Anbindung des Verbrennungsmotors, die Anbindung von EM1 und das Planetenradgetriebe inklusive der Verzahnung des Hohlrads, welches die Leistung

³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

an den Abtrieb weitergibt. Die *Anbindung von EM2* beinhaltet die Motor-(Hohl-)Welle und ggf. weitere Zahnradstufen, Kupplungen und Planetensätze, bis der Leistungsfluss aller drei Kraftmaschinen wieder zusammenläuft. Der *Abtrieb zum Differenzial* beinhaltet alle Elemente nach der Zusammenführung des verzweigten Leistungsflusses. Das Differenzialgetriebe, Nebenaggregate und die beiden E-Maschinen lagen außerhalb der Systemgrenze. Das Getriebegehäuse, die Lagerungen und Schmierung/Dichtung wurden nicht tiefer analysiert, der Fokus lag auf dem Leistungsfluss.

Evolution des THS-G

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.5, Abbildung A.6, Abbildung A.7 und Abbildung A.8 dargestellt. Die Evolution des THS-G beginnt mit der $G_1^{\text{Komp, P110}}$ in der Kompakt-**Variante** und verzweigt sich nach der $G_3^{\text{Komp, P112}}$ zuerst auf SUV, Mittelklasse und Oberklasse und danach weiter über die Kompaktklasse bis zu den Kleinwagen. Alle Systemgenerationen des Getriebes wurden anhand ihrer Verkaufszahlen als **erfolgreich** eingestuft. Im untersuchten Zeitraum von 1997 bis 2020 stiegen die Verkaufszahlen von Toyota-Hybridfahrzeugen mit kleineren Einbrüchen 1999 (-13,3 %), 2011 (-9,3 %), 2014 (-0,9 %), 2015 (-3,9 %) kontinuierlich an (Toyota Motor Corporation, 2022; 2024).

Die Evolution des THS-G war stark Umfeld getrieben. Nach den identifizierten **Umfeldfaktoren** waren aus dem makroökonomischen Umfeld sowohl gesellschaftliche als auch politische und rechtliche Faktoren, insbesondere die progressive CO₂-Gesetzgebung, relevant. Auch die Finanzkrise beeinflusste die Nachfrage. Ähnlich dem iPhone schaffte Toyota mit dem $G_1^{\text{Komp, P110}}$ eine Nische, die schon in der nächsten Systemgeneration $G_2^{\text{Komp, P111}}$ von Wettbewerbern umkämpft war. Auf organisatorischer Ebene unterstützten eine hohe vertikale Integration und eine ab 2015 explizit auf CO₂-Reduktion ausgerichtete Strategie.

Umfeld					Markt- erfolg
	Makroökonomisch	Mikroökonomisch	Unternehmen	Umfeldfaktoren	Markt- erfolg qualitativ
				Recht /Strenge der Regulierung /hoch Gesellschaft /Akzeptanz /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /niedrig Infrastruktur /Verfügbarkeit /niedrig Produktentwicklung /Agilität /hoch Strategie /Veränderungsbereitschaft /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch	1997 erfolgreich
				Recht /Strenge der Regulierung /hoch Politik /Anreiz /hoch Gesellschaft /Akzeptanz /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Infrastruktur /Verfügbarkeit /niedrig Organisation /Vertikale Integration /hoch	2000 erfolgreich
				Recht /Strenge der Regulierung /hoch Politik /Anreiz /hoch Gesellschaft /Akzeptanz /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Infrastruktur /Verfügbarkeit /niedrig Organisation /Vertikale Integration /hoch	2004 erfolgreich
				Politik /Anreiz /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch	2005 erfolgreich
				Politik /Anreiz /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch	2006 erfolgreich
				Krise /Positiver Effekt auf die Nachfrage /hoch Politik /Anreiz /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch	2007 erfolgreich

Abbildung A.6: Zentrale Visualisierung der Fallstudie THS-G Teil 1 (rechts).

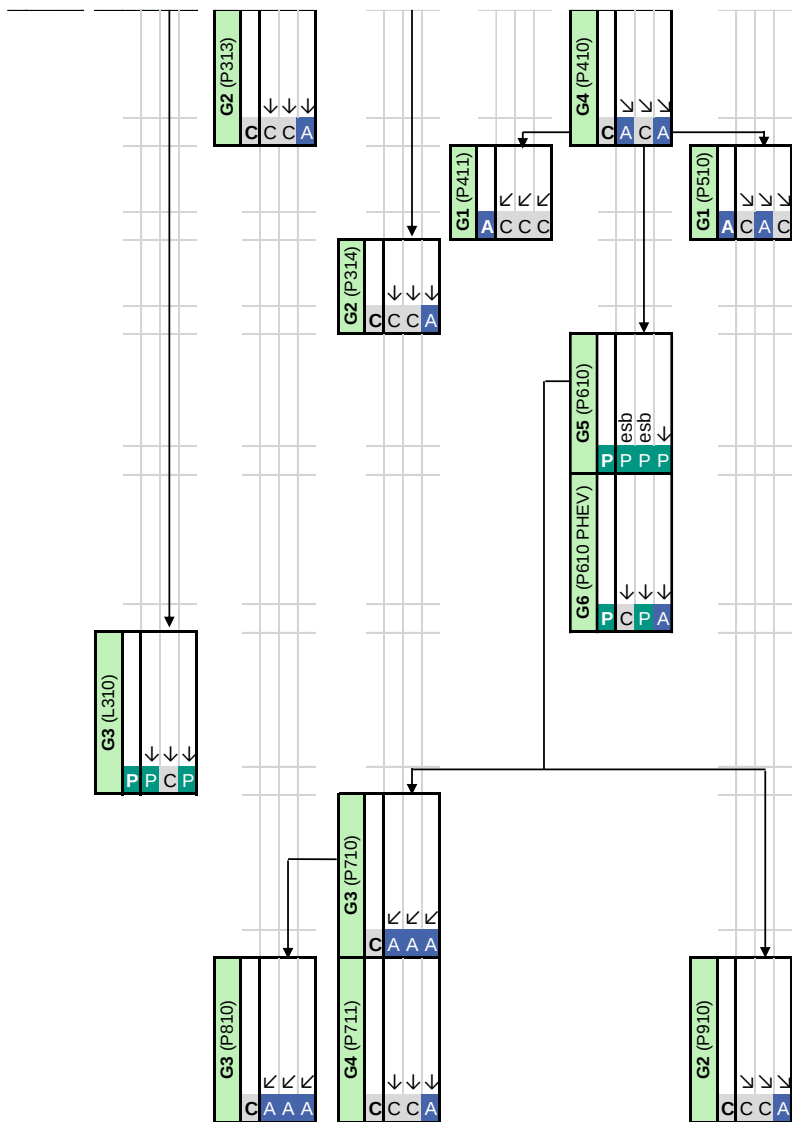


Abbildung A.7: Zentrale Visualisierung der Fallstudie THS-G Teil 2 (links).

Krise /Positiver Effekt auf die Nachfrage /hoch Politik /Anreiz /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch	2009	erfolgreich
Krise /Positiver Effekt auf die Nachfrage /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch	2011	erfolgreich
Krise /Positiver Effekt auf die Nachfrage /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch	2013	erfolgreich
Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch Produktentwicklung /Standardisierung /hoch Strategie /CO2-Reduktionsziele /hoch	2015	erfolgreich
Recht /Strenge der Regulierung /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch Produktentwicklung /Standardisierung /hoch Strategie /CO2-Reduktionsziele /hoch	2016	erfolgreich
Recht /Strenge der Regulierung /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch Produktentwicklung /Standardisierung /hoch Strategie /CO2-Reduktionsziele /hoch	2017	erfolgreich
Recht /Strenge der Regulierung /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch Produktentwicklung /Standardisierung /hoch Strategie /CO2-Reduktionsziele /hoch	2018	erfolgreich
Recht /Strenge der Regulierung /hoch Gesellschaft /Bedeutung von Nachhaltigkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch Organisation /Vertikale Integration /hoch Produktentwicklung /Standardisierung /hoch Strategie /CO2-Reduktionsziele /hoch	2019/ 2020	erfolgreich

Abbildung A.8: Zentrale Visualisierung der Fallstudie THS-G Teil 2 (rechts).

Nach der $G_1^{\text{Komp, P110}}$ wurden in sieben Systemgenerationen Subsysteme mit PV neuentwickelt. Bis auf die PV des $G_2^{\text{THS-G, L210}}$, die eine Vereinfachung des Layouts zur Folge hatte, ging mit den PV im technischen System eine PV des **Produktprofil-Claims** einher, da in allen übrigen PV-Systemgenerationen neuer Kunden- oder Anwendernutzen realisiert wurde:

- $G_1^{\text{SUV, P310}}$: Einführung eines zweiten am Steg abgestützten Planetensatzes, das Compound-Gear-Hohlrad, und einer Zahnradstufe statt einer Kette (Mizuno et al., 2009; Xu et al., 2018)
- $G_1^{\text{OMK, L110}}$: Einführung eines schaltbaren Ravigneaux-Satzes und Abtrieb für Heckantrieb (Adachi et al., 2006; Hofmann, 2014)
- $G_1^{\text{OK, L110F}}$: Abtrieb für Allradantrieb über Torsen-Differenzial (Ito et al., 2007)
- $G_2^{\text{OMK, L210}}$: Einfacher Planetensatz mit festem Hohlrad statt Ravigneaux-Satz
- $G_5^{\text{Komp, P610}}$: Wechsel von einer coaxialen Anordnung der Kraftmaschinen zu einer parallelen Anordnung als Grundlage für die standardisierte TNGA-Architektur (Fushiki, 2016; Xu et al., 2018)
- $G_6^{\text{Komp, P610 PHEV}}$: Hinzufügen einer Freilaufkupplung im PSD, um EM1 und EM2 gleichzeitig als Traktionsantrieb nutzen zu können (Suzuki et al., 2017)
- $G_3^{\text{OMK, L310}}$: Vierstufiges Automatikgetriebe hinter dem PSD (Kato et al., 2017; Okuda et al., 2017)

Bei der Entwicklung der $G_1^{\text{Komp, P110}}$ waren interne **RSE** aus vorangegangenen prototypischen Entwicklungen seriell hybridisierter Antriebsstränge (Toyota Motor Corporation, 2017) und eines in den Markt gebrachten seriell hybridisierten Minibusses, dem Coaster Hybrid EV (Toyota Motor Corporation, 1997), relevant. Für die Entwicklung der $G_5^{\text{Komp, P610}}$ diente das Getriebe eines eng mit Toyota verbundenen Zulieferers, das Aisin HD-10, als externes RSE aus der gleichen Branche (Hisada et al., 2005; Müller, 2009, S. 17–20). Das $G_5^{\text{Komp, P610}}$ war das erste Getriebe der standardisierten „Toyota New Global Architecture“ (TNGA), das ab 2015 von allen Systemgenerationen, mit Ausnahme der $G_3^{\text{OMK, L310}}$, als zentrales RSE genutzt wurde. Auch vor der Einführung der TNGA stachen einzelne Systemgenerationen als zentrale RSE für folgende Systemgenerationen heraus, wie die $G_1^{\text{SUV, P310}}$ und die $G_4^{\text{Komp, P410}}$.

Mit dem verwendeten Systemmodell ließ sich keine Veränderung der **Architektur** beobachten.

Abbildung A.9 zeigt die **Variationsanteile über die Systemgenerationen**. Durch den geringen Detailgrad des Systemmodells wurden größere Änderungen des Getriebelayouts durch PV in den Subsystemen berücksichtigt.

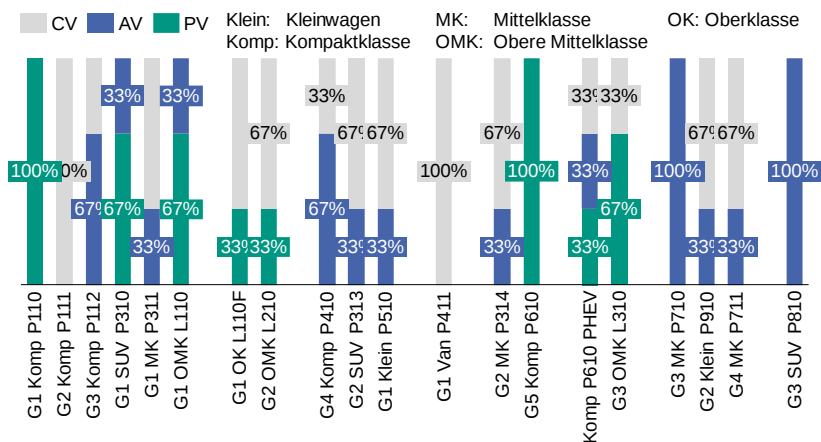


Abbildung A.9: Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie THS-G.

Aus dem Vergleich der **Variationsanteile je Subsystem** in Abbildung A.10 ist ersichtlich, dass jedes Subsystem mehrfach mit PV neuentwickelt wurde.

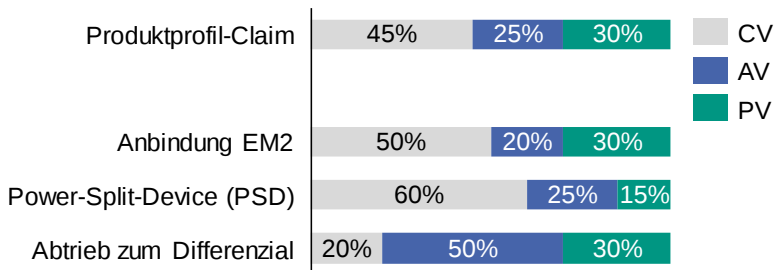


Abbildung A.10: Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und des Produktprofil-Claims für die Fallstudie THS-G.

Volkswagen: Doppelkupplungsgetriebe

Volkswagen (VW) führte 2003 mit dem DQ250 das erste Doppelkupplungsgetriebe (Dual Clutch Transmission – DCT) für Pkw in den Markt ein. Folgender Produktprofil-Claim wurde für die $G_1^{MT, DQ250}$ rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das die Anwendernutzen von Wandler-Stufenautomaten und Handschaltgetrieben kombiniert und so die Kundenakzeptanz und damit die Einbaurate von Automatikgetrieben insbesondere in Europa nachhaltig steigert.

Vorteile von Handschaltgetrieben im Vergleich zu klassischen Wandler-Stufenautomaten sind bessere Kraftstoffeffizienz und Fahrleistungen. Wandler-Stufenautomaten bieten dafür durch automatisiertes und zugkraftunterbrechungsfreies Schalten einen höheren Fahrkomfort. Doppelkupplungsgetriebe sollten diese Vorteile kombinieren. Ein Doppelkupplungsgetriebe kombiniert zwei autarke, ineinander geschachtelte Teilgetriebe über eine Doppelkupplung. Für weitere Details zur Funktionsweise siehe Naunheimer et al. (2019, 177 f.).

In der Fallstudie wurden fünf zwischen 2003 und 2016 von VW in den Markt eingeführte DCT untersucht. Die Systemgenerationen wurden weiter in drei Produktvarianten für niedrige, mittlere und hohe Drehmomente eingeteilt (low-, medium-, high-torque – LT, MT, HT). Für die erste Systemgeneration $G_1^{MT, DQ250}$ konnten ohne klar zuweisbare RSE keine Variationsarten bestimmt werden. Eine initiale Datengrundlage wurde durch eine wissenschaftliche Hilfskraft erzeugt, die durch den Autor angeleitet wurde. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für das VW DCT

Für die Analyse wurden die Systemgenerationen des VW DCT auf der ersten Systemebene in acht Subsysteme und auf der zweiten Systemebene in, je nach Systemgeneration, 24-28 Subsysteme unterteilt (Abbildung A.11). Subsysteme der ersten Ebene sind die Doppelkupplung (DK), die Kupplungen 1 und 2 (K1 & K2), die Eingangswellen 1 und 2 (EW1 & EW2), die Ausgangswellen 1 und 2 (AW1 & AW2) und die Rücklaufwelle für den Rückwärtsgang (RW). Auf der zweiten Ebene wurden diese Subsysteme weiter in die zentralen Konstruktionselemente unterteilt. Abbildung A.11 zeigt das Systemmodell. Das Differenzialgetriebe, Nebenaggregate und das Getriebegehäuse lagen außerhalb der Systemgrenze.

	Legende
1	DK: Anordnung von K1 & K2
2	DK: Lager und Lagerung
3	K1: Bauart und Anzahl Reibpaarungen
4	K1: Feder und Normalposition
5	K2: Bauart und Anzahl Reibpaarungen
6	K2: Feder und Normalposition
7	EW1: Lager und Lagerung
8	EW1: WNV Kupplung
9	EW1: Festrad 1
10	EW1: Festrad 2
11	EW1: Festrad 3
12	EW1: Festrad 4
13	EW2: Lager und Lagerung
14	EW2: WNV Kupplung

	Legende
15	EW2: Festrad 1
16	EW2: Festrad 2
17	AW1: Lager und Lagerung
18	AW1: Achsantrieb
19	AW1: SE1
20	AW1: SE2
21	AW2: Lager und Lagerung
22	AW2: Achsantrieb
23	AW2: SE1
24	AW2: SE2
25	RW: Lager und Lagerung
26	RW: Zahnrad 1
27	RW: Zahnrad 2
28	RW: SE

SE: Schalt-/Synchronisierungs-Einheit

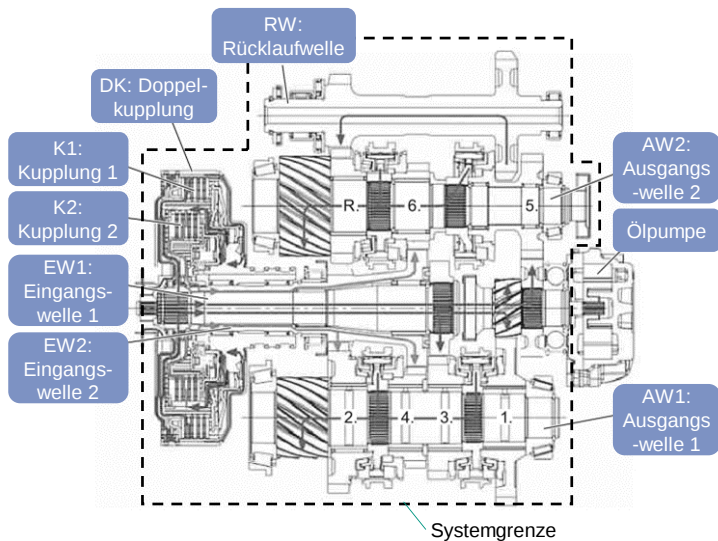


Abbildung A.11: Systemmodell für die Fallstudie VW DCT anhand der $G_1^{MT, DQ250}$ (Schnittdarstellung nach Naunheimer et al., 2019, S. 552).

Evolution des VW DCT

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.12 dargestellt. Die Getriebe wurden ähnlich der Toyota Hybrid Synergy Drive Hybridgetriebe in verschiedenen Fahrzeugen eingesetzt. So wurde die $G_3^{MT, DQ381}$ 2017 in 15 **Produktvarianten** in Fahrzeugen der A-Klasse bis zu kompakten SUVs verbaut (Bäumer, 2017, S. 18).

Die **Architektur** blieb innerhalb der Systemgrenzen ab der $G_1^{LT, DQ200}$ bis auf den Wegfall der Rücklaufwelle in der $G_1^{HT, DQ500}$ gleich. Ab der $G_1^{HT, DQ500}$ wird die Drehrichtungsumkehr im Rückwärtsgang über das Schaltrad des 2. Ganges als Zwischenrad realisiert (Hadler, Schäfer, Gröhlich & Lindemann, 2009, S. 7). Das $G_1^{MT, DQ250}$ war noch als Sechsgang-Getriebe, alle folgenden Systemgenerationen waren als Siebengang-Getriebe für den Front-Quer-Einbau konzipiert.

Alle Systemgenerationen der VW DCT wurden anhand der Einbaurate in Europa als **erfolgreich** eingestuft. Mit der $G_1^{MT, DQ250}$ stieg die Einbaurate von Automatikgetrieben in der Kompaktklasse von ehemals 5 bis 10 % mit konventionellen Stufenautomaten hin zu 20 bis 30 % (Hadler, Metzner, Schäfer, Gröhlich & John, 2008, S. 513). Diesen Trend setzten die folgenden Systemgenerationen auch in anderen Fahrzeugsegmenten fort (Volkswagen Newsroom, 2019). Überhitzungsprobleme der $G_1^{LT, DQ200}$ bei Stop-and-Go-Verkehr in feuchtwarmen Bedingungen waren 2013 Grund für eine Rückrufaktion von 1,6 Mio. Fahrzeugen (Schaal & Heide, 2013). Ursache für die Fehlfunktion waren unter höheren Getriebeöltemperaturen durch elektrisch leitfähig werdende Schwefel-Additive auftretende Steuergerät-Fehlfunktionen, was durch einen Getriebeölwechsel auf Mineralöl behoben werden konnte (Schaal, 2013). Trotz dieses Vorfalls wird die $G_1^{LT, DQ200}$ als am Markt erfolgreich eingestuft, da das VW DCT auch in den folgenden Systemgenerationen erfolgreich bleibt.

Die **Produktprofil-Claims** entwickelten sich über die betrachteten Systemgenerationen nach der $G_1^{MT, DQ250}$ mit AV weiter. Das VW DCT sollte effizienter und in anderen Fahrzeugsegmenten mit anderen Eingangsdrehmomentbereichen eingesetzt werden, die Hauptnutzen blieben aber unverändert.

Als relevante **Umfeldfaktoren** für die Evolution des VW DCT wurden die Akzeptanz der Automatikgetriebe-Technologie in der Gesellschaft und der hohe Wettbewerbsdruck identifiziert. Ähnlich dem THS-G und dem iPhone schuf das VW DCT eine Nische im Markt, die schnell von Wettbewerbern umkämpft wurde.

VW: DCT																																
SGE													Umfeld				Markt- erfolg															
Produktprofil-Claim	DK: Anordnung von K1 & K2	DK: Lager und Lagerung	K1: Bauart und Anzahl Reibpaarungen	K2: Feder und Normalposition	K2: Bauart und Anzahl Reibpaarungen	EW1: Lager und Lagerung	EW1: WNV Kupplung	EW1: Festrad 1	EW1: Festrad 2	EW1: Festrad 3	EW1: Festrad 4	EW2: Lager und Lagerung	EW2: WNV Kupplung	EW2: Festrad 1	EW2: Festrad 2	AW1: Achsantrieb	AW1: SE1	AW1: SE2	AW2: Lager und Lagerung	AW2: Achsantrieb	AW2: SE1	AW2: SE2	RW: Lager und Lagerung	RW: Zahnrad 1	RW: Zahnrad 2	RW: SE	Unternehmen	Mikroökonomisch	Makroökonomisch	Umfeldfaktoren	Markt eintritt	Markt- erfolg qualitativ
G1 HT (DQ250)	P	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	Absprungbasis	Gesellschaft /Akzeptanz /niedrig Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /niedrig	2003	erfolgreich	
G1 LT (DQ200)	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	Gesellschaft /Akzeptanz /niedrig Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /niedrig	2008	erfolgreich		
G1 HT (DQ500)	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	Gesellschaft /Akzeptanz /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	2009	erfolgreich		
G2 MT (DQ380)	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	Gesellschaft /Akzeptanz /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	2014	erfolgreich		
G3 MT (DQ381)	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	Gesellschaft /Akzeptanz /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch	2016	erfolgreich		

Abbildung A.12: Zentrale Visualisierung der Fallstudie VW DCT.

In der Evolution des VW DCT konnten nach der $G_1^{MT, DQ250}$ keine externen **RSE** identifiziert werden. RSE für die Entwicklung der $G_1^{MT, DQ250}$ konnte VW aus den bei Porsche seit den 1980ern im Rennsport eingesetzten Doppelkupplungsgetrieben (PDK) gewinnen (Schreiber, Rudolph & Becker, 2003, S. 2). Die $G_1^{LT, DQ200}$ für niedrigere Eingangsdrehmomente wurde basierend auf der $G_1^{MT, DQ250}$ und damit basierend auf einer Produktvariante mit höherem Eingangsdrehmoment entwickelt. Die $G_1^{HT, DQ500}$ basierte ebenfalls größtenteils auf der $G_1^{MT, DQ250}$. Die $G_2^{MT, DQ380}$ bezog ihre RSE aus der $G_1^{HT, DQ500}$ und diente wiederum als Basis für die $G_3^{MT, DQ381}$, dem direkten Nachfolger im mittleren Drehmomentbereich.

Bei der Analyse der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** in Abbildung A.13 fällt auf, dass nur bei der Entwicklung der $G_3^{MT, DQ381}$ Übernahmevariation vorkam. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in der Evolution nur die $G_3^{MT, DQ381}$ auf eine Vorgängergeneration mit ähnlichem maximalen Eingangsdrehmoment (380 Nm zu 420 Nm) folgte. Alle übrigen Generationen mussten selbst bei gleichem Lösungsprinzip AV in den Subsystemen und Konstruktionselementen vornehmen. Der hohe PV-Anteil von $\delta_{PV} = 61\%$ der $G_1^{LT, DQ200}$ ergab sich aus dem geänderten Doppelkupplungskonzept (von nasslaufenden, radial geschachtelten Lamellenkupplungen zu axial gestaffelten Einscheiben-Trockenkupplungen) sowie geänderten Lagerungs- und Zahnradstufenkonzepten (Übergang von 6- auf 7-Vorwärtsgänge) auf Eingangswelle 1 und der Rücklaufwelle. Die Prinzipvariationen in der $G_1^{HT, DQ500}$ resultierten aus einem geänderten Lagerungskonzept (von Radial- und Axial-Zylinderrollenlager auf Nadellager) und geändertem Lamellenpaket der Doppelkupplung sowie Änderung einiger Welle-Nabe-Verbindungen und des Rückwärtsgang-konzepts (s.o.).

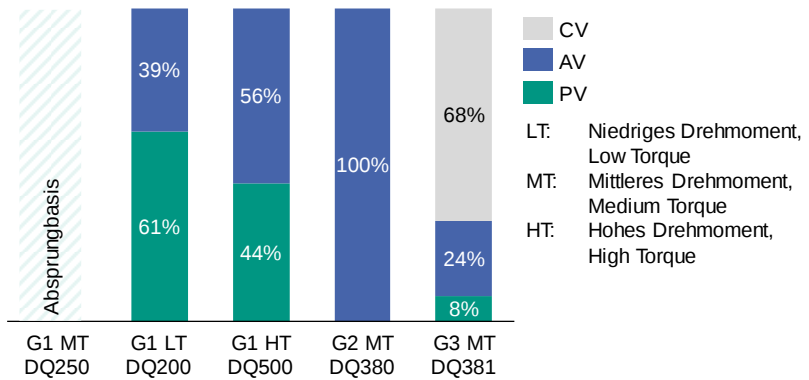


Abbildung A.13: Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie VW DCT.

Ab der $G_1^{HT, DQ500}$ traten keine PV in den Subsystemen mehr auf, bis auf die Änderung des Lagerungskonzepts der *Ausgangswelle 2* in der $G_3^{MT, DQ381}$. Auf eine detailliertere Diskussion der **Variationsanteile je Subsystem** wurde an dieser Stelle aufgrund des hohen Detaillierungsgrads des Systemmodells verzichtet.

Google: Glass

Die Google Glass war ein Augmented-Reality-Head-Mounted-Display (AR-HMD, umgangssprachlich „Datenbrille“ oder „Smart Glasses“), das 2014 erstmals in den Markt eingeführt wurde. Von der Google Glass wurden vier Systemgenerationen entwickelt, die über verschiedene Vertriebskanäle an wechselnde Kundengruppen vertrieben wurden. Im März 2023 stellte Google den Verkauf und den Support der Google Glass ein (Google, 2023). Die Google Glass wird häufig als Fallbeispiel für ein gescheitertes Produkt herangezogen. Auffallend am Produktprofil der $G_1^{\text{Explorer Ed.}}$ ist, dass mit der Markteinführung keine Use-Cases für die breite Bevölkerung kommuniziert wurden, in denen die Google Glass Nutzen stiften sollte (Kuhn & Bernau, 2014) und damit kein Bedarf adressiert wurde. Folgender **Produktprofil-Claim** wurde für die $G_1^{\text{Explorer Ed.}}$ rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das Privatzutzern ein neuartiges Augmented Reality Erlebnis mit in Echtzeit angezeigten relevanten Informationen in Relation zur Realität bietet, sich intuitiv bedienen lässt und sich dabei wie eine normale Brille trägt.

In der Fallstudie wurden alle vier Systemgenerationen $G_1^{\text{Explorer Ed.}}$, $G_2^{\text{Explorer Ed. 2}}$, $G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$ und $G_4^{\text{Enterprise Ed. 2}}$ untersucht. Abbildung A.14 zeigt zwei der vier untersuchten Systemgenerationen.



Abbildung A.14: Zwei der vier untersuchten Systemgenerationen der Google Glass (Bildquellen: $G_1^{\text{Explorer Ed.}}$: Cooper Hewitt - Design Museum, 2017, Lizenz CC0; $G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$: Notebookcheck 2017⁴).

⁴ Verwendung gemäß Notebookcheck-Hinweis: ein Foto für nicht-kommerzielle Seiten mit sichtbarem Link und Nennung „Notebookcheck“: <https://www.notebookcheck.com/Google-Glass-Rueckkehr-der-Datenbrille-als-Enterprise-Edition.235818.0.html>

Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen von zwei Co-betreuten Abschlussarbeiten (Nowak, 2021; Patlakis, 2021)⁵ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Ein Teil der Ergebnisse wurde in einem früheren Stand auf einer Fachkonferenz (Pfaff, Eberhardt et al., 2022) veröffentlicht. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für die Google Glass

Die Systemgenerationen der Google Glass wurden mit **9 Subsystemen** auf einer Ebene modelliert. Abbildung A.15 zeigt exemplarisch anhand der G₁^{Explorer Ed.} die Zuordnung einzelner Bauteile zu den Subsystemen. Der Chipsatz wurde aufgeteilt in CPU inklusive RAM und Hauptspeicher. Der Software-Anteil wurde nicht betrachtet.

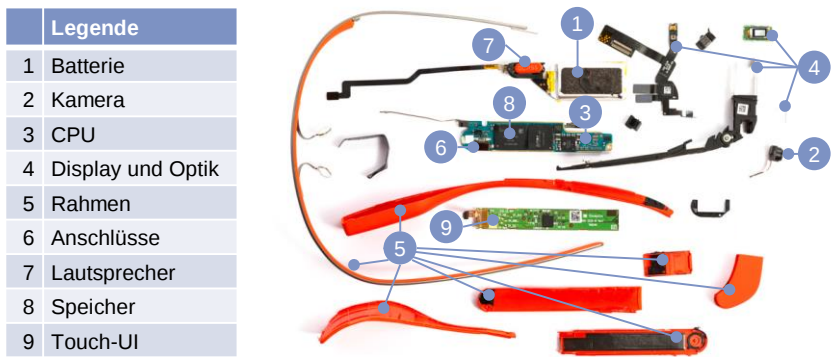


Abbildung A.15: Systemmodell für die Fallstudie Google Glass anhand der G₁^{Explorer Ed.} (Teardown-Abbildung aus Torborg & Simpson, 2014, <http://www.catwig.com/google-glass-teardown/>, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>)

⁵ Co-betreute Abschlussarbeiten (unveröffentlicht)

Evolution der Google Glass

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.16 dargestellt. Die grundlegende **Architektur** veränderte sich über die vier Systemgenerationen nicht. Die ersten beiden Systemgenerationen wurden als **nicht erfolgreich** eingestuft. Es ließen sich keine verlässlichen Verkaufszahlen finden, aber Google stoppte 2015 den Verkauf der $G_2^{\text{Glass, Explorer Ed. 2}}$ (Reynolds, 2015), was als Misserfolg bewertet wird. Der **Produktprofil-Claim** wurde von der $G_2^{\text{Explorer Ed. 2}}$ zur $G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$ mit PV entwickelt. Mit der $G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$ änderte Google die Zielgruppe der Google Glass von Privatanutzern auf Unternehmenskunden und damit den Kundennutzen von einem neuartigen Augmented-Reality-Erlebnis hin zu Effizienzgewinnen in Unternehmensprozessen (Google, 2021a; Reynolds, 2015). Mit der $G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$ wurden einige Industrie Use-Cases erfolgreich umgesetzt (Google, 2021a), daher wurde diese Systemgeneration hinsichtlich des Markterfolgs als indifferent und **eher erfolgreich** klassifiziert. Die $G_4^{\text{Enterprise Ed. 2}}$ verkaufte sich nicht den Erwartungen entsprechend, wurde 2023 eingestellt (Google, 2023) und als **nicht erfolgreich** eingestuft.

Die Evolution der Google Glass wurde in den ersten beiden Systemgenerationen für Privatanutzer von makroökonomischen **Umfeldfaktoren** beeinflusst. Die niedrige gesellschaftliche Akzeptanz und Befürchtungen hinsichtlich Datensicherheit und Persönlichkeitsrechten führten zur Gründung der „Stop the Cyborgs“-Bürgerinitiative in den USA (Beuth, 2014) und zu lokalen Verboten im öffentlichen Raum (Clauß, 2015; Fischer, 2018). Mikroökonomisch wurde der Wettbewerbsdruck ab der $G_3^{\text{Enterprise Ed.}}$ höher – zwischen 2016 und 2018 brachten andere Anbieter wie Microsoft, Meta und Magic Leap AR-HMDs mit Fokus auf Industrieanwendungen auf den Markt (Fischer, 2018). Direkte Kundenkritik an der $G_1^{\text{Explorer Ed.}}$ bezog sich unter anderem darauf, dass die Verwendung von Brillengläsern mit Sehstärke nur schwer möglich war (Forbes, 2014). Im internen Umfeld wechselte Google mit jeder Systemgeneration die Vertriebskanäle des Geschäftsmodells (Herbig, 2020).

Instruments OMAP der G₁_{Explorer Ed.} und G₂_{Explorer Ed. 2} (Torborg & Simpson, 2014) auf Intel Atom in der G₃_{Enterprise Ed.} (Hall, 2017) und auf ARM-Snapdragon in der G₄_{Enterprise Ed. 2} (Google, 2021b). Das Subsystem CPU wurde damit in drei von vier Systemgenerationen am häufigsten mit PV weiterentwickelt.

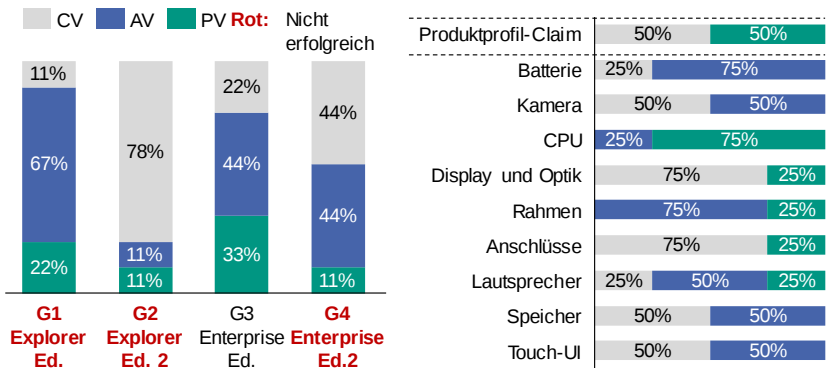


Abbildung A.17: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie Google Glass.

Vorwerk: Thermomix

Der Thermomix ist eine Küchenmaschine der Vorwerk GmbH & Co. KG (kurz „Vorwerk“), welche die Funktionen verschiedener Einzelgeräte inklusive einer Kochfunktion in einem vereint (Gärtner & Heinrich, 2018). 1971 wurde mit dem VM2000 der erste Mixer mit Kochfunktion in den Markt eingeführt (Vorwerk, 2021a). Folgender Produktprofil-Claim wurde für die G_1^{VM2000} rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das gleichzeitiges Mixen und Erhitzen in einem Küchengerät vereint, um insbesondere Suppen einfacher zubereiten zu können.

Als „Thermomix“ wurde das Produkt ab der G_3^{TM3000} vermarktet. Im Rahmen der Fallstudie wurden die acht von 1971 bis 2019 erschienenen Systemgenerationen G_1^{VM2000} , G_2^{VM2200} , G_3^{TM3000} , G_4^{TM3300} , G_5^{TM21} , G_6^{TM31} , G_7^{TM5} und G_8^{TM6} untersucht.

Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen von zwei Co-betreuten Abschlussarbeiten (Nowak, 2021; Patlakis, 2021)⁶ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht. Kurz vor Fertigstellung dieser Arbeit wurde die neunte Systemgeneration $G_9^{Thermomix, TM7}$ vorgestellt (Vorwerk, 2025b), welche in der Studie nicht mehr berücksichtigt werden konnte.

Systemmodell für den Thermomix

Die untersuchten Systemgenerationen des Thermomix wurden mit sechs bis neun Subsystemen auf einer Ebene modelliert. Abbildung A.18 zeigt exemplarisch anhand der G_7^{TM5} die Zuordnung einzelner Bauteile zu den Subsystemen.

⁶ Co-betreute Abschlussarbeiten (unveröffentlicht)

	Legende
1	Gehäuse
2	Anbindung zur Online-Kochplattform
3	Antriebssystem
4	Heizplatte
5	Mixmesser

	Legende
6	Mixtopf
7	Waage
8	Bedienschnittstelle
9	Dampfgaraufsatz

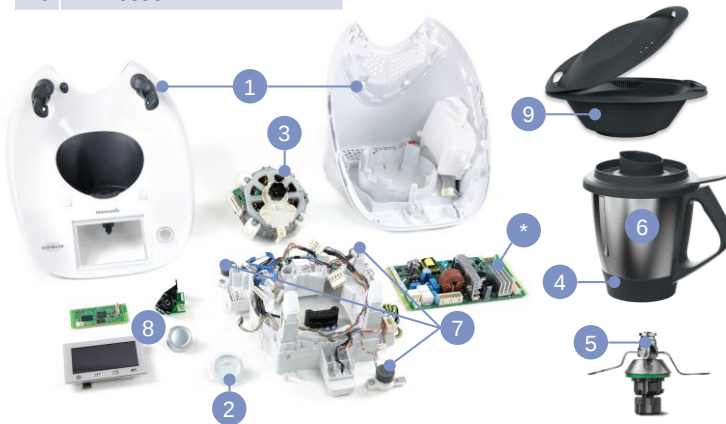


Abbildung A.18: Systemmodell für die Fallstudie Thermomix anhand der G₇^{TM5} (Teardown-Abbildung nach Isakeit, 2018, <https://de.ifixit.com/Teardown/Thermomix+TM5+Teardown/117133>, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>). Die Elektronik-Hardware (*) und Software wurden in der Fallstudie nicht detailliert betrachtet.

Evolution des Thermomix

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.19 und Abbildung A.20 dargestellt. Von der ersten bis zur vierten Systemgeneration veränderte sich die **Architektur** nicht. Danach kamen schrittweise die Waage und der *Dampfgaraufsatz* in der G₅^{TM21} sowie die *Anbindung zur Online-Kochplattform* in der G₇^{TM5} hinzu. Alle Systemgenerationen des Thermomix wurden als **erfolgreich** eingestuft. In den ersten sechs Generationen stiegen die Verkaufszahlen (PwC, 2021) und von der sechsten zur achten Generation der Umsatz (Dammers, 2020; Vorwerk, 2024) kontinuierlich an.

Vorwerk: Thermomix												
		SGE				Umfeld					Markt- erfolg	
		Produktprofil-Claim										
		Gehäuse	Antriebssystem	Heizplatte	Mixtopf	Mixmesser	Bedienmittstelle	Dampfgaraufsatz	Waage	Anbindung zur Kochplattform		
		int	int	esb	int	int	int					
		P	A	A	P	A	P					
						Makroökonomisch						
						Mikroökonomisch						
						Unternehmen						
						Umfeldfaktoren						
											Markteintritt	
											Verkaufte Einheiten, Anzahl oder Umsatz	
G1 (VM 2000)		int	int	esb	int	int	int				1971	steigender Umsatz
G2 (VM 2200)		↓	↓	↓	↓	↓	↓				1977	steigender Umsatz
G3 (TM 3000)		↓	↓	↓	↓	↓	↓				1980	steigender Umsatz
G4 (TM 3300)		↓	↓	↓	↓	↓	↓				1982	steigender Umsatz
G5 (TM21)		↓	↓	↓	↓	↓	↓	edb	esb		1996	steigender Umsatz

Abbildung A.19: Zentrale Visualisierung der Fallstudie Thermomix Teil 1.

Der **Produktprofil-Claim** wurde in der G_3^{VM3000} , G_5^{TM21} , G_6^{TM31} und G_8^{TM6} mit der Integration weiterer Kochfunktionen und dadurch der Ermöglichung weiterer Use-Cases mit AV weiterentwickelt. Die einzige PV des Produktprofil-Claims wurde in der G_7^{TM5} durch die Einführung des „Guided Cooking“ über das Plattform-Geschäftsmodell vorgenommen.

Bei der Entwicklung der ersten Systemgeneration G_1^{VM2000} konnte Vorwerk auf **RSE** aus dem eigenen Produktportfolio, wie Subsystemen des Mixers VKM 5 aufbauen (Gärtner & Heinrich, 2018; Vorwerk, 2021a). In der Evolution dienten mehrere externe RSE als Basis, insbesondere bei zur Architektur hinzugefügten Subsystemen in der G_5^{TM21} und G_7^{TM5} . Für die Entwicklung des *Dampfgaraufsatzes* waren japanische Bast-Dampfgarer ein wichtiges RSE (Vorwerk, 2021b).

Aus dem Vergleich der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** in Abbildung A.21, links lassen sich zwei Gruppen bilden: Die G_2^{VM2200} , G_4^{VM3300} und G_8^{TM6} mit einem PV-Anteil von $\delta_{PV} = 0$ und einem CV-Anteil von $\delta_{CV} > 0$ und die übrigen Systemgenerationen mit einem PV-Anteil von $\delta_{PV} > 0$ und einem Neuentwicklungsanteil von $\delta_{ND} = 100\%$. Die Systemgenerationen der ersten Gruppe mit $\delta_{PV} = 0$ folgten jeweils auf eine Systemgeneration der zweiten Gruppe.

Die Analyse der **Variationsanteile je Subsystem** in Abbildung A.21, rechts zeigt, dass jedes Subsystem mindestens einmal mit PV entwickelt wurde:

- Mit $\delta_{PV} = 63\%$ waren das *Gehäuse* und die *Bedienschnittstelle* am häufigsten von PV betroffen. In den Generationen G_1^{VM2000} , G_3^{VM3000} , G_5^{TM21} , G_6^{TM31} und G_7^{TM5} wurde das Gehäusekonzept inklusive Verriegelung jeweils grundlegend geändert und parallel dazu die Bedienschnittstelle und das zugehörige Anzeige- und Bedienkonzept.
- Das *Mixmesser* wurde in der G_6^{TM31} von zwei auf vier Ebenen geändert und erstmals die stumpfe Seite für die Rührfunktion im Linkslauf genutzt.
- Der Wechsel der Motorbauart im *Antriebssystem* von Universalmotor auf Reluktanzmotor erfolgte in der G_6^{TM31} .
- Der *Mixtopf* der G_1^{VM2000} hatte erstmals ein Wirkflächenpaar zum Wärmeübertrag. In der G_3^{VM3000} und G_5^{TM21} wurde der Mixtopf um zusätzliche Subsysteme erweitert (PV). Die *Heizplatte* wurde von einem umschließenden Ring (G_1^{VM2000} , G_2^{VM2200}) zu einer Platte (G_3^{VM3000} , G_4^{VM3300}) wieder zu einem umschließenden Ring in ihrer Ausprägung variiert. Ab der G_6^{TM31} war die Heizplatte in den Mixtopf integriert (PV).
- Die PV in den Subsystemen *Dampfgaraufsatz* und *Waage* gingen mit den Architekturänderungen einher

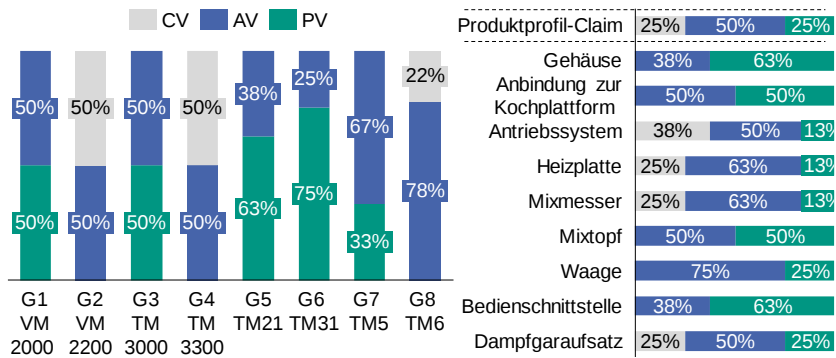


Abbildung A.21: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie Thermomix.

Sony: PlayStation

Die PlayStation (kurz PS) ist eine stationäre Spielkonsole der Sony Interactive Entertainment LLC (kurz Sony), die am 3. Dezember 1994 mit der ersten Systemgeneration G_1^{PS1} in Japan in den Markt eingeführt wurde und ab September 1995 in den USA und Europa erhältlich war (Die Presse, 2019). Folgender Produktprofil-Claim wurde für die G_1^{PS1} rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das 3D-Gaming mit aufwändigeren Spielen und günstiger als der Wettbewerb einer breiten Privatkundengruppe zugänglich macht.

In der Studie wurden die fünf von Sony als „Release-Modell“ eingeführten Systemgenerationen der PlayStation untersucht – G_1^{PS1} , G_2^{PS2} , G_{13}^{PS3} , G_4^{PS4} und die G_5^{PS5} . Neben den Release-Modellen wurden ähnlich den Facelift-Generationen in der Automobilindustrie weitere Systemgenerationen mit überarbeitetem Gehäusedesign und Ausprägungsvariationen einiger Subsysteme vorgestellt („Slim“ und „Pro“), die in der Fallstudie nicht untersucht wurden. Zusätzlich zur stationären PlayStation wurden zwei portable Konsolen, die PSP und die PS Vita sowie Virtual-Reality-Headsets (PS VR für die PS4 und PS VR2 für die PS5) vorgestellt (Sony, 2025), die in der Studie nicht untersucht wurden.

Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen von zwei Co-betreuten Abschlussarbeiten (Nowak, 2021; Patlakis, 2021)⁷ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für die PlayStation

Die untersuchten Systemgenerationen der PlayStation wurden mit zehn Subsystemen auf einer Ebene modelliert. Abbildung A.22 zeigt exemplarisch anhand der G_1^{PS1} die Zuordnung einzelner Bauteile zu den Subsystemen. Der Fokus der technischen Analyse lag auf der Hardware. Der Software-Anteil und peripherere Komponenten wie Controller wurden nicht als Subsystem berücksichtigt.

⁷ Co-betreute Abschlussarbeiten (unveröffentlicht)

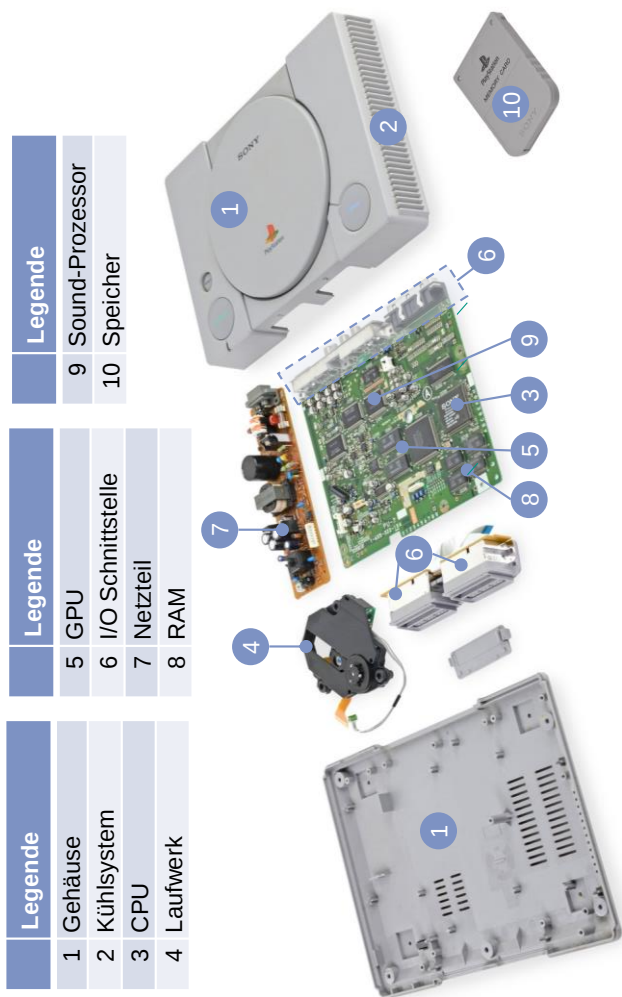


Abbildung A.22: Systemmodell für die Fallstudie PlayStation anhand der G₁^{PlayStation} (Teardown-Abbildung nach Lloyd, 2019, <https://de.ifixit.com/Teardown/Teardown+der+Sony+PlayStation/128089>, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-NC-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>). Die erste Systemgeneration war rein konvektionsgekühlt, weshalb das Kühlsystem (3) keine zusätzliche Hardware benötigte.

GPU, kam es zu weitreichenden Architekturänderungen, die als PV berücksichtigt wurden.

Alle Systemgenerationen wurden anhand der von Sony veröffentlichten Verkaufszahlen (Sony, 2024) und im Vergleich mit den Kernwettbewerbern (VGChartz, 2025) als **erfolgreich** eingestuft. Die bis heute meistverkaufte Systemgeneration ist mit 160 Mio. verkauften Einheiten die G_2^{PS2} . Die G_3^{PS3} verlor Marktanteile an stationäre Konsolen von Wettbewerbern, insbesondere der Microsoft Xbox 360 und der Nintendo Wii, verkaufte sich aber weiterhin gut. Die G_4^{PS4} war vom Release bis 2018 die meistverkaufte stationäre Konsole und wurde 2019 von der hybrid mobil-stationären Nintendo Switch überholt. Die G_5^{PS5} war 2023 und 2024 wieder die meistverkaufte Konsole.

Dieser hohe Wettbewerbsdruck war ein wichtiger **Umfeldfaktor**. Sony stieg mit der G_1^{PS1} in einen bereits umkämpften Markt ein. Weitere mikroökonomische Umfeldfaktoren waren die hohe Nachfrage nach Spielekonsolen (VGChartz, 2024) und die Verfügbarkeit der für den Betrieb der Konsolen wichtigen Peripherie wie HD-Fernseher (game, 2021). Makroökonomisch beeinflussten neben neuen Technologie-Standards Gaming als Massenphänomen (Liu, 2010) und die Lockdowns der Corona-Krise (Spinnler, 2021) die Nachfrage positiv. Das **Geschäftsmodell** wurde mit der G_3^{PS3} durch eine Online-Community-Plattform mit zusätzlichen digitalen Diensten stärker in Richtung Plattform-Geschäftsmodell entwickelt (game, 2021). Mit der PS5 wurde neben dem etablierten Vertriebskanal über Händler ein Online-Shop zum direkten Verkauf an Endkunden ohne Intermediär hinzugefügt (Fröhlich, 2021).

Der **Produktprofil-Claim** der G_1^{PS1} wurde als PV eingeordnet, da erstmals in Echtzeit gerenderte 3D-Spiele für private Haushalte möglich wurden. Mit dem angepassten Geschäftsmodell der G_3^{PS3} ging eine weitere PV des Produktprofil-Claims einher.

RSE für die Entwicklung der ersten Systemgeneration stammten aus einer gescheiterten Kooperation mit Nintendo für die Entwicklung eines CD-Laufwerks für Konsolen (Buhtz, 2023). Auch bei den weiteren *Laufwerk*-Variationen zu DVD in der G_2^{PS2} und Blu-ray in der G_3^{PS3} wurden interne RSE herangezogen. Für die Entwicklung der zentralen, leistungsrelevanten Subsysteme *CPU* und *GPU* waren in jeder Generation RSE von Entwicklungspartnern Ausgangspunkt für Variation, die aufgrund der eher internen als externen Zugänglichkeit des Wissens als interne RSE klassifiziert wurden.

Aus dem Vergleich der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** in Abbildung A.24 (links) ist ersichtlich, dass es alle Systemgenerationen einen CV-

Anteil von $\delta_{CV} = 0$ haben. Würde man die nicht untersuchten Systemgenerationen mit einbeziehen, ergäbe sich wieder ein Wechsel aus Systemgenerationen mit hohem Neuentwicklungsanteil (Release-Generationen) und Generationen mit hohem CV-Anteil.

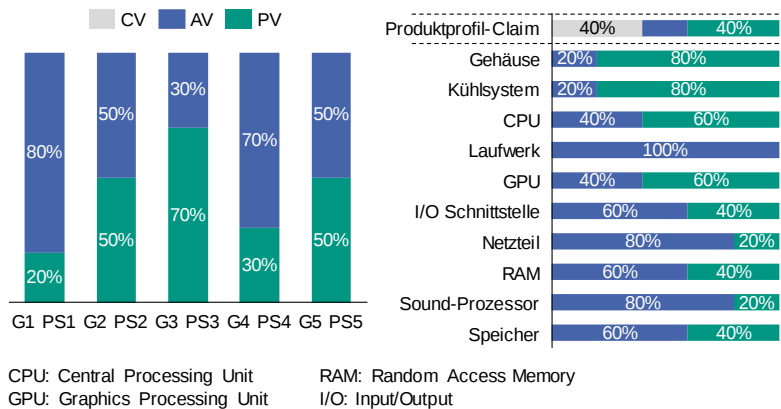


Abbildung A.24: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie PlayStation.

Die Analyse der **Variationsanteile je Subsystem** in Abbildung A.24 (rechts) ermöglicht ein differenzierteres Bild. In der folgenden Aufzählung werden kurz für jedes Subsystem der PlayStation die Weiterentwicklungen des technischen Systems erläutert und die bestimmten Variationsarten dargelegt:

- Das *Gehäuse* der G_2^{PS2} wurde für eine rein stirnseitige Bedienung gestaltet, während die PS1 noch von oben und vorne bedient werden musste. Das Bedienkonzept blieb in den folgenden Systemgenerationen bestehen, jedoch änderte sich die Gehäuseteilung fortlaufend.
- Das *Kühlkonzept* wurde von der rein passiven Konvektionskühlung in der G_1^{PS1} , die so als Prinzip von anderen internen RSE übernommen werden konnte, zur aktiven Kühlung mit Axial-Gebläse und einfachem Aluminium-Druckguss-Kühlkörper in der G_2^{PS2} , Radial-Gebläse und Kühlkörper mit Wärmerohren in der G_3^{PS3} und geändertem Luftstrom und Gebläse-Integration in der G_4^{PS4} und G_5^{PS5} weiterentwickelt.
- Die *CPU* der G_1^{PS1} wurde basierend auf einer von MIPS bekannten 32-Bit Architektur von Sony und LSI in ihrer Ausprägung variiert. Aufbauend auf einer neuen MIPS 64-Bit Architektur entwickelten Sony und Toshiba für die G_2^{PS2} die

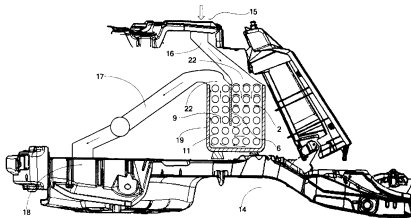
„Emotion Engine“ mit weiteren separaten Co-Prozessoren (PV). Für die G_3^{PS3} wurde gemeinsam mit IBM die Cell Broadband Engine entwickelt, welche ein neues, homogenes Multicore Konzept gegenüber den heterogenen Multicore-Konzepten den Vorgängern und den externen RSE darstellte (PV). Die G_4^{PS4} verwendete die AMD-Jaguar-Architektur (AV). Für die G_5^{PS5} wurde in Kooperation mit AMD ein prinzipiell neues Design entwickelt (PV).

- Die GPU der G_1^{PS1} wurde von Sony eigens entwickelt. Die GPU der G_2^{PS2} war in ihrer Funktion stark reduziert, da ein Großteil bereits von den Co-Prozessoren der CPU berechnet wurde. Die GPU der G_3^{PS3} übernahm wieder mehr Rechenoperationen und basierte auf NVIDIA-GPUs für PCs (AV). Analog zur CPU nutzte die G_4^{PS4} eine GPU mit bestehender AMD Technologie (AV) und die G_5^{PS5} ein prinzipiell neues Design (PV)
- Für das *externe Laufwerk* war, wie unter RSE beschrieben, keine PV notwendig
- Die *I/O-Schnittstelle* bot in der G_2^{PS2} erstmals einen optionalen Netzwerkanschluss (PV). In der G_3^{PS3} folgte eine kabellose Verbindung via WLAN, was die letzte PV des Subsystems darstellte.
- Ab der G_3^{PS3} wurde das *Netzteil* als extra gekapselte Einheit ausgeführt.
- Die G_1^{PS1} , G_2^{PS2} und G_3^{PS3} nutzten für GPU und CPU dedizierten RAM. Ab der G_4^{PS4} wurde einheitlicher Speicher für CPU und GPU verwendet.
- Die G_1^{PS1} und G_2^{PS2} hatten noch einen dedizierten Sony-Sound-Prozessor. Ab der G_3^{PS3} wurde dieser softwareseitig über die CPU implementiert (PV). Daher fiel das Subsystem nicht weg, sondern wurde in ein anderes integriert.
- Für den *Speicher* für Spielstände wurden in der G_1^{PS1} und G_2^{PS2} proprietäre Speicherkarten („Memory Card“) verwendet. Ab der G_3^{PS3} kamen HDD-Festplatten zum Einsatz, die in der G_5^{PS5} durch SSD-Technologie ersetzt wurden.

BYD: Traktionsbatterie

Der chinesische Konzern BYD ist einer der weltweit größten Produzenten von batterieelektrischen Speichern für Elektromobilität, Smartphones und den Energiesektor (Wang et al., 2023). Seit 2003 ist BYD mit der Tochtergesellschaft BYD Auto als Automobil-OEM aktiv und entwickelte sich zu einem der größten Automobilhersteller weltweit, der sich durch seine hohe vertikale Integration auszeichnet (Wang et al., 2023). In dieser Fallstudie wurden die sechs zwischen 2008 und 2024 in den Markt eingeführten Systemgenerationen von Traktionsbatterien untersucht, die teilweise in mehreren Fahrzeugmodellen des Herstellers zum Einsatz kamen. Abbildung A.25 zeigt die erste und die letzte untersuchte Systemgeneration.

G_1^{F3DM} (2008)



G_6^{han} (2020)



Abbildung A.25: Zwei der sechs untersuchten Systemgenerationen der BYD Traktionsbatterien. (Bildquellen:

G_1^{F3DM} : Batteriepack-Gehäuse, Zhao, Jiang & Chen, 2006, <https://patents.google.com/patent/CN100595946C/en>, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

G_6^{han} : Blade-Batterie-Pack auf der IAA 2023, Blume, 2023, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IAA_Summit_2023,Munich\(P1110715\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IAA_Summit_2023,Munich(P1110715).jpg), Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

2008 wurde mit dem F3DM das erste chinesische Plug-in-Fahrzeug auf Basis des konventionell angetriebenen Modells F3 vorgestellt (Green Car Congress, 2008), in dem die erste untersuchte Systemgeneration zum Einsatz kam. Folgender Produktprofil-Claim wurde für die G_1^{F3DM} rekonstruiert:

Wir brauchen ein Batteriesystem für ein Plug-in-Hybridfahrzeug, das sich im Bauraum des Benzintanks in das Referenzfahrzeug integrieren lässt.

Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen einer Co-betreuten Abschlussarbeit (Ding, 2022)⁸ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für die BYD Batterie

Die Systemgenerationen der BYD Traktionsbatterien wurden mit vier **Subsystemen** – Batteriemanagementsystem (BMS), Zellen, Kühlsystem und Struktur – auf einer Ebene modelliert.

Evolution der BYD Batterie

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.26 dargestellt. In der modellhaften Betrachtung blieb die **Architektur** bestehen. Ausprägungen und Lösungsprinzipien innerhalb der Subsysteme änderten sich über die Evolution jedoch stark. So verwendeten die ersten vier Systemgenerationen eine Modulbauweise, die an den Bauraum der substituierten Subsysteme der verbrennungsmotorisch angetriebenen Referenzfahrzeuge angepasst war. Die G_5^{yuanEV} verwendet eine sog. „Skateboard-Architektur“ und die G_6^{han} ein „Cell-to-Pack-Design“ (vgl. Köllner, 2024).

Der **Produktprofil-Claim** der G_1^{F3DM} wurde als PV eingestuft, da die Systemgeneration die erste Traktionsbatterie für BYD darstellte. Der Produktprofil-Claim der G_2^{e6} wurde ebenfalls als PV eingestuft, da die zweite Systemgeneration erstmals in rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen eingesetzt wurde und B2B-Flottenkunden in den Fokus rückte. In den folgenden Systemgenerationen wurde der Produktprofil-Claim mit AV weiterentwickelt, wobei der Produktprofil-Claim der G_3^{qinDM} auf der G_1^{F3DM} (Batterie für ein Hybridfahrzeug) und der Produktprofil-Claim der G_4^{qinpro} (Hybride und vollelektrische Fahrzeuge) auf der G_2^{e6} basierte. Die G_1^{F3DM} wurde aufgrund niedriger Verkaufszahlen (King, 2012) als **nicht erfolgreich** eingeordnet. Mit der G_2^{e6} gelang BYD über Flottenaufträge der **erfolgreiche** Markteintritt (Green Car Congress, 2010). Mit den folgenden Systemgenerationen war BYD auch bei Privatkunden erfolgreich, was sich in kontinuierlich steigenden Verkaufszahlen äußerte (Cobb, 2016; PCGROUP, 2024).

⁸ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

BYD Battery											
SGE					Umfeld					Markt- erfolg	
Produktprofil-Claim Batteriemanagementsystem Zellen Kühlsystem Struktur					Makroökonomisch Mikroökonomisch Unternehmen Umfeldfaktoren					Markteintritt	
G1 (F3DM)											
	P	int	int	esb	int	Recht /Strenge der Regulierung /hoch Politik /Ambitionsniveau der Ziele /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /niedrig Nachfrage /Niveau /hoch Akquisition / neue rechtliche Anforderungen				2008	nicht erfolgreich
G2 (e6)											
	P	↓	↓	↓	↓	Politik /Höhe der Subventionen /hoch Gesellschaft /Akzeptanz /niedrig Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /niedrig Infrastruktur /Verfügbarkeit /niedrig Nachfrage /Niveau /hoch				2010	Flotten- verträge
G3 (qinDM)											
	A	↓	↓	↓	↓	Recht /Strenge der Regulierung /hoch Gesellschaft /Wahrgenommene Sicherheit /niedrig Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /niedrig Nachfrage /Niveau /hoch				2013 (01/15-12/15)	31898
G4 (qinpro)											
	A	↓	esb	↓	↓	Politik /Anforderungen für Subventionen /niedrig → hoch Technologie /Verfügbarkeit neuer Fertigungstechnologie Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch				2018 (11/18-04/21)	53866
G5 (yuanEV)											
	A	↓	↓	i-2	esb	Anforderungen für Subventionen /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch				2018 (06/18-12/21)	123449
G6 (han)											
	A	↓	↓	↓	esb	Anforderungen für Subventionen /hoch → niedrig Gesellschaft /Akzeptanz /hoch Infrastruktur /Verfügbarkeit /hoch Wettbewerb /Wettbewerbsdruck /hoch Nachfrage /Niveau /hoch				2020 (07/20-10/24)	832239

Abbildung A.26: Zentrale Visualisierung der Fallstudie BYD Batterie.

Relevante **Umfeldfaktoren** waren makroökonomisch die Kombination aus Förderpolitik und progressiver Regulierung sowie gesellschaftliche Akzeptanz, Sicherheitsempfinden und neue Fertigungstechnologien. Mikroökonomisch stiegen mit der G_4^{qinpro} der zuvor innerhalb Chinas niedrige Wettbewerbsdruck und die zuvor niedrige Nachfrage.

RSE bei der Entwicklung der G_1^{F3DM} kamen aus der BYD-eigenen Batterieentwicklung und dem Verbrenner-Vorgängermodell F3 sowie dem Toyota Prius. In den Systemgenerationen G_4^{qinpro} und G_5^{yuanEV} dienten die zu dieser Zeit als Industrie-Benchmark geltenden Subsysteme des Traktionsbatteriesystems von Tesla als RSE. In der G_6^{han} wurden bekannte strukturintegrierte Cell-to-Pack-Designs (Köllner, 2024) aus der Branche als RSE herangezogen.

Nach der Analyse der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** (Abbildung A.27) lassen sich die Systemgenerationen der BYD Traktionsbatterien in drei Kategorien unterteilen. In den ersten beiden Systemgenerationen G_1^{F3DM} und G_2^{e6} kamen keine CV und jeweils 50 % AV-Anteil und PV-Anteil vor. In der G_3^{qinDM} , G_4^{qinpro} und G_6^{han} ließ sich PV in allen vier Subsystemen und damit ein PV-Anteil von $\delta_{PV} = 100\%$ feststellen. Die G_5^{yuanEV} hat als einzige Systemgeneration einen relativ hohen CV-Anteil von $\delta_{CV} = 50\%$ und baut stark auf der Vorgängergeneration G_4^{qinpro} auf, die fast parallel in den Markt eingeführt wurde.

Bei der Analyse der **Variationsanteile je Subsystem** in Abbildung A.27 fällt auf, dass alle Subsysteme einen hohen subsystembezogenen PV-Anteil von $\delta_{PV, Subsystem} \geq 50\%$ aufweisen.

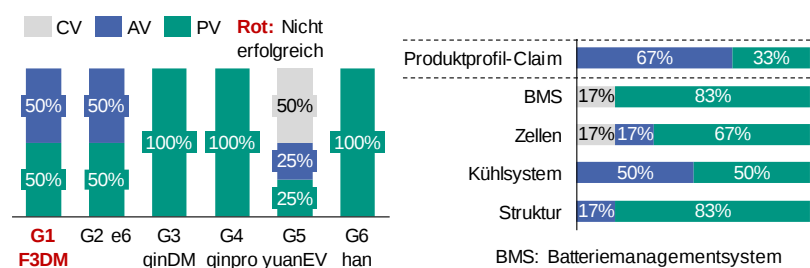


Abbildung A.27: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie BYD Batterie.

Das *Batteriemanagementsystem (BMS)* wurde in allen Systemgenerationen bis auf die CV in der G_5^{yuanEV} mit PV entwickelt. In der G_1^{F3DM} mussten interne Referenz-BMS für den Anwendungsfall Fahrzeug grundlegend neuentwickelt werden. In der G_2^{e6} , G_3^{qinDM} , G_4^{qinpro} kamen insbesondere zusätzliche Sensoren hinzu. In der G_6^{han} wurden adaptive Rekuperation und Batterieheizer ergänzt.

Anpassungen der Zellchemie und Geometrie resultierten in PVs der *Zellen*. Die G_1^{F3DM} und die G_2^{e6} nutzten LiFePO4-Rundzellen, die G_3^{qinDM} prismatische LiFePO4-Zellen, die G_4^{qinpro} und G_5^{yuanEV} nutzten prismatische NCM und die G_6^{han} die als „Blade-Battery“ bekannte besonders lange, strukturintegrierte LiFePO4-Zellen.

Das Prinzip der Luftkühlung für das *Kühlsystem* der G_1^{F3DM} wurde vom Toyota Prius adaptiert (AV) und in der G_2^{e6} aufgrund des geänderten Packagings angepasst (AV). Das Prinzip wurde in der G_3^{qinDM} zu Wasserkühlung über flächige Wärmeleiter und einen wassergekühlten Rahmen geändert (PV). In der G_4^{qinpro} wurden geschwungene, zwischen den Modulen liegenden Kühlkanäle verwendet (PV). Die G_5^{yuanEV} adaptierte das Kühlsystem der G_3^{qinDM} (AV). In der G_6^{han} wurde ein Kühlmantel mit zusätzlichen Wärmeleitpads zwischen den Zellen eingesetzt (PV).

Die *Struktur* der G_1^{F3DM} wurde vom Tank-ähnlichen Gehäuse im Inneren des Fahrzeugs zu einem teilweise außenliegenden Gehäuse in der G_2^{e6} geändert (PV). Die G_3^{qinDM} verwendete erstmals ein Batteriegehäusedesign mit Stahlrahmen und tiefgezogenem Boden (PV). In der G_4^{qinpro} wurde ein Aluminiumrahmen mit elastischen Zwischenelementen verwendet (PV). Ab der G_5^{yuanEV} wurde statt Bauraum im Bereich der Hinterachse eine in den Unterboden integrierte, flach bauende Batterie („Skateboard-Plattform“) verwendet (PV). Die G_6^{han} nutzte die langen, prismatischen Batteriezellen selbst als Strukturbauteile in Cell-to-Pack-Bauweise (PV).

Ultimate Ears: Boom

Die Boom-Produktlinie des zu Logitech gehörenden Unternehmens Ultimate Ears (UE) umfasst tragbare Bluetooth-Lautsprecher in mehreren Produktvarianten verschiedener Größen und Leistungsklassen. Als erste Systemgeneration wurde die $G_1^{\text{Boom 1}}$ im Mai 2013 mit mittlerer Größe und Leistung in den Markt eingeführt (Ultimate Ears, 2023). Folgender Produktprofil-Claim wurde für die $G_1^{\text{Boom 1}}$ rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das den sozialen Aspekt von Musik in den Vordergrund stellt und sich durch sein Design überall hin mitnehmen und sich perfekt in den Alltag integrieren lässt.

2024 besteht die Boom-Linie aus sieben Familien (Logitech, 2024). Im Rahmen der Fallstudie wurden die acht zwischen 2013 und 2022 erschienenen Systemgenerationen der Familien Megaboom (hohe Leistung), Boom (kompakt), und Wonderboom (ultrakompakt) untersucht. Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen einer Co-betreuten Abschlussarbeit (Dayan, 2024)⁹ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für die UE Boom

Die Architektur der UE Boom wurde mit neun Subsystemen auf einer Ebene modelliert (Abbildung A.32). Der eigentliche Lautsprecher wurde in *Treiber*, *Verstärker*, *Rahmen* und *Gehäuse* unterteilt. Die *Bedienschnittstelle* umfasst die für die Eingabefunktionen notwendigen Subsysteme (Tasten, Mikrofon, Beschleunigungssensoren). Die *Eingangsschnittstelle* fasst Kabeleingänge (3.5-mm-Klinke, USB) zusammen. Die *Ausgabeschnittstelle* beinhaltet die Elemente, die dem Nutzer Informationen über den Systemzustand liefern.

⁹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

	Legende
1	Verstärker
2	Batterie
3	Bluetooth
4	Gehäuse
5	Rahmen

	Legende
6	Eingangsschnittstelle
7	Ausgangsschnittstelle
8	Treiber
9	Bedienschnittstelle

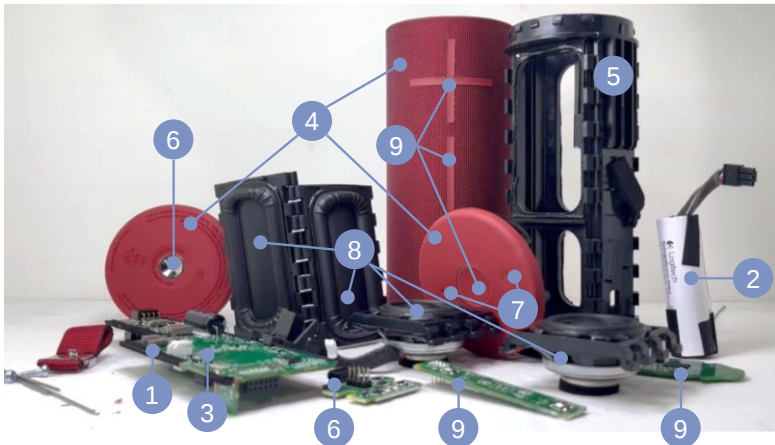


Abbildung A.28: Systemmodell für die Fallstudie UE Boom anhand der $G_3^{UE\ Boom, Boom}$ (Bildzitat gem. § 51 UrhG zur inhaltlichen Analyse des Videos von Thao, 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=0-R46ZLkiMk>).

Evolution der UE Boom

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.29 dargestellt.

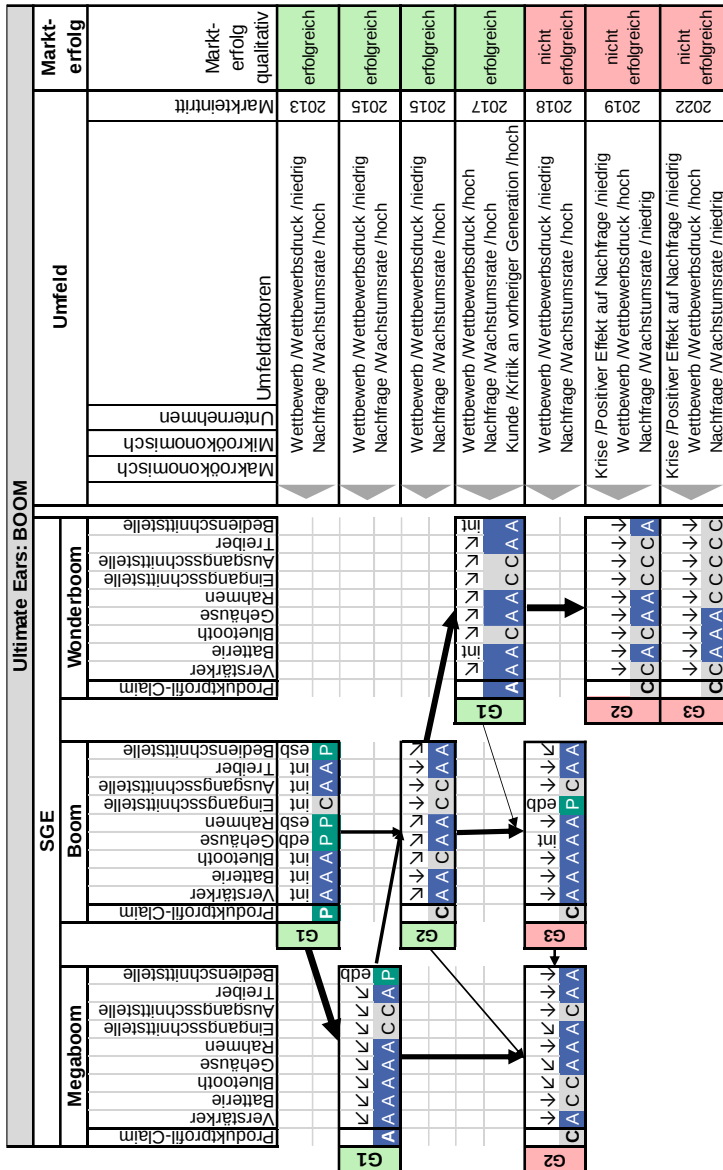


Abbildung A.29: Zentrale Visualisierung der Fallstudie UE Boom.

Ausgehend von der $G_1^{\text{Boom } 1}$ im Jahr 2013 wurde 2015 mit der $G_1^{\text{Megaboom } 1}$ die Produktlinie nach oben um eine leistungsstärkere und größere Produktvariante erweitert. 2017 folgte mit der $G_1^{\text{Wonderboom } 1}$ eine kompaktere Produktvariante. Bei der Benennung der Systemgenerationen der Produktlinie „Megaboom“ wurde von Logitech die Nr. 2 übersprungen. Neben diesen drei Produktvarianten wurden im Laufe der Jahre weitere höher („Hyperboom“, „Blast“, „Megablast“) und niedriger positionierte Produktvarianten („Roll“, „Roll 2“, „Mini Boom“, „Pro“) eingeführt und teilweise auch wieder eingestellt. Farbvarianten wurden nicht explizit modelliert. Die grundlegende **Architektur** veränderte sich über die Systemgenerationen und die betrachteten Produktvarianten nicht.

Der Erfolg der Systemgenerationen wurde anhand der in den Jahresberichten (Logitech, 2024) vorgestellten Sales-Statements bewertet, die auf die gesamte Produktkategorie „Mobile Speaker“ aggregiert wurden.¹⁰ Alle Systemgenerationen vor 2018 wurden als **erfolgreich** eingeordnet, da die Verkaufszahlen in der Produktkategorie kontinuierlich anstiegen. Das Finanzjahr 2019 markierte einen Kipppunkt mit ab dann abfallenden Verkaufszahlen, weshalb die Systemgenerationen ab 2018 als **nicht erfolgreich** eingeordnet wurden.

Als relevante **Umfeldfaktoren** wurden mikroökonomisch die ab 2019 sinkende Nachfrage nach tragbaren Bluetooth-Lautsprechern und makroökonomisch der negative Einfluss der Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie auf die Nachfrage identifiziert.

Nach der $G_1^{\text{Boom } 1}$ wurde der **Produktprofil-Claim** nicht mehr mit PV entwickelt. Im Zuge der Variantenbildung durch die $G_1^{\text{Megaboom } 1}$ und die $G_1^{\text{Wonderboom } 1}$ traten AVs der Produktprofil-Claims auf.

Logitech stellte bereits vor dem Markteintritt der $G_1^{\text{Boom } 1}$ stationäre Lautsprecher her, vor allem für den Gaming-Bereich (Logitech, 2024). Daneben hatte Logitech auch bereits batteriebetriebene mobile Produkte wie Headsets im Produktportfolio. Ultimate Ears war zuvor für High-End in-Ear Monitore bekannt (Ultimate Ears, 2023). Daher wurde in der Fallstudie angenommen, dass für die Entwicklung von sechs Subsystemen interne **RSE** aus anderen Produktlinien die dominierende Basis waren. Für *Rahmen* und *Bedienschnittstelle* waren andere mobile Lautsprecher

¹⁰ Diese Art der Bewertung birgt das Risiko, eigentlich erfolgreiche Systemgenerationen einer Produktlinie unter dem Misserfolg einer gesamten Produktlinie fälschlicherweise als nicht erfolgreich zu bewerten.

näherliegende RSE. Für die Gehäuseform dienten Trinkflaschen als RSE (Logitech, 2014). Auch in der $G_1^{\text{Megaboom } 1}$ (*Bedienschnittstelle*, RSE Geschwindigkeitssensor aus Smartphones), $G_3^{\text{Boom } 3}$ (*Eingangsschnittstelle*, Docking-Stationen für z. B. Apple iPod) kamen branchenexterne RSE ins Referenzsystem.

In der Analyse der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** in Abbildung A.30 fällt auf, dass der CV-Anteil in den vier zuletzt erschienenen Systemgenerationen über die Produktvarianten hinweg kontinuierlich anstieg. Nach der $G_1^{\text{Boom } 1}$ wurde in keiner Systemgeneration mehr als ein Subsystem mit PV entwickelt.

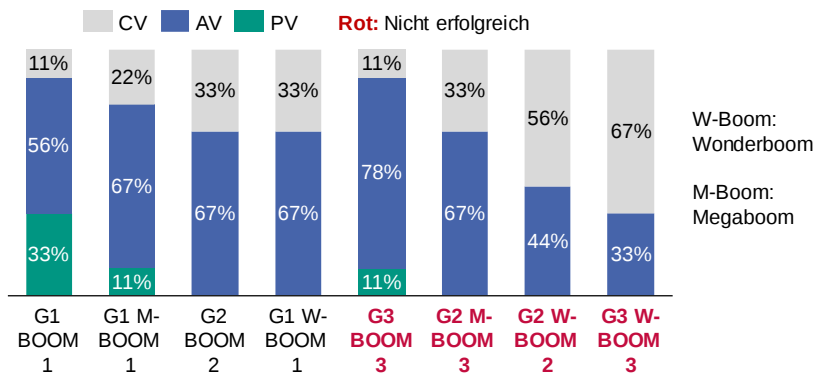


Abbildung A.30: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie UE Boom.

Die Analyse der **Variationsanteile je Subsystem** in Abbildung A.31 zeigt, dass die Prinzipvariationen über vier Subsysteme verteilt auftraten. Die *Bedienschnittstelle* wurde in der $G_1^{\text{Megaboom } 1}$ um einen Geschwindigkeitssensor für eine Klopffunktion erweitert (PV), die in der $G_1^{\text{Wonderboom } 1}$ wieder entfernt wurde. Mit der $G_3^{\text{Boom } 3}$ wurde die Docking-Station der *Eingangsschnittstelle* hinzugefügt und der 3,5-mm-AUX-Eingang fiel weg (PV).

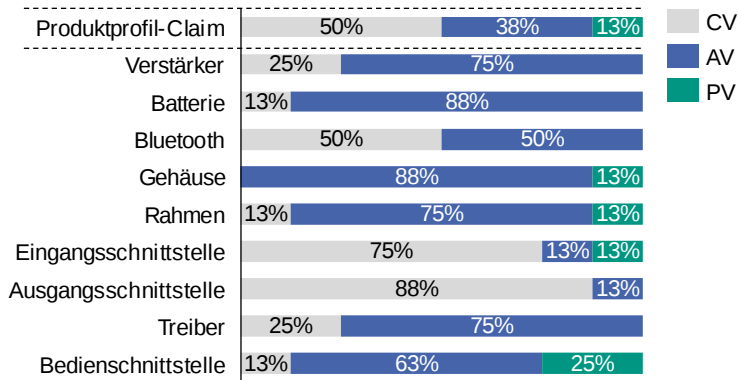


Abbildung A.31: Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und des Produktprofil-Claims für die Fallstudie UE Boom.

SEW: Fahrerloses Transportsystem

Fahrerlose Transportsysteme (FTS, engl. Driverless Transport System – DTS) sind innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten fahrerlosen Transportfahrzeugen und werden zum Materialtransport in der Intralogistik eingesetzt (VDI-Richtlinie 2510). Im Rahmen der Fallstudie wurden 14 von SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG (SEW) in den Markt eingeführte fahrerlose Transportfahrzeuge als Teil eines DTS untersucht. Die erste in der Fallstudie untersuchte Systemgeneration wurde als G_1 bezeichnet und markierte das erste SEW DTS mit einer Batterie als Energiespeicher. Der Entwicklung der G_1 gingen aber bereits interne Vorgänger ohne Batterie voraus. Folgender Produktprofil-Claim wurde für die G_1 rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das auf den internen Referenzen aufbaut und durch die Integration einer Batterie als DTS flexibler für mehr und anspruchsvollere Use-Cases in der Intralogistik einsetzbar ist.

Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen einer Co-betreuten Abschlussarbeit (Müller, 2023)¹¹ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für das SEW DTS

Für die Analyse wurden die Systemgenerationen der SEW DTS auf der ersten Systemebene in sechs Subsysteme und auf der zweiten Ebene in je nach Systemgeneration 17-24 Subsysteme unterteilt (Abbildung A.32). Subsysteme auf der ersten Ebene sind das *Antriebssystem*, die *I/O-Schnittstelle*, *Navigation*, *Bedienelemente*, *Information* und *Ladungshandling*. Steuerungs- und Automatisierungstechnik sowie das Gehäuse lagen außerhalb der Systemgrenze und wurden in der Fallstudie nicht untersucht. Zentrale Quelle für die technische Analyse war die technische Dokumentation der Systemgenerationen.

¹¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

	Ebene 1	Ebene 2		Ebene 1	Ebene 2
1	Antriebssystem	Energiespeicher	15	Bedienelemente	Not-Halt-Taster
2	Antriebssystem	Lenkrollen	16	Bedienelemente	Freigabetaster
3	Antriebssystem	Fahrantrieb	17	Bedienelemente	Hauptschalter
4	Antriebssystem	Übertragerkopf	18	Bedienelemente	Starttaster
5	I/O Schnittstelle	Ext. Spannungsversorgung	19	Bedienelemente	Schwarzstarttaster
6	I/O Schnittstelle	Ethernet-Schnittstelle	20	Information	Licht
7	I/O Schnittstelle	USB-Anschluss	21	Information	Statusanzeige
8	I/O Schnittstelle	WLAN-Antenne	22	Information	Blitzlichtleuchte
9	I/O Schnittstelle	Anschluss Bediengerät	23	Ladungshandling	Kontrolle Lastübergabe
10	Navigation	Objekterkennung	24	Ladungshandling	Ladungserkennung
11	Bedienelemente	Multifunktionstaster	25	Ladungshandling	Lasterkennung
12	Bedienelemente	Steuerungstaster	26	Ladungshandling	Hub
13	Bedienelemente	Betriebsarten-Wahlschalter	27	Ladungshandling	Lastaufnahmemittel
14	Bedienelemente	Quittiertaster	28	Ladungshandling	Förderer



Abbildung A.32: Systemmodell für die Fallstudie SEW DTS anhand eines der G₂ ähnlichen Systems. Die Subsysteme 5, 6, 8, 9, 17, 24 sind nicht sichtbar. Die Subsysteme 11, 13, 19, 22, 23, 25 sind im dargestellten System nicht vorhanden (Bildzitat gem. § 51 UrhG zur inhaltlichen Analyse: SEW-EURODRIVE, 2024, <https://www.sew-eurodrive.de/automatisierung/maxolution-systemloesungen/mobile-systeme/mobile-transportsysteme/mobile-transportsysteme.html>).

Evolution des SEW DTS

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.33 und Abbildung A.34 dargestellt.

SEW DTS																												
SGE															Umfeld					Markt- erfolg								
Antriebs- system	I/O Schnitt- stelle	Nav	Bedienelemente										Inform- ation	Ladungshand- ling					Umfeldfaktoren					Markt- erfolg qualitativ				
			Übertragungskopf	WL-AN-Antenne	Exl. Spannungsversorgun	Anschluss Bediengerät	USB-Anschluss	Objekterkennung	Multifunktionstaster	Steuernungstaster	Bedienelementen-Wahlschalt	Quitteraster		Not-Halt-Taster	Freigabestaster	Hauptschalter	Starttaster	Schwarzstarttaster	Licht	Statusanzeige	Blitzlichte	Kontrolle Lastübergabe	Ladungserkennung		Hub	Lastaufnahmehemittel	Förderer	Unternehmen
Produktprofil-Claim	energiespeicher	Fahrertrieb	Übertragungskopf	WL-AN-Antenne	Exl. Spannungsversorgun	Anschluss Bediengerät	USB-Anschluss	Objekterkennung	Multifunktionstaster	Steuernungstaster	Bedienelementen-Wahlschalt	Quitteraster	Not-Halt-Taster	Freigabestaster	Hauptschalter	Starttaster	Schwarzstarttaster	Licht	Statusanzeige	Blitzlichte	Kontrolle Lastübergabe	Ladungserkennung	Hub	Lastaufnahmehemittel	Förderer			
G1	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
G2	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
G3	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
G4	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
G5	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
G6	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
G7	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Abbildung A.33: Zentrale Visualisierung der Fallstudie SEW DTS Teil 1.

Die **Architektur** auf Ebene 1 blieb über die Evolution erhalten. Bei jeder Systemgeneration handelte es sich um das Ergebnis eines Kundenentwicklungsprojekts. Ab der G₂ wurde Standardisierung durch Baukastenentwicklung vorangetrieben (siehe Produktprofil-Claim und Umfeldfaktor). Alle Systemgenerationen wurden als **erfolgreich** eingestuft, da die Kundenentwicklungsprojekte erfolgreich abgeschlossen wurden.

Ab der G₁ stand die Wiederverwendung interner RSE im Fokus. Mit der G₂ wurde dem **Produktprofil-Claim** die Hauptziele Standardisierung durch Modularisierung und Aufbau eines Baukastens hinzugefügt. In den folgenden Systemgenerationen entwickelte sich der Kundennutzen durch neue Use-Cases und höhere zu transportierende Lasten weiter. In den jeweiligen Systemgenerationen wurden Variationen an Subsystemen vorgenommen, welche dann wiederum in nachfolgenden Systemgenerationen als **RSE** dienten. Ein Großteil der RSE stammte aus den direkten Vorgängergenerationen (n-1), ein weiterer großer Teil stammte aus weiter zurückliegenden Vorgängergenerationen und weitere, vereinzelte RSE stammten aus externen Quellen.

Die Analyse der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** in Abbildung 7.35 zeigt einen Anstieg des Neuentwicklungsanteils bis zum Maximum $\delta_{ND} = 48\%$ in der G₄. Der Abfall ab der G₅ fand damit vier Systemgenerationen nach der Änderung des internen **Umfeldfaktors** Standardisierung von niedrig zu hoch bzw. der Produktprofil-PV hin zur Standardisierung statt. Weitere Umfeldfaktoren wurden in der Studie nicht untersucht.

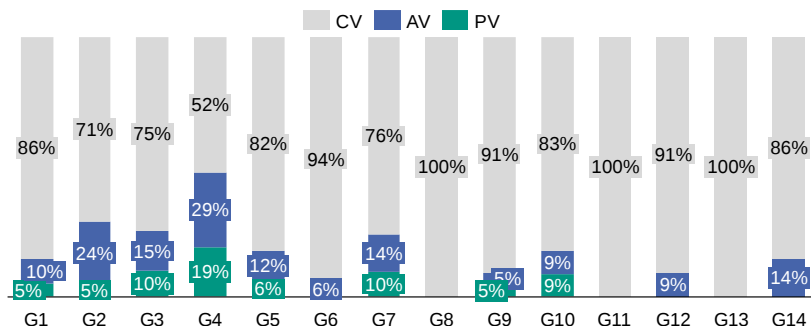


Abbildung A.35: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration für die Fallstudie SEW DTS.

Bei der Analyse der **Variationsanteile je Subsystem** in Abbildung A.36 fällt auf, dass sich die Neuentwicklungen stark auf die Subsysteme *Antriebssystem* und

Ladungshandling konzentrieren. Auf Ebene 2 stechen die Subsysteme *Lenkrollen* und *Lasterkennung* mit jeweils vier PVs, sowie die Subsysteme *Hub* und *Lastaufnahmemittel* durch einen subsystembezogenen AV-Anteil $\delta_{AV, \text{Subsystem}} \geq 50 \%$. Neben der Häufigkeit der Variationsarten wurde die Häufigkeit des Auftretens der Subsysteme über die Evolution betrachtet („Take-Rate“).

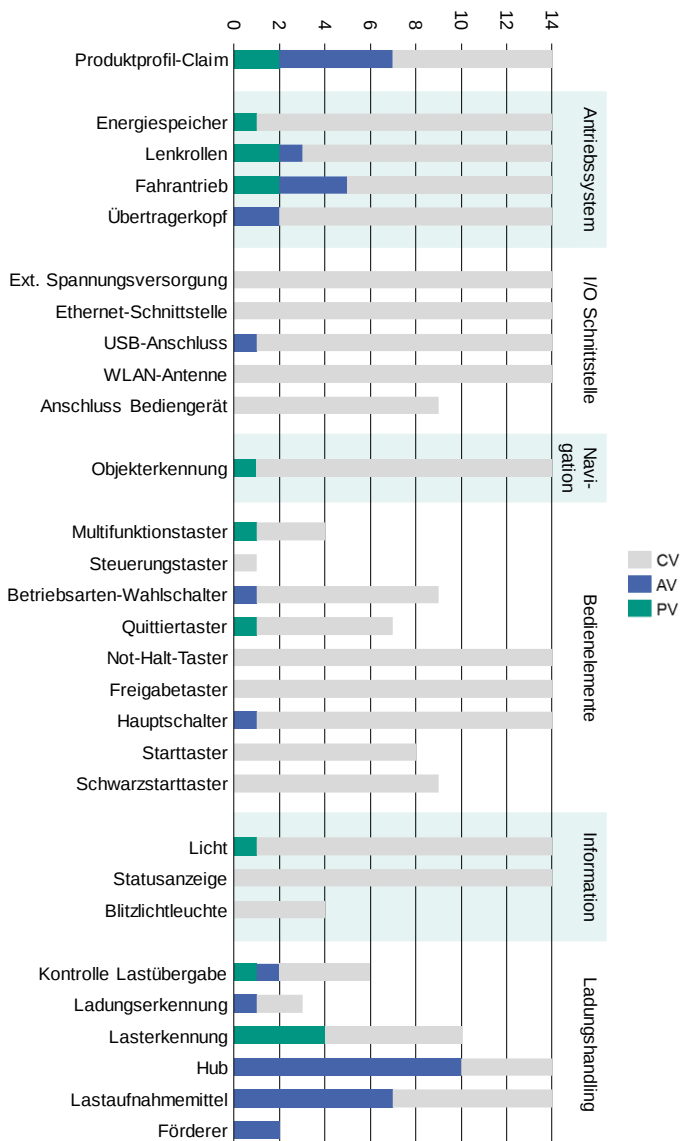


Abbildung A.36: Vergleich der Variationsanteile je Subsystem für die Fallstudie SEW DTS.

SpaceX: Falcon

Die Raumfahrtindustrie erlebt einen Boom durch die Einführung neuer Satellitentechnologie und die steigende Wichtigkeit kritischer Weltrauminfrastruktur wie satellitengestütztem Internetzugang (Heinecke & Kirsch, 2023). SpaceX ist ein 2002 gegründeter amerikanischer Startanbieter. 2008 wurde die erste Trägerrakete $G_1^{\text{Falcon 1}}$ mit dem ersten erfolgreichen Start in den Markt für kleine Nutzlasten eingeführt (SpaceX, 2024). Für die $G_1^{\text{Falcon 1}}$ wurde folgender Produktprofil-Claim rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, das im Vergleich zu aktuellen kleinen Trägerraketen einen kosteneffizienteren und zuverlässigeren Weg ins All bietet und RSE für die Entwicklung zukünftiger Trägerraketengenerationen für größere Nutzlasten bereitstellt.

In der Fallstudie wurden die in Abbildung A.37 dargestellten fünf Systemgenerationen untersucht, die zwischen 2008 und 2019 in den Markt eingeführt wurden.

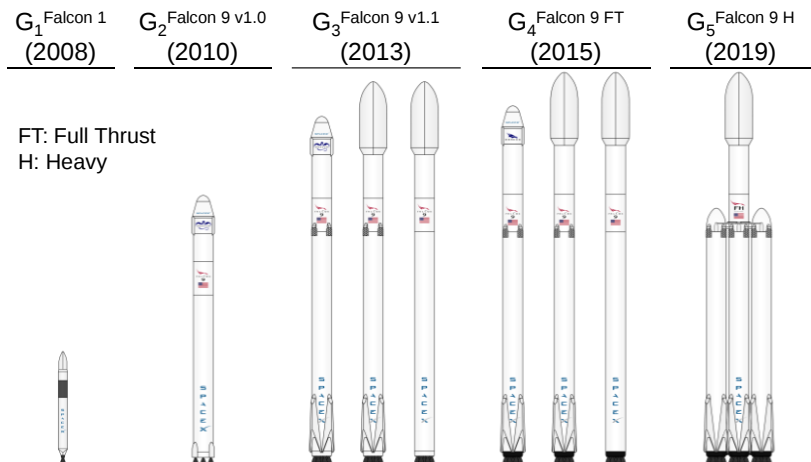


Abbildung A.37: Die fünf untersuchten Systemgenerationen der SpaceX Falcon (Lucabon, 2017, *Falcon rocket family*, https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Falcon_rocket_family4.svg, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen einer gemeinsam mit Porsche Consulting Co-betreuten Abschlussarbeit (Demuth, 2024)¹² erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert, erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

Systemmodell für die Falcon

Die Architektur der untersuchten Systemgenerationen der SpaceX-Falcon-Trägerrakete wurde mit **neun Subsystemen** auf einer Ebene modelliert (Abbildung A.38).

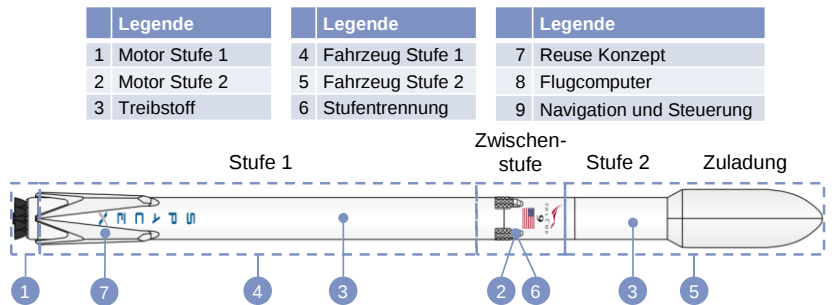


Abbildung A.38: Systemmodell für die Fallstudie SpaceX Falcon anhand der $G_{4\text{ Falcon } 9\text{ FT}}$. Die Subsysteme *Flugcomputer* und *Navigation* sind nicht abgebildet (Lucabon, 2017, *Falcon rocket family*, https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Falcon_rocket_family4.svg, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Größere Trägerraketen bestehen aus Effizienzgründen aus mehreren Stufen und einer Zuladung. Die Stufen beinhalten jeweils ein oder mehrere *Motoren* (1, 2), zwei getrennte Tanks für den Treibstoff und für das für die Verbrennung des *Treibstoffs* benötigte Oxidationsmittel (zusammengefasst in Subsystem 3) sowie das *Fahrzeug* inklusive Treibstoffversorgung selbst (4, 5). Ist der Treibstoff von Stufe 1 vollständig verbrannt, wird diese durch ein Subsystem zur *Stufentrennung* in der Zwischenstufe (6) vom Rest der Trägerrakete getrennt und so das anzutreibende Gewicht reduziert. Die abgetrennte erste Stufe kehrt durch *ein Reuse Konzept* (7) zur Erde

¹² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

zurück, verglüht beim Wiedereintritt in die Atmosphäre oder bleibt im Orbit. Die Guidance, Navigation, and Control (GNC)-Einheit steuert die Funktionen der Trägerrakete. Zentrale Subsysteme sind der *Flugcomputer* (8) sowie *Navigation und Steuerung* (9).

Evolution der Falcon

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.39 dargestellt. Die **Architektur** veränderte sich über die fünf Systemgenerationen nicht. Alle Systemgenerationen wurden aufgrund der Anzahl ihrer erfolgreichen Starts als **erfolgreich** eingestuft. Die $G_1^{\text{Falcon 1}}$ und die $G_2^{\text{Falcon 9v1.0}}$ hatten vergleichsweise niedrige Startzahlen, da sie schnell von der nächsten Systemgeneration abgelöst wurden. Trotzdem wurden die Ziele hinsichtlich Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit und dem Bereitstellen von RSE für die folgenden Systemgenerationen erreicht (CSIS Aerospace Security, 2022).

Relevante **Umfeldfaktoren** waren der anfangs niedrige und ab der $G_3^{\text{Falcon 9v1.0}}$ parallel zur steigenden Nachfrage ansteigende Wettbewerbsdruck. Im unternehmensinternen Umfeld fiel der hohe Grad an vertikaler Integration und Agilität auf. Der abgeleitete **Produktprofil-Claim** wurde in allen Systemgenerationen neuentwickelt. Die $G_2^{\text{Falcon 9v1.0}}$ und $G_5^{\text{Falcon 9 Heavy}}$ zielten jeweils mit grundlegend gleichbleibendem Hauptnutzen auf ein neues Segment mit mittleren bzw. hohen Nutzlasten¹³. Die $G_3^{\text{Falcon 9v1.1}}$ stellte die Wiederverwendbarkeit durch das Reuse Konzept in den Vordergrund (PV). Mit der $G_4^{\text{Falcon 9 FT}}$ sollten erstmals für SpaceX auch Personen ins Weltall befördert werden (PV). Mit dieser Produktprofil-PV kam in der $G_4^{\text{Falcon 9 FT}}$ der rechtliche Rahmen für bemannte Raumfahrtmissionen als relevanter Umfeldfaktor hinzu.

¹³ Die National Aeronautics and Space Administration (NASA) teilt Trägerraketen nach der Höhe der in den "Low Earth Orbit" (LEO) beförderbaren Nutzlast in die Kategorien Klein (0-2000 kg), Mittel (2001-20000 kg), Schwer (20001-50000 kg), Super Schwer (≥ 50001 kg) ein.

durch das Hochskalieren vieler Subsysteme von der kleinen auf die mittlere Nutzlast bedingt. Bei der $G_5^{\text{Falcon Heavy}}$ gelang die Skalierung durch den modularen Aufbau ebenfalls mit einem niedrigen PV-Anteil.

Die **Variationsanteile je Subsystem** (Abbildung A.40, rechts) unterscheiden sich stark:

- Die Prinzipvariationen der *Stufe 1 Motoren* waren durch die Eigenentwicklung neuer „Merlin“ Motor-Systemgenerationen bedingt. Die Ausprägungsvariationen der $G_2^{\text{Falcon 9v1.0}}$ (von einem Motor zu neuen Motoren) und $G_5^{\text{Falcon 9 Heavy}}$ (von neun zu 27 Motoren) resultierten aus der Verwendung von mehr Motoren der gleichen Motor-Systemgeneration. In der $G_3^{\text{Falcon 9 v1.1}}$ wurden die Stufe 1 Motoren hinsichtlich Herstellkosten und Leistung umfangreich weiterentwickelt (PV). Die $G_4^{\text{Falcon 9 FT}}$ verwendete ebenfalls neun Motoren, die hinsichtlich ihrer Ausprägung optimiert wurden (AV).
- Bei den *Stufe 2 Motoren* schwenkte SpaceX bei der $G_2^{\text{Falcon 9v1.0}}$ von einem Motor mit reiner Tankdruck-Treibstoffförderung („Kestrel“) auf ein von der Stufe 1 für den Vakuumbetrieb adaptierten Funktionsprinzip mit Turbopumpe um (PV). In der $G_3^{\text{Falcon 9 v1.1}}$ wurden auch die Stufe 2 Motoren umfangreich überarbeitet (PV).
- In allen Systemgenerationen wurden mit RP-1-Kerosin als *Treibstoff* mit Flüssigsauerstoff als Oxidationsmittel angetrieben.
- Das Design des *Fahrzeugs Stufe 1* wurde von der $G_1^{\text{Falcon 1}}$ auf die $G_2^{\text{Falcon 9 v1.0}}$ skaliert (AV), in der $G_3^{\text{Falcon 9 v1.1}}$ übernommen (CV), für die $G_4^{\text{Falcon 9 FT}}$ der thermische Schutz verbessert (AV) und in der $G_5^{\text{Falcon 9 Heavy}}$ das Treibstoffversorgungssystem für die zusätzlichen Motoren geändert (PV).
- Das *Fahrzeug Stufe 2* wurde über alle Systemgenerationen prinzipiell übernommen, ebenso die pneumatische *Stufentrennung* und der *Flugcomputer*.
- Das *Reuse Konzept* wurde in der $G_3^{\text{Falcon 9 v1.1}}$ von Fallschirm auf vertikale Landung geändert (PV) und in der $G_4^{\text{Falcon 9 FT}}$ um Landebeine und Gitterflossen erweitert (PV).
- Das Subsystem *Navigation und Steuerung* wurde in der $G_2^{\text{Falcon 9 v1.0}}$ grundlegend überarbeitet (PV) und musste für die $G_3^{\text{Falcon 9 v1.1}}$ um die Kontrolle der vertikalen Landung erweitert werden.

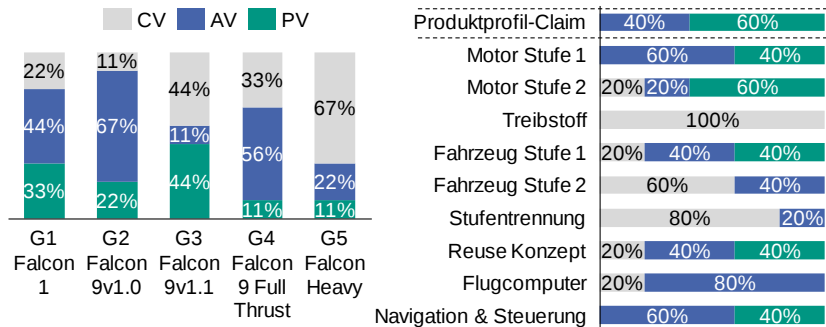


Abbildung A.40: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie SpaceX Falcon.

ArianeGroup: Ariane

Der Startanbieter ArianeGroup ist ein Joint Venture zwischen Airbus und Safran und hat seinen Sitz in Frankreich. Im Rahmen der Fallstudie wurden die neueren Systemgenerationen der Ariane-Trägerraketen analysiert, beginnend mit der G₅^{Ariane} für mittlere Nutzlasten, die 1998 erstmals erfolgreich gestartet wurde. Für die G₅^{Ariane 5G} wurde folgender Produktprofil-Claim rekonstruiert:

Wir brauchen ein Produkt, welches das Erbe seiner Vorgängergenerationen als zuverlässige, performante und flexible Trägerrakete für die europäische Raumfahrt fortsetzt und Nutzlasten bis 6.100 kg in den Geostationary Transfer Orbit (GTO) effizient befördern kann.

In der Fallstudie wurden die sechs in Abbildung A.41 dargestellten Systemgenerationen untersucht, wobei die G₄^{Ariane} als Absprungbasis für die technische Analyse verwendet und nicht als Teil der Evolution analysiert wurde. Eine initiale Datengrundlage wurde im Rahmen einer gemeinsam mit Porsche Consulting Co-betreuten Abschlussarbeit (Demuth, 2024)¹⁴ erhoben. Die in dieser Dissertation genutzte Datenbasis wurde vom Verfasser eigenständig kuratiert,

¹⁴ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

erweitert und für die Fallstudie neu ausgewertet. Der in dieser Dissertation dargestellte Stand ist bislang unveröffentlicht.

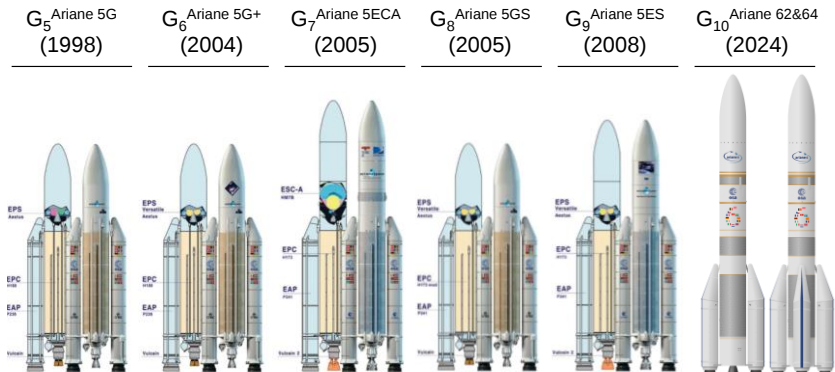


Abbildung A.41: Die sechs untersuchten Systemgenerationen der Ariane
(Bildquellen: G₅ bis G₉ aus DLR, 2023, https://www.dlr.de/de/bilder/raumfahrt/missionen/ariane5_version_en, Lizenz: CC BY-NC-ND 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.de>, G₁₀: SkywalkerPL, 2017, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ariane_62_and_64.svg, Lizenz der bearbeiteten Abbildung: CC BY 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

Systemmodell für die Ariane

Die untersuchten Systemgenerationen der Ariane-Trägerrakete wurden ähnlich der Falcon-Trägerrakete mit **acht Subsystemen** modelliert (Abbildung A.42). Im Gegensatz zur Falcon haben die Systemgenerationen der Ariane kein *Reuse Konzept*. Charakteristisch für den *Motor Stufe 1* der Ariane Trägerrakete ist die Kombination zweier außenliegender Feststoffbooster mit einem mittigen Haupttriebwerk.

Legende	Legende	Legende
1 Motor Stufe 1	4 Fahrzeug Stufe 1	7 Flugcomputer
2 Motor Stufe 2	5 Fahrzeug Stufe 2	8 Navigation und Steuerung
3 Treibstoff	6 Stufentrennung	

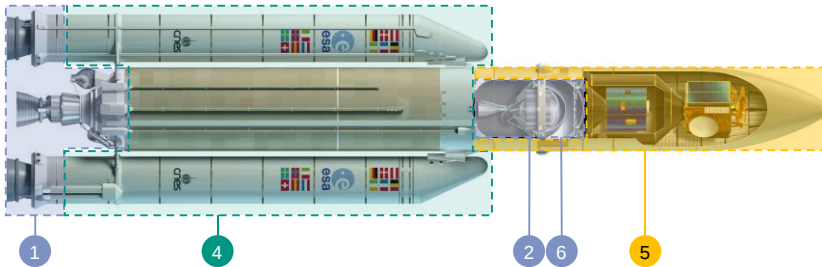


Abbildung A.42: Systemmodell für die Fallstudie ArianeGroup: Ariane anhand der $G_{7}^{\text{Ariane 5 ECA}}$. Die Subsysteme 3, 7, 8 sind nicht abgebildet (Bildquelle: ©ESA, ESA – European Space Agency, 2004).

Evolution der Ariane

Die zentrale Visualisierung der Fallstudie ist in Abbildung A.43 dargestellt. Die grundlegende **Architektur** veränderte sich über die sieben Systemgenerationen nicht. Die Systemgenerationen $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ bis $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$ wurden aufgrund der Anzahl ihrer erfolgreichen Starts als **erfolgreich** eingestuft. Die $G_{10}^{\text{Ariane 62\&64}}$ hatte zum Zeitpunkt der Fallstudie noch keinen erfolgreichen, aber einen fehlgeschlagenen Start 2024 vorzuweisen, was für Trägerraketen nicht unüblich ist.

Der abgeleitete **Produktprofil-Claim** wurde in der $G_5^{\text{Ariane 5G}}$, $G_7^{\text{Ariane 5ECA}}$ und $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ mit AV weiterentwickelt. Zentrale Attribute des Produktprofil-Claims waren Nutzlast und Effizienz. Ausgehend von der im mittleren LEO Nutzlastsegment angesiedelten $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ wurden zwei Systemgenerationen mit gegenüber der $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ (6100 kg) leicht gesteigerter GTO-Nutzlast, die $G_6^{\text{Ariane 5G+}}$ (6300 kg) und $G_8^{\text{Ariane 5GS}}$ (6500 kg), entwickelt. Für die Entwicklung der Systemgenerationen $G_7^{\text{Ariane 5ECA}}$ und $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$ wurde das Evolution-Programm gestartet und ein größerer Leistungssprung in der GTO-Nutzlast erreicht ($G_7^{\text{Ariane 5ECA}}$ 9700 kg, $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$ 8000 kg). Die Systemgenerationen im Evolution-Programm werden als höher eingeordnete **Produktvarianten** verstanden. In dieser Fallstudie wurde eine fortlaufende Indexierung gewählt, da die European Space Agency (ESA) von „Versionen“ spricht. Bei der Entwicklung der $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ stand die Reduzierung der Kosten pro Start im Vordergrund (Arianespace, 2021).

Relevante **Umfeldfaktoren** waren mikroökonomisch der mit der letzten Systemgeneration stärker werdende Wettbewerbsdruck und das ansteigende Marktwachstum. Intern war die Evolution durch eine niedrige vertikale Integration und hohe Standardisierung geprägt, die aus der über Unternehmen in ganz Europa verteilten Entwicklung und Produktion der Subsysteme resultierte.

Die $G_4^{\text{Ariane 4}}$ war Basis und interne Quelle für **RSE** für die Entwicklung der $G_5^{\text{Ariane 5G}}$. RSE für die Entwicklung der $G_6^{\text{Ariane 5G+}}$ und $G_7^{\text{Ariane 5ECS}}$ kamen für beide Systemgenerationen aus der $G_5^{\text{Ariane 5G}}$, da die Entwicklung der $G_6^{\text{Ariane 5G+}}$ und $G_7^{\text{Ariane 5ECS}}$ parallel startete (ESA, 2009). Für die $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$ kamen die meisten RSE aus deren Vorgänger im „Evolution“ Programm $G_7^{\text{Ariane 5ECS}}$, für die $G_8^{\text{Ariane 5GS}}$ aus deren Vorgänger $G_6^{\text{Ariane 5G+}}$. Die $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ basierte auf der $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$. Als externes RSE für das Subsystem *Motor Stufe 1* werden in der $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ Feststoffbooster der von Avio entwickelten Trägerrakete Vega verwendet (Arianespace, 2024).

Bei der Analyse der **Variationsanteile über die Systemgenerationen** in Abbildung A.44, links steht die $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$ mit einem CV-Anteil von $\delta_{CV} = 100\%$ heraus. Dieser ergab sich aus der Übernahme von RSE aus der $G_8^{\text{Ariane 5GS}}$ und $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$. Die $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ und die $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ haben mit $\delta_{PV} = 50\%$ den höchsten PV-Anteil. In den Systemgenerationen dazwischen markiert die $G_7^{\text{Ariane 5ECA}}$ den Start des Evolution-Programms und hebt sich mit ebenfalls hohem PV-Anteil ab.

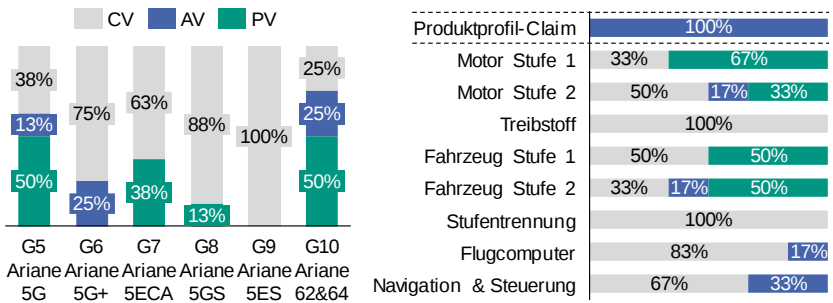


Abbildung A.44: Vergleich der Variationsanteile je Systemgeneration (links) und Vergleich der Variationsanteile je Subsystem und für den Produktprofil-Claim (rechts) für die Fallstudie Ariane.

Beim Vergleich der **Variationsanteile je Subsystem** in Abbildung A.44, rechts fällt der *Motor Stufe 1* mit PV in vier von sechs Systemgenerationen auf: Für die $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ wurden Feststoffbooster („P238“) und Haupttriebwerk („Vulcain-1“) basierend auf der Vorgängergeneration prinzipiell neu entwickelt (PV). Für das „Evolution“ Programm wurde ein Haupttriebwerk mit neuer Turbopumpe („Vulcain 2“) und Feststoffbooster mit mehr Treibstoffkapazität („P241“) entwickelt (PV). Für die $G_8^{\text{Ariane 5GS}}$ wurde ein herstellungskostenoptimiertes Haupttriebwerk („Vulcain 1b“) entwickelt (PV). Die $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ setzt neben den unter RSE erwähnten neuen Avio Feststoffboostern auch auf ein hinsichtlich Kosten und Leistung optimiertes Haupttriebwerk („Vulcain 2.1“) (PV).

Der *Motor Stufe 2* für die $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ („Aestus“) wurde ebenfalls basierend auf der Vorgängergeneration prinzipiell neu entwickelt (PV) und in der $G_6^{\text{Ariane 5G+}}$ (mit leichten Modifikationen, AV), der $G_8^{\text{Ariane 5GS}}$ und der $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$ eingesetzt. Die $G_7^{\text{Ariane 5ECS}}$ verwendete den kryogen betriebenen HM-7B Stufe 2 Motor der $G_4^{\text{Ariane 4}}$ (CV). Für die $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ wurde ein neues kryogenes Triebwerk („Vinci“) entwickelt (PV).

Alle untersuchten Systemgenerationen verwendeten Flüssigwasserstoff (LH_2) als *Treibstoff* mit Flüssigsauerstoff (LO_2) als Oxidationsmittel für das Haupttriebwerk der Stufe 1. Für ihren kryogenen Stufe 2 Motor verwenden die $G_7^{\text{Ariane 5ECS}}$ und $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ ebenfalls LH_2 und LO_2 , während $G_5^{\text{Ariane 5G}}$, $G_6^{\text{Ariane 5G+}}$, $G_8^{\text{Ariane 5GS}}$ und $G_9^{\text{Ariane 5ES}}$ Monomethylhydrazin (CH_3NHNH_2) mit Distickstofftetroxid (N_2O_4) als Oxidationsmittel einsetzen.

Das *Fahrzeug Stufe 1* wurde für die $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ neu entwickelt (PV), für die erhöhte Leistung der „Evolution“ Systemgenerationen strukturell ertüchtigt (PV) und für die $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ weitgehend neu entwickelt (PV). Das *Fahrzeug Stufe 2* war modular und bot ab der $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ Module für verschiedene Nutzlasten (PV). Mit dem geänderten Motor und Treibstoff der Stufe 2 in der $G_7^{\text{Ariane 5ECS}}$ wurde auch das Fahrzeug strukturell geändert (PV) und für die $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ grundlegend überarbeitet.

Für die *Stufentrennung* nutzten alle Systemgenerationen das gleiche pyrotechnische Konzept. *Flugcomputer* und *Navigationseinheit* wurden mit der $G_5^{\text{Ariane 5G}}$ und der $G_{10}^{\text{Ariane 62 \& 64}}$ angepasst (AV).

Anhang B Playbook

In Anhang B wird ein Auszug aus dem Playbook präsentiert, der im IP-Jahrgang 2023/24 angewendet und initial mithilfe einer Fragebogen-Umfrage evaluiert wurde. Die Ergebnisse der Evaluation werden am Ende von Anhang B in Abbildung B.45 gezeigt.

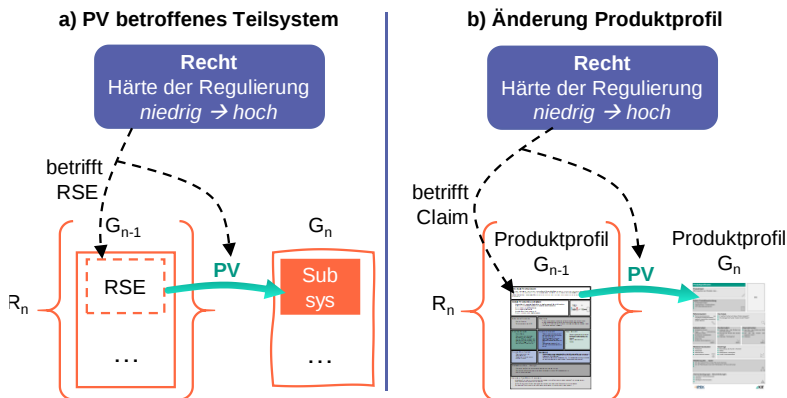
Auszug aus dem Playbook

Progressive regulierende Gesetzgebung

Empfohlener SGE Spielzug

Bei progressiver werdender regulativer Gesetzgebung sollte

- in betroffenen Teilsystemen **PV** durchgeführt werden, um so früh einen Vorteil gegenüber Wettbewerbern zu erlangen.
- das **Produktprofil** geändert werden, um einen anderen Rechtsraum zu adressieren.



Erklärung

Frühes Handeln führt evtl. zu „Übererfüllung“ der aktuellen aber Erfüllung der zukünftigen Vorgaben, was kurzfristig Differenzierung und längerfristig einen strategischen Wettbewerbsvorteil ergeben kann.



Zu beachten: Voraussetzung ist die frühzeitige und kontinuierliche Beobachtung des makroökonomischen Umfelds.



Methodenempfehlung

- PGE Risikoportfolio
- FMEA
- Analyse der Änderungsausbreitung (DSM)



Chance: Durch die PV kann ein Differenzierungsmerkmal entstehen.



Risiko: Bei PV resultiert tendenziell in einem höheren Entwicklungsrisiko. Produktprofil-Änderungen bedingen häufig Variationen des technischen Systems.

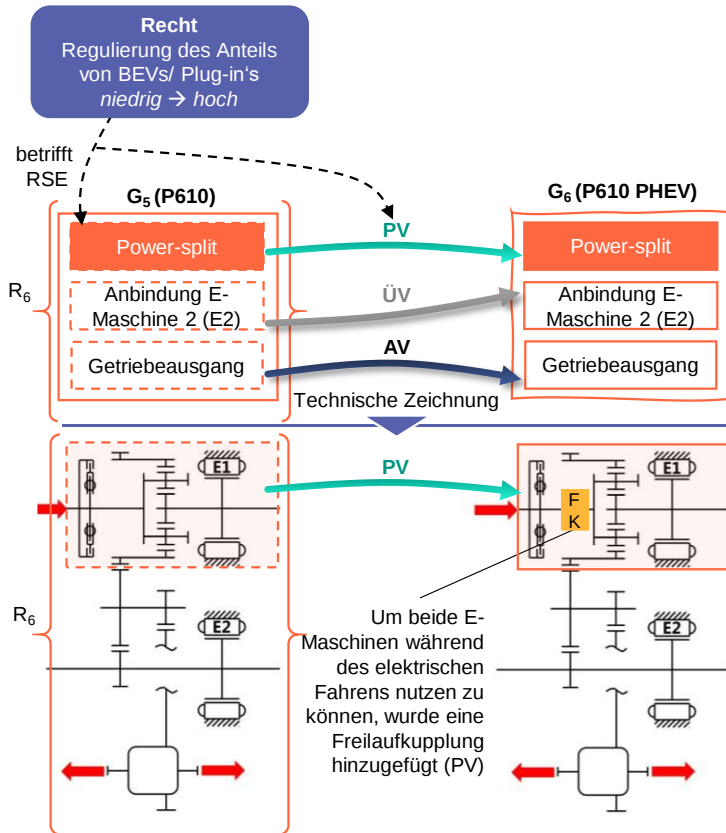
Beispiel Produkt- und Systemgenerationen

- G_6^{THS} (P610 PHEV), G_7^{iPhone} , G_{11}^{iPhone} , G_{14}^{iPhone}
- $G_3^{\text{Google Glass}}$

Progressive regulierende Gesetzgebung

Toyota Hybrid Synergy Drive (THS): 6. Getriebegeneration im Zuge des Zero Emission Vehicle (ZEV) Programms in Kalifornien

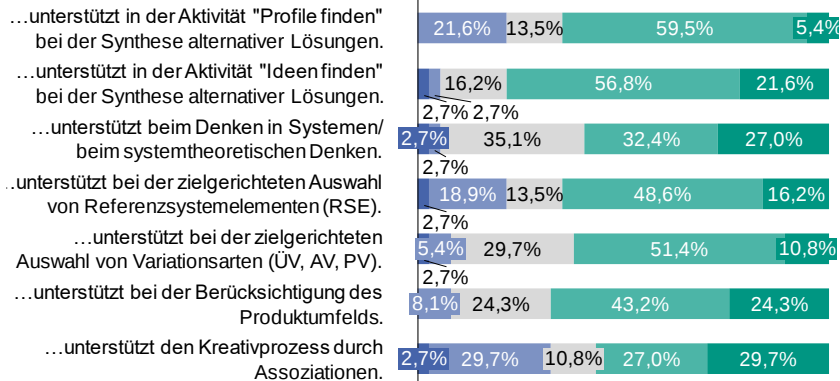
Mit dem G_6 THS agierte Toyota vorausschauend im Hinblick auf eine angekündigte Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen in Kalifornien. Ab 2018 musste ein Mindestprozentsatz der gesamten Fahrzeugverkäufe aus vollelektrischen Fahrzeugen und Plug-in-Hybriden bestehen. Da weder die bisherigen leistungsverzweigten, noch die konventionellen Getriebe diese Anforderungen erfüllten, beschloss Toyota, einen Plug-in-Hybrid auf Basis des leistungsverzweigten G_5 THS zu entwickeln, das G_6 THS. Um Kosten zu sparen, wurden bei der Entwicklung des G_6 THS so viele ÜV und AV wie möglich mit RSE aus dem G_5 THS durchgeführt.



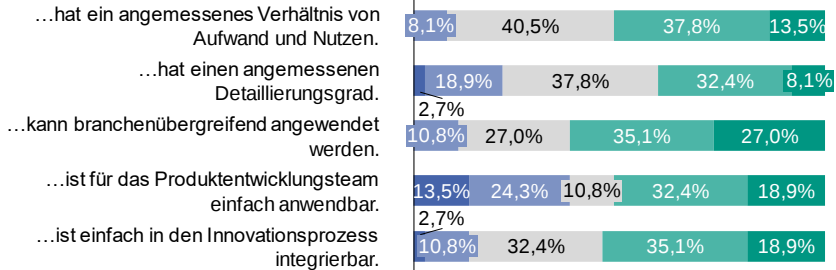
Auswertung der Live-Lab Studie

n=37 nicht erfüllt eher nicht erfüllt neutral eher erfüllt voll erfüllt

Unterstützungsleistung



Anwendbarkeit



Erfolgsbeitrag

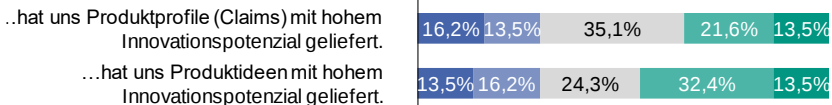


Abbildung B.45: Auswertung der Live-Lab Studie.

Anhang C Einsatz Generativer KI

Als Generative KI wurde Microsoft M365 CoPilot mit Unternehmensdatenschutz des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und für Übersetzungen DeepL Pro eingesetzt.

Prompt für das Lektorat – jeweils 8000 Wörter schrittweise überprüft

Analysiere den folgenden deutschen Text ausschließlich auf:

- Rechtschreibfehler
- Grammatikfehler
- grobe Stil- oder Ausdrucksfehler, die die Verständlichkeit oder wissenschaftliche Korrektheit beeinträchtigen
- korrekte Zitierweise nach den Richtlinien der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (DGPs 5)
(z. B. Format von Autor-Jahr-Zitaten, Kommasetzung, Verwendung von „et al.“, korrekte Klammerung, Reihenfolge bei mehreren Autoren)

Wichtige Regeln:

- Gib keine überarbeitete Version des Textes zurück.
- Zeige nur die gefundenen Fehler und erläutere jeweils:
 - Warum es ein Fehler ist
 - Wie die korrekte Formulierung lautet
- Ignoriere kleine stilistische Verbesserungen, die nicht zwingend notwendig sind.
- Erhalte den Originaltext unverändert.

Format der Ausgabe:

- Liste die Fehler in der Reihenfolge ihres Auftretens.
- Für jeden Fehler:
 - Originalstelle: „...“
 - Fehlerart: Rechtschreibung / Grammatik / Stil / Zitierweise
 - Korrekturvorschlag: „...“
 - Begründung: kurze Erklärung

Prompt für die Vorschläge für Zusammenfassungen der Fallstudien in Kapitel 6.2.1 – jeweils Vorschlag für eine Fallstudie generiert

Das ist meine erste Zusammenfassung für die Fallstudie iPhone: Die Fallstudie untersucht die von 2007 bis 2024 erschienenen iPhone Systemgenerationen geclustert in 26 Systemgenerationen und unterteilt in drei Produktvarianten (High-End, Mid-Range, Low-End). Die mit 13 Subsystemen modellierte Architektur und blieben bestehen. Das Produktprofil entwickelte sich nach der G23G nicht mehr mit PV weiter. Bis auf die G75c und die G12XS/Max waren alle Systemgenerationen erfolgreich. Umfeldfaktoren wie Kundenkritik, technologische Standards und der Wechsel zu einem Plattform-Geschäftsmodell beeinflussten die Entwicklung. Subsysteme mit relativ hohem PV Anteil waren Kamera, Gehäuse, CPU, Sensoren und Software. Unter den Systemgenerationen stach die G11X mit $\delta PV = 46\%$ heraus. Bitte fasse die nächsten Fallstudien in ähnlicher Weise zusammen.