

Günther Schuh
Michael Riesener
Alexander Keuper

Produktkomplexität managen

Strategien – Methoden – Tools



4., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Schuh / Riesener / Keuper
Produktkomplexität managen



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Günther Schuh
Michael Riesener
Alexander Keuper

Produktkomplexität managen

Strategien – Methoden – Tools

4., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Über die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Günther Schuh, FIR e. V. an der RWTH Aachen und ehemals Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Michael Riesener, Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen und RWTH Innovation GmbH

Dr.-Ing. Alexander Keuper, Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen und Complexity Management Academy GmbH

Print-ISBN: 978-3-446-48551-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-48717-8

E-Pub-ISBN: 978-3-446-48835-9

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © gettyimages.de/Hilch

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck: Elanders Waiblingen GmbH, Waiblingen

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort	XI
Vorwort der vierten Auflage	XI
Vorwort der dritten Auflage	XII
Vorwort der zweiten Auflage	XIV
Vorwort der ersten Auflage	XV
Mitverfasserverzeichnis	XVII
 Teil A: Grundlagen und Strategien des Managements der Produktkomplexität	 1
1 Grundlagen des Managements der Produktkomplexität	3
1.1 Aktuelle Entwicklungen des Komplexitätsmanagements	3
1.1.1 Auswirkungen durch die Weiterentwicklung künstlicher Intelligenz	7
1.1.2 Veränderungen im Komplexitätsmanagement durch Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft	9
1.2 Grundlagen der Produktkomplexität	11
1.2.1 Komplexe Systeme	12
1.2.2 Komplexitätsmanagement, Variantenmanagement und Produktkomplexität	17
1.3 Ursachen der steigenden Produktkomplexität	20
1.3.1 Externe Komplexität	23
1.3.2 Interne Komplexität	25

1.4	Auswirkungen der steigenden Produktkomplexität	26
1.4.1	Nutzenwirkung der Vielfalt	30
1.4.2	Kostenwirkung der Vielfalt	32
1.5	Optimale Produktkomplexität	34
1.5.1	Fit zwischen interner und externer Komplexität	35
1.5.2	Optimaler Komplexitätsgrad	36
1.6	Best-Practice-Beispiele des Komplexitäts- und Variantenmanagements ...	38
2	Strategie zum Management der Produktkomplexität	41
2.1	Positionierung der Strategie	41
2.1.1	Bedeutung und Reichweite der Strategie	42
2.1.2	Einbettung in den strategischen Kontext	43
2.2	Einflussfaktoren auf die Strategie	45
2.2.1	Outside-In-Betrachtung – Umfeld und Komplexitätsstrategie: Der „Fit“ entscheidet	47
2.2.2	Inside-Out-Betrachtung: Die richtigen Kompetenzen auf- und ausbauen	51
2.2.3	Auswirkungen des fehlenden Fits: Das historische Fallbeispiel „Borgward“	54
2.3	Bezugsrahmen für die Strategie	56
2.3.1	Komplexitätsmanagement im St. Galler Management-Konzept ...	56
2.3.2	Handlungsfelder für das Komplexitätsmanagement	58
2.3.3	Struktur für die Vermittlung der Inhalte zum Management der Produktkomplexität	60
Teil B:	Produktvielfalt planen	63
3	Chancen und Herausforderungen durch Angebotsvielfalt	65
3.1	Chancen durch hohe Angebotsvielfalt	65
3.1.1	Produktvielfalt als Markteintrittsbarriere nutzen	66
3.1.2	Produktvielfalt durch Dienstleistungen kompensieren	67
3.1.3	Software-getriebene physische Systeme anbieten	70
3.1.4	Preisqualität durch Konfigurationslogik sichern	72
3.1.5	Beherrschung der zusätzlichen Angebotsvielfalt durch Release-Engineering	75

3.2	Gefahren der Angebotsvielfalt	79
3.2.1	Selbstkonkurrenzierung vermeiden	80
3.2.2	Auswahlkomplexität für Kunden reduzieren	82
3.2.3	Verlust der Profitabilität vermeiden	85
3.2.4	Ausufernde Pflegeaufwände vermeiden	89
3.2.5	Unkontrolliertes Variantenwachstum unterbinden	92
4	Produktprogrammplanung.....	97
4.1	Bedeutung der Produktprogrammplanung für das Komplexitätsmanagement	97
4.2	Strukturierung und Differenzierung des Produktprogramms	99
Teil C: Produktvielfalt strukturieren		103
5	Produktstrukturierung.....	105
5.1	Was ist eine Produktarchitektur?	105
5.2	Typen von Produktarchitekturen	107
5.3	Relevante Begriffe im Kontext der Produktarchitektur	109
5.3.1	Baureihen	109
5.3.2	Module und Modularisierung	109
5.3.2.1	Module	109
5.3.2.2	Modularisierung	110
5.3.3	Plattformen	111
5.3.4	Baukastensysteme	112
5.4	Baukastengestaltung	114
5.4.1	Phase I: Ziele der Baukastengestaltung festlegen	115
5.4.2	Phase II: Analyse der externen und internen Anforderungen	118
5.4.3	Phase III: Baukastenstandards definieren	123
5.4.4	Phase IV: Baukastenkonfiguration definieren	128
6	Methoden zur Analyse und Strukturierung der Produktvielfalt.....	139
6.1	Merkmalbaum	139
6.2	ABC-Analyse	144
6.3	Merkmalsausprägungsstatistik	147

- 6.4 Win-Loss-Analyse 149
- 6.5 Variantenvielfalt aus Stücklisten extrahieren 151
- 6.6 Gleichteileverwendung 153
- 6.7 Analyse des Modularitätsgrads 155
- 6.8 Variantenbaum 157

- 7 Neue Modularität..... 161**
- 7.1 Anforderungen an die neue Modularität 161
- 7.2 Vorausschau als Basis für die Architekturentwicklung 164
- 7.3 Kritische Elemente identifizieren 166
- 7.4 Emergente Produktarchitektur 169

- Teil D: Kosten durch Produktvielfalt bewerten 173**

- 8 Kostenmanagement..... 175**
- 8.1 Grundlagen des Kostenmanagements 175
- 8.2 Zielkostenmanagement 176
 - 8.2.1 Grundprinzip 176
 - 8.2.2 Einsatzmöglichkeiten 178
 - 8.2.3 Vorgehensweise 179
- 8.3 Value Engineering 183

- 9 Vielfaltsorientierte Kalkulation..... 187**
- 9.1 Defizite bestehender Kostenrechnungssysteme 187
- 9.2 Komplexitätskostentheorie 190
- 9.3 Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung (RPK) 194
- 9.4 Referenzfallbasierte Komplexitätskostenermittlung 198
- 9.5 Komplexitätskostenmodell aufbauen 204
- 9.6 Einsatzmöglichkeiten von Komplexitätskosten 210

- Teil E: Produktvielfalt produzieren 217**

- 10 Leistungsprozessgestaltung 219**
- 10.1 Interdependenz zwischen Prozess-, Produktprogramm- und Produktgestaltung 219
- 10.2 Komplexitätsbeherrschung durch Produkt- und Prozessgestaltung 220
 - 10.2.1 Synchronisation von Produkt- und Prozessbaukästen 223
 - 10.2.2 Segmentierung des Leistungserstellungsprozesses 227

10.3	Produktion und Steuerung der Produktvielfalt	229
10.3.1	Einsatz von Fertigungstechnologien	229
10.3.2	Planung und Steuerung der Produktvielfalt	232
11	Auftragsneutrale und kundenauftragspezifische Disposition	235
11.1	Herausforderungen in der Auftragsabwicklung von Einzel- und Kleinserienfertigung	235
11.2	Auswirkungen des Produktstrukturtyps auf den Leistungserstellungsprozess	236
11.3	Strategische Disposition	238
11.3.1	Planungsprozess im Überblick	238
11.3.2	Konzept der strategischen Disposition	240
Teil F:	Produktvielfalt beherrschen	243
12	Product Lifecycle Management (PLM) zur Beherrschung der Datenkomplexität	245
12.1	Nutzen und Aufwand	246
12.2	Dimensionen von PLM	248
12.3	Informationstechnische Umsetzung von PLM	251
12.4	Stücklisten	256
12.4.1	Stücklisten nach Struktur und Variantenbezug	257
12.4.2	Lebenszyklus- und funktionsorientierte Stücklisten	260
13	Konfiguration in der Auftragsabwicklung	263
13.1	Beschleunigung der Auftragsabwicklung	263
13.2	Die Rolle von Konfiguration	266
13.3	Vertriebs- und Konfigurationsprozess	266
13.4	Konfigurationssysteme	269
13.5	Vorgehen zum Aufbau eines Produktkonfigurators	272
14	Variantenmanagement	277
14.1	Lebenszyklus von Varianten	277
14.2	Planung von Varianten	279
14.3	Einführung von Varianten	281
14.4	Controlling von Varianten	283
14.5	Abkündigung von Varianten	287

Teil G: Komplexitätsmanagement umsetzen	291
15 Organisation des Komplexitätsmanagements	293
15.1 Einführung des Komplexitätsmanagements im Unternehmen	293
15.1.1 Grundsätze zum Komplexitätsmanagement	293
15.1.2 Zehn Thesen zum Komplexitätsmanagement	295
15.2 Organisatorische Verankerung des Komplexitätsmanagements	296
15.2.1 Ablauforganisatorische Handlungsfelder	296
15.2.1.1 Auftragsabwicklung	296
15.2.1.2 Pflege- und Managementprozesse	298
15.2.2 Aufbauorganisatorische Handlungsfelder	299
15.2.3 Den Wandel erfolgreich gestalten	302
16 Kennzahlen und Steuerung im Komplexitätsmanagement ...	307
16.1 Steuerbereiche im Komplexitätsmanagement	307
16.2 Kennzahlen im Komplexitätsmanagement	309
16.3 Monitoring im Komplexitätsmanagement	312
17 Schlusswort und Ausblick	315
Literatur	321
Index	343

Vorwort

Vorwort der vierten Auflage

„Krisen sind nicht nur Störungen – sie sind Prüfsteine für die Zukunftsfähigkeit.“ Die vorliegende vierte Auflage des Buches *Produktkomplexität managen* entsteht in einer Zeit multipler Krisen. Geopolitische Spannungen, fragile Lieferketten, Energie- und Rohstoffvolatilität, Fachkräftemangel sowie der beschleunigte technologische Wandel verändern die Rahmenbedingungen industrieller Wertschöpfung in einer Intensität, wie sie in dieser Form lange nicht zu beobachten war. Für Hochlohnstandorte wie Deutschland ist diese Entwicklung von besonderer Relevanz, da Wettbewerbsfähigkeit zunehmend nicht allein über einzelne Innovationssprünge, sondern über die Fähigkeit zur systematischen Beherrschung industrieller Komplexität entschieden wird.

Die Komplexität in produzierenden Unternehmen wächst dabei nicht mehr nur durch Variantenvielfalt, Internationalisierung und verkürzte Innovationszyklen. Sie wird heute zusätzlich durch neue Dimensionen geprägt: datengetriebene Produkte und Entwicklungsprozesse, der rasante Fortschritt künstlicher Intelligenz, die zunehmende Vernetzung in Wertschöpfungs- und Distributionsnetzwerken sowie die Anforderungen an Nachhaltigkeit, Transparenz und Kreislaufwirtschaft. Diese Entwicklungen führen dazu, dass Komplexität nicht mehr als „Begleiterscheinung“ des Marktes verstanden werden kann, sondern als strukturelle Eigenschaft moderner industrieller Systeme.

Vor diesem Hintergrund wird Komplexitätsmanagement endgültig zur Pflicht, nicht zur Kür. Die Fähigkeit, Varianz und Unsicherheit nicht nur zu reduzieren, sondern gezielt zu gestalten und in Wertschöpfung zu überführen, entscheidet maßgeblich über die Zukunftsfähigkeit von Unternehmen. Dabei reicht es längst nicht mehr aus, Komplexität durch kurzfristige Restrukturierungen oder isolierte Optimierungsinitiativen zu adressieren. Vielmehr ist ein wirksames Komplexitätsmanagement als strategische und organisatorische Querschnittsfunktion erforderlich, die Entscheidungen entlang

von Produktprogramm, Produktarchitektur, Wertschöpfungssystem und Lebenszyklus konsequent integriert.

Wie bei den vorangegangenen Auflagen verbindet auch dieses Buch theoretische Erläuterungen mit praxisorientierten Hinweisen zur Umsetzung. Ziel ist es, relevante Fragen des Komplexitätsmanagements in Forschung und Industrie zu strukturieren, anwendungsnah zu beantworten und den Leser zur kritischen Reflexion eigener Komplexitätsmuster zu befähigen. Die Leser sollen nicht mit „Kochrezepten“ versorgt werden, sondern mit einem konsistenten Argumentations- und Methodenrahmen, der in unterschiedlichen Branchen und Unternehmenssituationen tragfähig ist.

Die vierte Auflage trägt den erheblichen Weiterentwicklungen in Wissenschaft und Praxis Rechnung. Zahlreiche Methoden und Werkzeuge wurden in den vergangenen Jahren weiterentwickelt, ergänzt und in Industrieprojekten erprobt. Darüber hinaus wurden Inhalte aktualisiert, um die neuen Dimensionen der Komplexität, insbesondere im Kontext künstlicher Intelligenz und nachhaltiger, zirkulärer Wertschöpfung, systematisch zu integrieren. Auch die Struktur des Buches wurde in Teilen überarbeitet, um die Inhalte noch klarer entlang der Herausforderungen moderner Produkt- und Wertschöpfungssysteme auszurichten.

Die vorliegende Auflage profitiert dabei erneut von den Erfahrungen aus einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten, Forschungs- und Industrieprojekten sowie aus der Zusammenarbeit mit Unternehmen unterschiedlichster Branchen. Gerade in Zeiten multipler Krisen zeigt sich, dass es nicht einzelne Maßnahmen sind, die über den Erfolg entscheiden, sondern die Fähigkeit, Komplexität effizient und zugleich effektiv zu beherrschen: effizient im Sinne einer Reduktion nicht-wertschöpfender Varianz und effektiver Prozesse, und effektiv im Sinne einer gezielten Nutzung wertschöpfender Vielfalt zur Sicherung von Marktpositionen.

Wir hoffen, dass diese Auflage Sie motiviert und Sie dabei unterstützt, das weiterhin hochrelevante Thema der Produktkomplexität systematisch anzugehen. Wenn es gelingt, Komplexität nicht als Belastung, sondern als gestaltbaren Bestandteil industrieller Wettbewerbsfähigkeit zu begreifen, kann Komplexitätsmanagement einen wesentlichen Beitrag leisten, um gemeinsam den Industriestandort Deutschland und Europa nachhaltig zu sichern.

Günther Schuh, Michael Riesener und Alexander Keuper Aachen im Frühjahr 2026

Vorwort der dritten Auflage

„Eine Veränderung bewirkt stets eine weitere Veränderung“ (Niccolò Macchiavelli). Die dritte Auflage des Buches *Produktkomplexität managen* ist basierend auf den umfangreichen Erfahrungen und deutlichen wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen in den letzten Jahren entstanden. Die Erkenntnisse aus wissenschaftlichen Arbeiten und Industrieprojekten haben gezeigt, dass eine Überarbeitung

der bestehenden Ansätze notwendig gewesen ist. Die weiter zunehmende Globalisierung, die immer stärker werdende Mikrosegmentierung der Märkte sowie die Verbreitung cyber-physischer Produkte im Kontext von Industrie 4.0 führen zu einer steigenden Komplexität in der gesamten Wertschöpfungskette produzierender Unternehmen. Die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen in Deutschland hängt maßgeblich davon ab, wie gut die Komplexität beherrscht wird. Komplexitätsmanagement wird damit zunehmend zur Chefsache.

Wie bei den ersten Auflagen ist auch dieses Buch eine Kombination aus theoretischer Erläuterung und praktischen Hinweisen zur Umsetzung des Managements der Produktkomplexität. Das Ziel des Buches besteht darin, für die Aus- und Weiterbildung sowie die Anwendung in Forschung und Industrie die relevanten Fragen zu stellen und zu beantworten.

Die Überarbeitung des Buches profitiert im Wesentlichen von den zahlreichen Erfahrungen aus Studien, Beratungsprojekten, Industrieprojekten, Forschungsprojekten, Dissertationen etc. Wie bei der letzten Auflage wurde auch dieses mal der Fokus darauf gelegt, praktische Erfahrungen und Best Practices zum Umgang mit der Produktkomplexität auszuarbeiten und anwendungsgerecht vorzustellen.

Im Vergleich zur zweiten Auflage wurden teilweise deutliche Veränderungen vorgenommen. Im Kern wurde eine neue Gliederung der Kapitel eingeführt, um eine anwendungsnähere Struktur zu erhalten. Die Kapitel wurden um praktische Erfahrungen aus Dutzenden Industrie- und Forschungsprojekten und aktuellen Studien ergänzt, um die Inhalte dem Leser möglichst anschaulich nahezubringen. Darüber hinaus wurden einige Beschreibungen der relevanten Ansätze und Methoden aktualisiert.

Wesentliche inhaltliche Neuerungen ergeben sich in den Bereichen Produktarchitekturentwicklung und Baukastenentwicklung, welche beide in den vergangenen Jahren branchenübergreifend eine weite Verbreitung in der produzierenden Industrie erlebt haben. In diesem Zusammenhang ist auch die organisatorische Verankerung des Komplexitätsmanagements in den vergangenen Jahren zunehmend wichtiger geworden. Im Kontext der horizontalen und vertikalen Vernetzung durch Industrie 4.0 stellt auch das Product Lifecycle Management einen wesentlichen Stellhebel dar, um erfolgreiches Komplexitätsmanagement zu betreiben.

An dieser Stelle möchten wir ein herzliches Dankeschön an das gesamte Team der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung Innovationsmanagement für den großartigen Einsatz und die fachliche Überarbeitung bei der Erstellung der neuen Auflage richten. Die neue Auflage wurde wesentlich geprägt durch Dr. Stefan Breunig, Christian Dölle, Manuel Ebi, Dr. Michael Schiffer, Sebastian Schloesser und Elisabeth Schrey.

Darüber hinaus bedanken wir uns sehr herzlich bei Dr. Stephan Krumm, Geschäftsführer der Schuh & Co. GmbH, sowie bei Michael Friedrich, Manager der Schuh & Co. GmbH, welche die Überarbeitung fachlich unterstützt, Erfahrungen eingebracht und die Software „Complexity Manager“ weiterentwickelt haben.

Wir hoffen und denken, dass die neue Auflage des Buches Sie dabei motivieren und dabei unterstützen kann, das nach wie vor höchstrelevante Thema der Produktkomplexität systematisch anzugehen. Dabei wünschen wir allen Beteiligten viel Erfolg!

Günther Schuh und Michael Riesener

Aachen, im Herbst 2017

Vorwort der zweiten Auflage

„Kein Buch kann jemals fertig werden: während wir daran arbeiten, lernen wir immer gerade genug, um seine Unzulänglichkeit klar zu sehen“ (Karl Popper). So ist nun auch die zweite Auflage meines Buches *Produktkomplexität managen* ihrerseits Ergebnis permanenten Wandels. Dies ist insbesondere durch eine weiterhin ungebremschte Dynamik des wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Umfeldes bedingt, was zu einer für den Einzelnen immer weniger überschaubaren Technologiewelt führt und die Unternehmen für das Komplexitätsmanagement weiter sensibilisiert hat. Diesem Themenkomplex ist hierbei jedoch weiter reichend und tiefer gehend als durch „Reorganisationen“ oder „Restrukturierungen“ zu begegnen. Unternehmen wie auch Wissenschaftler, die in dieser unüberschaubaren Welt agieren, streben eine Neubestimmung der Erfolgsposition der Unternehmung im Markt und Wettbewerb und eine grundlegende Umgestaltung der Potenziale an, auf denen diese Position beruht. Genau dies sind Fragen, denen das Prädikat „Komplexität managen“ zukommt. Die Bewältigung dieser Zukunftsaufgaben und die Sicherung des Standortes Deutschland beziehungsweise Westeuropa ist nur durch eine effiziente Umsetzung eines Komplexitätsmanagements zum Erhalt des Anschlusses respektive eine Vorreiterrolle im Hinblick auf den Weg hin zur Wissens- und Innovationsgesellschaft möglich.

Ausgehend von diesem Verständnis haben wir uns die Aufgabe gestellt, die theoretische Erklärung und die praktische Bewältigung des Komplexitätsmanagements weiter voranzutreiben bzw. zu unterstützen und damit einen Beitrag zur Erklärung und Hilfestellung zur Umsetzung des Komplexitätsmanagements zu leisten. Somit wendet sich diese zweite Auflage wie auch schon die erste an Leser, die Antworten auf die komplizierten Fragen des Komplexitätsmanagements in Aus- und Weiterbildung, in Wissenschaft und Praxis suchen und sich darauf einlassen wollen, neue Fragen zu stellen oder alte Probleme in einem neuen Licht zu sehen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Team für die Einsatzbereitschaft, die fachliche Unterstützung sowie die Begeisterung, mit der alle zu Werke gingen, bedanken. Diese sind Dr. Christian Neubaur, Mitglied der Geschäftsleitung der GPS AG, Dipl.-Ing. Michael Friedrich, Senior Consultant der GPS Schuh & Co. GmbH, mein Co-Autor der ersten Auflage Dr. Urs Schwenk, sowie die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung Innovationsmanagements meines Lehrstuhls an der RWTH Aachen, insbesondere Dipl.-Ing. Jens Meier.

Die zweite Auflage wurde in allen Kapiteln überarbeitet beziehungsweise ergänzt. Zwei neue Kapitel mit Beispielen aus der unternehmerischen Praxis wurden eingefügt. Das eine behandelt die Fragen des strategischen Variantenmanagements, das andere präsentiert die Aspekte zur Nutzung zusätzlicher Marktchancen durch eine größere Angebotsvielfalt. Des Weiteren wird die immer häufiger anzutreffende Thematik des Product Lifecycle Managements (PLM), das wesentliche Aspekte des Komplexitätsmanagements verkörpert, in einem neuen Abschnitt beschrieben. Die in der ersten Auflage beigefügte Software „Complexity Manager“[®] ist durch eine aktuelle Version ersetzt worden.

Die Verbesserungen und Erweiterungen profitieren maßgeblich von mittlerweile gewonnenen Erfahrungen mit der Anwendung und Umsetzung in Vorträgen, Studien, Seminaren, diversen wissenschaftlichen Projekten und Praxisprojekten im Wirkungsumfeld des Komplexitätsmanagements sowie davon, dass einige der wissenschaftlichen Mitarbeiter inzwischen selbst gestandene Praktiker sind. Somit zeichnen sich die einzelnen Kapitel wie schon in der ersten Auflage durch eine hohe Praxisnähe und Aktualität aus. Sowohl die neuen als auch die überarbeiteten Kapitel enthalten viele praktische Regeln, Vorgehensweisen und Erfahrungen – allerdings nicht in Form von „Kochrezepten“, sondern eingebettet in argumentative und erklärende Zusammenhänge. Die Leser sollen durch dieses Buch angespornt werden, Mut zu fassen, um das nach wie vor dringende Problem der Produktkomplexität systematisch anzugehen. Nun bleibt mir nur zu hoffen, dass sich auch in den Augen des Lesers die Mühe aller Beteiligten gelohnt hat.

Günther Schuh

Aachen, im Frühjahr 2005

Vorwort der ersten Auflage

„Komplexität managen ist wie Haare schneiden“, sagte vor Kurzem ein Mitarbeiter zu mir. Deshalb gefalle ihm sein Job so gut. Es sei immer eine methodisch anspruchsvolle Querschnittsaufgabe, die man mit einem umfassenden Werkzeugkasten lösen kann. Das Thema unterliege immer wieder neuen Moden wie JIT, TQM, Modularisierung, Mass Customization, Plattformkonzept oder jetzt Collaborative Commerce. Eins aber bleibe immer gleich – wie beim Friseur: Von Zeit zu Zeit brauche man Anstrengungen und zum Teil auch professionelle Unterstützung, um die „nachgewachsene“ Komplexität wieder neu zu bewältigen.

Komplexität managen heißt aber nicht nur, Façon in das Unternehmen zu bekommen, Ordnung zu schaffen und Unnötiges wegzuschneiden. Komplexität kann zur Einzigartigkeit des Unternehmens signifikant beitragen. Sie kann Markteintrittsbarrieren aufbauen, „Lock-ins“ produzieren und eigenständige strategische Erfolgsposition sein.

Kernstück der Unternehmenskomplexität ist die Produktkomplexität. Ohne die Fähigkeit, die Produktkomplexität zu managen, d. h. letztlich die Variantenvielfalt als Waffe im Wettbewerb einzusetzen, wird jeweils nur an den Symptomen „geschraubt“.

Nach nun fast 20 Jahren intensiver Auseinandersetzung mit dem Thema Variantenvielfalt, mehr als 200 Projekten, unzähligen Diplomarbeiten, einem Dutzend Dissertationen, verschiedenen Tools und mit dem Rückenwind eines umfassenden Benchmarking-Projektes, ist es an der Zeit, eine Zusammenstellung von zueinander kompatiblen Variantenstrategien, Methoden und Tools im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes zu versuchen. Dies umso mehr, als das Internet-Zeitalter ansetzt, die Transaktionskosten (Malone) zu senken, die Spezialisierung (Coase) zu erhöhen und die Kommunikationsreichweite drastisch zu verbessern. Das Wertschöpfungsgefüge wird in jeder Hinsicht komplexer, gleichzeitig lässt sich die Komplexität durch die bessere Transparenz und Vergleichbarkeit der Produkte weniger gut in Preisqualität umsetzen.

Wir haben uns bei der redaktionellen Arbeit am Buch von drei Gedanken leiten lassen:

1. Komplexität sollte ganzheitlich verstanden werden, d. h., die wichtigsten Interdependenzen z. B. zwischen Strategie, Produktstruktur und Maßnahme werden erkennbar.
2. Die Produktkomplexität als originäre Ursache der Unternehmenskomplexität steht im Vordergrund unserer Maßnahmen und Tools.
3. Ein erprobter Werkzeugkasten zur konkreten Unterstützung der Praktiker und Berater war uns wichtiger als der wissenschaftliche Diskurs oder die theoretische Herleitung.

Die beigegefügte CD mit der Demo-Version von Complexity Manager[®] mit den Modulen F/V (Merkmals-/Variantenbaum) und C (Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung) sowie den Systemerläuterungen und weiterführender Literatur soll ein Übriges tun, um den Leser sofort bei der praktischen Lösungsfindung zu unterstützen.

Ursprünglich ging die Initiative zu dem Buch vom Carl Hanser Verlag aus, dem ich mit seinen verschiedenen Promotoren, insbesondere Herrn Martin Janik, für das Interesse, die Ausdauer und die gründliche Arbeit danken möchte.

Besonderer Dank gilt meinem Co-Autor Urs Schwenk, der die Elemente zusammengetragen und maßgeblich redigiert hat, sodass ein komplexes Ganzes entstehen konnte.

Großer Dank gebührt neben den Mitarbeitern des Benchmarking-Centers (TECTEM) am Institut für Technologiemanagement unter Leitung von Dr. Christian Bodmer auch dem Team der GPS Schuh & Co GmbH unter Leitung von Dr. Stephan Krumm, die nicht nur unermüdlich Erfahrung eingebracht und Methoden weiterentwickelt haben, sondern auch die Demo-CD zur Verfügung gestellt haben.

Ein Buch ist immer ein Stück von einem selbst, erst recht, wenn man Ideen aus vielen Jahren zusammenfasst. Es absorbiert nicht nur die Autoren, es beansprucht auch sehr stark deren Umfeld. Ich danke all jenen, die unter der Zusatzarbeit gelitten haben, für ihr Verständnis.

Günther Schuh

Mitverfasserverzeichnis

Gereon Bönsch, M. Sc.

ehemals Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Frederike Hellwig, M. Sc.

Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Robin Gerking, M. Sc.

Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Nikolai Kelbel, M. Sc.

ehemals Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Lennard Knobel, M. Sc.

Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Jonas Recker, M. Sc.

Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Timm Schulz-Isenbeck, M. Sc.

Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Dr.-Ing. Sven Schümmelfeder

ehemals Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

Felix Stein, M. Sc.

Lehrstuhl für Produktionssystematik, Werkzeugmaschinenlabor (WZL),
RWTH Aachen

**Teil A:
Grundlagen und
Strategien
des Managements
der Produkt-
komplexität**

1

Grundlagen des Managements der Produktkomplexität

Günther Schuh, Michael Riesener, Alexander Keuper

1.1 Aktuelle Entwicklungen des Komplexitätsmanagements

Für viele Unternehmen steht die Umsatzmaximierung noch immer an oberster Stelle der Zielhierarchie in der Unternehmensführung. Diese Zielsetzung ist jedoch zunehmend in einem Wettbewerbsumfeld zu verfolgen, das sich nicht nur durch fortschreitende Globalisierung und abnehmende Differenzierungspotenziale auszeichnet, sondern vor allem durch eine wachsende Zahl tiefgreifender technologischer, geopolitischer und ökologischer Diskontinuitäten. Gleichzeitig steigt durch stärkere Regularien und gesellschaftliche Erwartungen der Druck für Unternehmen, ökologisch nachhaltig zu handeln. In zahlreichen Branchen führt zudem der Eintritt neuer Wettbewerber sowie die Entstehung struktureller Überkapazitäten zu einer Verschärfung des Wettbewerbs. Die Marktmacht verschiebt sich damit weiter in Richtung der Kundenseite, begleitet von steigender Preissensitivität und verkürzten Innovationszyklen. Begegnet wird dieser Herausforderung mit der Proklamation der Kundenorientierung und -bindung als vielversprechendem Ansatz, um sich verringernde Gewinnmargen durch die Intensivierung bestehender Kundenbeziehungen zu kompensieren. Damit einher gehen die Ausweitung der Angebotsvielfalt in Randbereiche der Marktnachfrage und die Steigerung der Innovationsdynamik. Für die Geschäftssysteme der Unternehmen bedeutet dies, einer signifikanten Erhöhung der zeitlichen Abfolge von Produktinnovationen und der simultanen Varianz in den Produkt- und Leistungsspektren sowohl auf der Ebene der absatzfähigen Leistungen als auch auf der darunter liegenden Ebene der Leistungsrealisierung Rechnung zu tragen. Ausgelöst durch das Bestreben, erfolgreiche Produkte in neuen Märkten einzuführen, kann für viele Wirtschaftsbereiche der Trend einer vermehrt internationalen Ausrichtung der Unternehmensstrukturen – sowohl auf der Absatz- als auch auf der Ein-

kaufsseite – identifiziert werden.¹⁾ Obwohl einige Unternehmen zur Steigerung der Resilienz auf lokale Wertschöpfungsketten setzen, lässt sich über die Industrie hinweg weiterhin eine Zunahme der Globalisierung erkennen.²⁾ Auf Absatzseite führt diese Form der expansiven Unternehmenspolitik zu einer Konfrontation mit neuen Kundenanforderungen, da nur in den wenigsten Fällen davon ausgegangen werden kann, dass der Spezifität der zu besetzenden Märkte durch die bereits bestehenden Produkte und Vertriebskanäle vollumfänglich entsprochen werden kann. Durch die Auseinandersetzung mit hochdifferenzierten und vielfältigen Marktanforderungen wird die Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen in zunehmendem Maße mit Unsicherheit behaftet: Welche Marktsegmente versprechen Wachstum, auf welche Kundengruppen sollte sich das Unternehmen konzentrieren und mit welchen Innovationen der Wettbewerber muss sich das Unternehmen auseinandersetzen?

Die Erweiterung der Kundenbasis und die Zunahme der Leistungsvarianz führen in vielen Unternehmen – häufig unerkannt oder unterbewertet – zu einem Anstieg der Komplexität in allen Geschäftsprozessen.³⁾ Manifest dieser Komplexitätszunahme ist ein Kostenanstieg, vor allem in den indirekten Bereichen, der vielfach nicht erkannt und bei der Weiterentwicklung der Geschäftsmodelle unzureichend berücksichtigt wird. Durch die Interdependenz von Einzelentscheidungen wird die Bedeutung einer ganzheitlichen und kontinuierlichen Auseinandersetzung mit Fragen des strategischen Komplexitätsmanagements erhöht⁴⁾: Passt die Verlagerung von Fertigungs-Know-how zur forcierten Erweiterung des Produktsortiments? Passt die Kostensparmaßnahme Rüstzeiten durch größere Batches zu verringern zur Marktstrategie eines stärkeren Customizings? Kann einer Margenerosion durch die Fokussierung auf Kernprodukte begegnet werden? Mit der Beantwortung dieser Fragen wird die bewusste Gestaltung und Beherrschung von Komplexität in zukünftigen Geschäftsmodellen zur Kernaufgabe des Managements und zum größten Stellhebel für die Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit insbesondere der europäischen Industrie. Komplexität wird damit zunehmend zur Chefsache.⁵⁾

Durch die beschriebenen Herausforderungen der Globalisierung, steigender Variantenvielfalt, kürzerer Produktlebenszyklen und wachsender Komplexität von Produkten und Prozessen steigen die Anforderungen an die heutige und zukünftige Produktentstehung.⁶⁾ Entsprechend gewinnen das Beziehungsgeflecht zwischen Herstellern, Lieferanten und Kunden sowie Time-to-Market-Ziele eine immer größere Bedeutung für die Gestaltung der Produktentwicklung.⁷⁾ Als Komplexitätstreiber werden in diesem Zusammenhang beispielsweise Funktionserweiterungen an Produkten, Varianten, Systemintegrationen,

¹⁾ Vgl. Schuh 2017

²⁾ Vgl. Kolev-Schäfer 2023

³⁾ Vgl. Schuh et al. 2024a

⁴⁾ Vgl. Neubaur 2003

⁵⁾ Vgl. Schuh et al. 2013a

⁶⁾ Vgl. Keuper 2024

⁷⁾ Vgl. Brylowski et al. 2019

globale und lokale Prozesse und Ressourcen, Supply Chains etc. genannt.⁸⁾ Die vom Markt geforderte Produkt- und Prozesskomplexität muss so beantwortet werden, dass zugleich die innere Komplexität reduziert wird, beispielsweise durch variantengerechte Produktgestaltung oder Verlagerung der Varianz auf Software.⁹⁾

Die Ursachen einer überzogenen Geschäftskomplexität im Unternehmen können in den meisten Fällen nicht lokalisiert werden. Vielmehr ist es gerade das oftmals mangelhaft koordinierte Zusammenspiel der verschiedenen Unternehmensbereiche und Entscheidungsträger, das zu einem unkontrollierten Anstieg der Produktvarianten während des gesamten Lebenszyklus und damit einhergehend zu schwer zu beherrschenden Unternehmensprozessen führt. Der Verkauf – vielfach getrieben durch eine ausschließlich am Umsatz bemessene Provision – verlangt nach neuen Produkten oder Dienstleistungen, damit verloren gegangene Marktanteile zurückgewonnen und strategisch bedeutsame Kunden gebunden werden können. In Forschung und Entwicklung werden innovative technologische Möglichkeiten oder Kostensenkungsziele dazu verwendet, die Entstehung zusätzlicher Unternehmensleistungen zu rechtfertigen oder auf Baugruppenebene eine erhöhte Vielfalt in Kauf zu nehmen. Die Unternehmensleitung hingegen tut sich schwer, die im Zuge der Firmenakquisition übernommenen Produktlinien des einstigen Konkurrenten auf ihre Überschneidungen mit dem bestehenden eigenen Leistungsprogramm zu überprüfen und weitreichende Beschränkungen des Leistungsspektrums zu verantworten. Die erste Herausforderung des Komplexitätsmanagements besteht somit darin, die Entscheidungsträger im Unternehmen abteilungsübergreifend zu einer einheitlichen Vorgehensweise anzuhalten.

Dem Kunden ein umfangreiches Produktsortiment anbieten zu können oder aber auf Kundenwünsche durch Bauoptionen und maßgeschneiderte Dienstleistungspakete reagieren zu können, birgt ohne jeden Zweifel Vorteile. Doch es sind auch Grenzen zu erkennen. Zum einen sind sie in der Intransparenz des Produktsortiments begründet, die durch die Varianz hervorgerufen werden kann, wenn Überschneidungen zu starken Kannibalisierungseffekten führen oder aber Leistungsmerkmale einer Maschine nicht mehr vermittelt werden können. Zum anderen verursacht ein umfangreiches Produktsortiment Abstimmungsaufwand: Über welchen Vertriebskanal soll ein Produkt verkauft und vermarktet werden? Wie beeinflussen Ausstattungsoptionen die Profitabilität einzelner Produkte und damit die Preisfindung? Oder aber wie umfangreich sind die Anpassungen der Stücklisten, die im Auftragsfall notwendig werden?

Die Herausforderung des Komplexitätsmanagements ist es darüber hinaus, den Bereich der optimalen Leistungsvarianz zu erkennen und für dessen Einhaltung zu sorgen. Neben der Ausrichtung des Unternehmens an der Schnittstelle zwischen Marktanforderungen und Leistungsprogramm verbleibt eine weitere Aufgabe des Komplexitätsmanagements in der Optimierung des internen Wertstromdesigns und dem Finden einer optimalen Struktur (vgl. Bild 1.1) Zielrichtung ist es dabei, nicht-wertschöpfende Kom-

⁸ Vgl. Schuh et al. 2024a sowie Schuh et al. 2025b

⁹ Vgl. Anderl et al. 2012, S. 13 f.

plexität zu vermeiden und nur in den Bereichen das Leistungsangebot zu erhöhen, in denen Kunden bereit sind, die vollen Kosten für die Varianz zu bezahlen. Komplexitätsmanagement ist eine Querschnittsfunktion, die auf strategisch bedeutsame Fragestellungen in Bezug auf die externe und interne Leistungsvarianz Antworten zu geben versucht und die bislang in vielen Unternehmen stiefmütterlich behandelt wird.

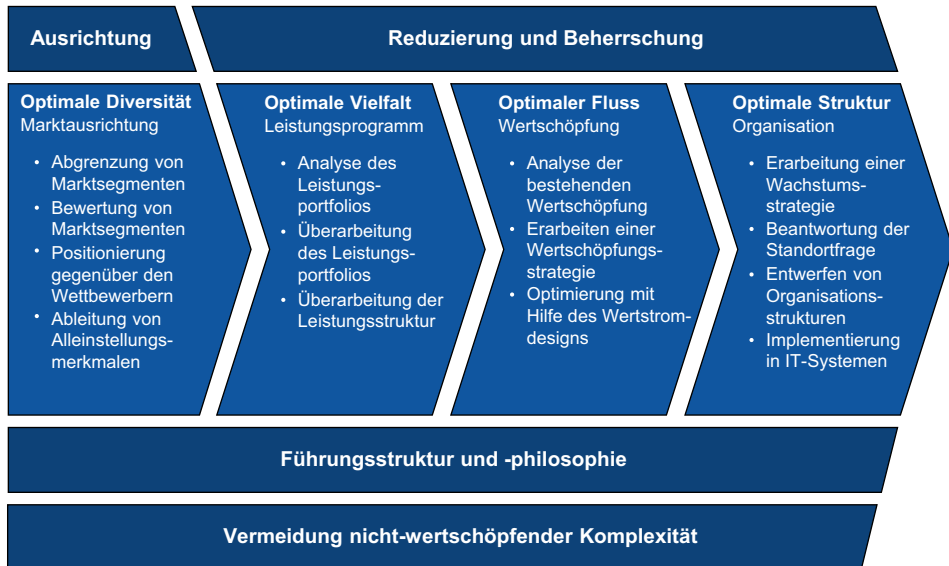


Bild 1.1 Ausrichtung und Beherrschung von Leistungsvarianz

Neben der Zunahme der Produkt- und Variantenvielfalt aus marktseitigen Gründen und aus internen Optimierungsgründen resultiert der deutliche Anstieg der Produktkomplexität aktuell auch aus der ständigen Zunahme elektronischer Komponenten und der zugehörigen Embedded Software (Mechatronik).¹⁰⁾ Im Kontext cyber-physischer Systeme wird die Software in den kommenden Jahren zum einen eine Vielzahl von weiteren Funktionen ermöglichen (Steigerung der Funktionskomplexität der Produkte), zum anderen aber auch Varianz aus der Hardware in den Software-Bereich verschieben (Verringerung der Entwicklungs- und Fertigungskomplexität).¹¹⁾ Daher ist auch das Komplexitätsmanagement zunehmend vor diesem Hintergrund zu betrachten.¹²⁾ Die Verknüpfung von physischen und informationsverarbeitenden, virtuellen Objekten führt dazu, dass cyber-physische Systeme eine bedeutend höhere Komplexität aufweisen als rein physische Produkte.¹³⁾ Die traditionellen Komplexitätstreiber

¹⁰⁾ Vgl. Eigner et al. 2014, S. 2

¹¹⁾ Vgl. Eigner et al. 2014, S. 2

¹²⁾ Vgl. Riesener et al. 2022

¹³⁾ Vgl. Keuper et al. 2020

wie beispielsweise Sortimentsbreite und Erzeugniskomplexität werden durch zusätzliche Merkmale erweitert. Die Zusammensetzung solcher cyber-physischen Systeme überschreitet Grenzen unterschiedlicher Technologien, Ingenieurdisziplinen und verschiedener Organisations- und Vernetzungsformen.¹⁴⁾

Neben den Veränderungen von Markt, Kunde und Geschäftsmodell, Verschiebungen in den Wertschöpfungsketten und der Tendenz zu Produkten, die stärker mechatronisch oder cyber-physisch geprägt sind, gibt es zwei weitere wichtige Themen, die die Industrie prägen. Einerseits hat spätestens seit der großflächigen Verbreitung von Sprachmodellen das Thema künstliche Intelligenz auf der strategischen Agenda vieler Unternehmen Einzug gefunden. Andererseits sind die Bestrebungen nach ökologischer Nachhaltigkeit und nach der Transformation zur Kreislaufwirtschaft politisch und gesellschaftlich im Fokus und finden in der produzierenden Industrie Beachtung. Auf beide Themen wird in Abschnitt 1.1.1 und Abschnitt 1.1.2 genauer eingegangen.

Die aktuellen Entwicklungen des Komplexitätsmanagements, die in diesem Abschnitt sowie Abschnitt 1.1.1 und Abschnitt 1.1.2 vorgestellt werden, bilden schließlich die Grundlage für die Ausführungen zum Management der Produktkomplexität in diesem Buch.

1.1.1 Auswirkungen durch die Weiterentwicklung künstlicher Intelligenz

Neben den bereits beschriebenen Komplexitätstreibern verändert insbesondere die rasante Weiterentwicklung künstlicher Intelligenz die Rahmenbedingungen des Managements von Produktkomplexität grundlegend. Die Innovations- und Entwicklungsabteilungen produzierender Unternehmen stehen heute vor der doppelten Herausforderung, in einem hochvolatilen Umfeld schneller entwickeln zu müssen, bei gleichzeitig knapper werdenden Ressourcen. Zugleich steigt die technische Produktkomplexität durch die zunehmende Integration mechanischer, elektrischer und softwarebasierter Komponenten kontinuierlich an. Vor diesem Hintergrund wird der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) in Entwicklungsprozessen zunehmend unabdingbar. KI wirkt dabei in doppelter Weise: einerseits als zusätzlicher Komplexitätstreiber, andererseits als neuer Beherrschungshebel im Umgang mit steigender Varianz und Unsicherheit.

KI fungiert als neuer *Komplexitätstreiber* cyber-physischer Produkte, da Produkte zunehmend nicht mehr allein durch Konstruktion, sondern durch datenbasierte Modelle entstehen. Intelligente und durch KI unterstützte Software ist Kernbestandteil vieler moderner technischer Produkte. Damit verschiebt sich die Produktkomplexität zunehmend in dynamische, softwaregetriebene Funktionsräume: Varianten werden nicht mehr ausschließlich physisch gestaltet, sondern entstehen durch digitale Konfigurationen, lernende Algorithmen und Plattformökosysteme.

¹⁴ Vgl. Keuper et al. 2020

Gleichzeitig eröffnet KI neue Potenziale, um Komplexität systematisch zu bewältigen, und dient somit als *Hebel zur Beherrschung steigender Entwicklungs- und Prozesskomplexität*. Eine Studie der RWTH Aachen und der Complexity Management Academy zeigt, dass KI-Anwendungen entlang des gesamten Entwicklungsprozesses von der Ideenfindung über die Validierung bis zur Industrialisierung eingesetzt werden können, um datenbasierte Entscheidungen zu unterstützen, Prozesse zu automatisieren und Time-to-Market signifikant zu reduzieren.¹⁵ Der industrielle Nutzen liegt damit nicht allein in technologischer Innovation, sondern zunehmend auch in einer neuen Qualität von Entwicklungssteuerung: KI ermöglicht es, hochkomplexe Zusammenhänge zu erkennen, die mit klassischen Methoden nicht mehr beherrschbar sind (vgl. Bild 1.2).

Ein zentrales Ergebnis der bereits genannten Studie sind Erfolgsfaktoren für den Einsatz von KI im Bereich der Produktentwicklung und des Komplexitätsmanagements. Erfolgreiche Unternehmen integrieren KI systematisch in die Geschäfts- und Entwicklungsstrategie. So ist bei 77 % der Top-Performer der Studie die KI-Strategie Teil der übergeordneten Unternehmensstrategie, wohingegen es bei den Followern der Studie lediglich 20 % sind. Für die erfolgreiche Integration von KI in Entwicklungsprozessen ist auch die organisatorische Verankerung entscheidend. Besonders wirksam ist dabei ein Hub-and-Spoke-Modell, bei dem KI-Kompetenzen zentral gebündelt, aber dezentral in den Fachbereichen angewendet werden. KI wird damit nicht zur Aufgabe eines einzelnen Data-Science-Teams, sondern zu einer Querschnittsfunktion zwischen Engineering, IT und Produktmanagement. Ein weiterer zentraler Befund der Studie betrifft die technologische Grundlage: KI entfaltet ihren Nutzen nur dort, wo Daten systematisch verfügbar, vernetzt und qualitätsgesichert sind. Top Performer investieren daher in Cloud-basierte Datenplattformen und verknüpfen Produktstammdaten mit Nutzungs-, Service- und IoT-Daten. Knowledge-Graphen werden dabei als Instrument zur Domänenintegration genannt. Damit verschiebt sich Komplexitätsmanagement zunehmend von der reinen Variantensteuerung hin zur Steuerung datenbasierter Produktlebenszyklen in umfangreichen Produkt-Service-Systemen.¹⁶

Die Konsequenz für das Management von Produktkomplexität aus der zunehmenden Integration von künstlicher Intelligenz stellt sich wie folgt dar:

- Produkte werden lernfähig und updatebar.
- Entwicklungsprozesse werden datengetrieben orchestriert.
- Komplexität entsteht stärker in Software, Modellen und Ökosystemen.
- Die Beherrschung erfolgt nicht mehr nur durch Reduktion, sondern durch intelligente Steuerung.

Komplexitätsmanagement entwickelt sich damit von einer strukturellen Aufgabe der Portfolio-Begrenzung zunehmend zu einer dynamischen Aufgabe der System-Orchestrierung.

¹⁵ Vgl. Schuh et al. 2025a

¹⁶ Vgl. Schuh et al. 2025a

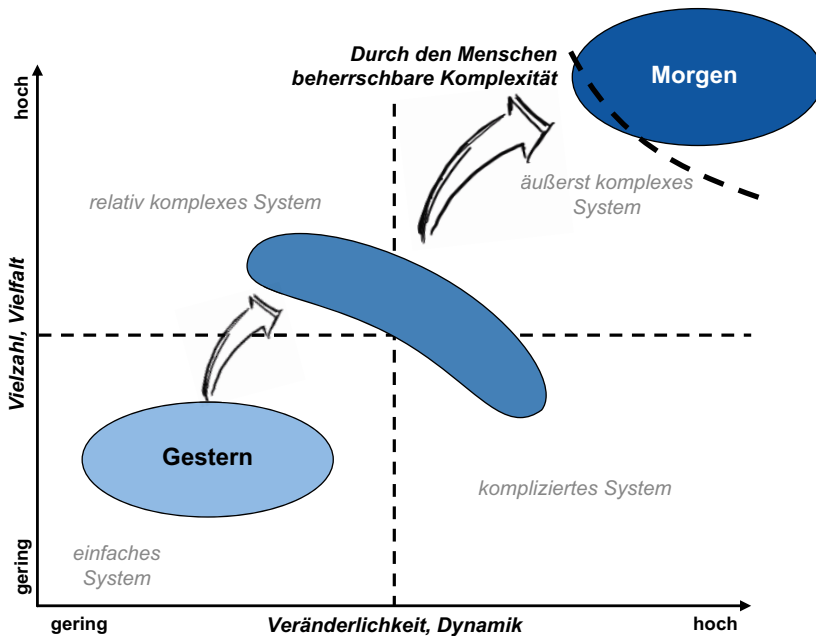


Bild 1.2 Potenzial von KI zur Komplexitätsbeherrschung in äußerst komplexen Systemen

1.1.2 Veränderungen im Komplexitätsmanagement durch Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Eine zweite fundamentale Entwicklung für das Management von Produktkomplexität ergibt sich aus der wachsenden Bedeutung von Nachhaltigkeit, regulatorischer Anforderungen sowie der Transformation industrieller Wertschöpfungs-systeme in Richtung Kreislaufwirtschaft. Globale Herausforderungen wie Klimawandel, Ressourcenknappheit und geopolitische Unsicherheiten führen dazu, dass Nachhaltigkeit zunehmend zur zentralen Direktive unternehmerischer Strategien wird. Eine lineare Form der Wertschöpfung, in der Produkte nach einer Nutzungsphase dem End-of-Life zugeführt werden, ist langfristig nicht mehr tragfähig. Während Komplexitätsmanagement traditionell vor allem auf die effiziente Beherrschung wachsender Produkt- und Prozessvarianz im Rahmen linearer Lebenszyklen ausgerichtet war, entstehen durch Circular Economy neue, lebenszyklusübergreifende Komplexitätsdimensionen. Nachhaltigkeit wird damit nicht nur zu einem zusätzlichen Zielkriterium, sondern zu einem strukturellen Paradigmenwechsel für die Gestaltung von Produkten, Prozessen und Geschäftsmodellen. Die produzierende Industrie sieht sich zunehmend mit der Anforderung konfrontiert, neben Qualität (Q), Zeit (Z) und Kosten (K) eine vierte Dimension in der Produktentstehung systematisch zu integrieren: Nachhaltigkeit (N). Damit wird aus dem klassischen magischen Dreieck ein erweitertes Steuerungsviereck Q-Z-K-N. Dies verändert die Zielsetzung des Komplexitätsmanagements grundlegend: Nicht mehr allein die Beherrschung

interner Varianz steht im Mittelpunkt, sondern die Fähigkeit, ökologische und ökonomische Wirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu orchestrieren.¹⁷⁾

Schuh et al. argumentieren in diesem Kontext mit dem Ansatz einer Upgrade Circular Economy, die deutlich über klassisches Recycling hinausgeht. Kreislaufwirtschaft wird nicht als „Rückführung zum Material“, sondern als gezielte funktionale und wirtschaftliche Wiederaufwertung verstanden. So können durch den Austausch von lediglich 10–30 % der Komponenten Produkte nahezu Neuwert erreichen und gleichzeitig bis zu 50 % Ressourcen und Emissionen gegenüber Neuprodukten einsparen. Damit wird die sogenannte Upgrade Circular Economy zu einem strategischen Wettbewerbsvorteil: Unternehmen, die ihre Produkte zurückerhalten und industriell aufbereiten können sparen Material- und Wertschöpfungskosten und machen sich unabhängiger von Rohstoffen und Zulieferern. Ein besonders tiefgreifender Wandel betrifft die Produktarchitektur selbst. Modularisierung dient künftig nicht mehr primär der Realisierung von Skaleneffekten, sondern wird zum zentralen Befähiger für zirkuläre Produkte. Modulare Architekturen müssen dabei grundlegend neu gedacht werden, um Austauschbarkeit, Upgradefähigkeit und Re-X-Strategien über mehrere Lebenszyklen hinweg zu ermöglichen (siehe auch Kapitel 7).¹⁸⁾



Als *Upgrade Circular Economy* (dt. wertsteigernde Kreislaufwirtschaft) wird ein Konzept verstanden, bei dem Produkte durch gezielte technische Upgrades und modulare Erneuerung über mehrere Lebenszyklen hinweg funktional aufgewertet werden. Konstituierendes Merkmal ist dabei das Upgrade, welches es ein zurückgeführtes Produkt so aufwertet, dass es wettbewerbsfähig mit aktuellen Neuprodukten ist und den eigenen Wert dabei über den ursprünglichen Wert hinaus steigert.

Mit der Transformation zur Upgrade Circular Economy entstehen jedoch neue Formen der Komplexität, die sich fundamental von klassischen Problemen des Komplexitätsmanagements unterscheiden. Während im linearen Geschäft bekannte Stücklisten, stabile Produktgenerationen und definierte Lieferketten dominieren, erzeugen zirkuläre Systeme Unsicherheit:

- Zustand zurückgeführter Produkte
- über den Zeitverlauf unterschiedliche und veränderliche Konfigurationen durch Rekonfiguration im Re-Assembly-Prozess
- Mehrfachnutzung von Komponenten in unterschiedlichen Kontexten
- neue Partnernetzwerke im zirkulären Ökosystem

Für das Komplexitätsmanagement bedeutet dies eine erhebliche Erweiterung: Komplexität entsteht nicht mehr nur durch externe Marktvarianz, sondern durch die Not-

¹⁷⁾ Vgl. Schuh et al. 2025c sowie Schuh et al. 2024b

¹⁸⁾ Vgl. Schuh et al. 2023a sowie Schuh et al. 2023b

wendigkeit, zirkuläre Systeme zu gestalten, in denen Produkte mehrfach zirkulieren und Wert über mehrere Nutzungszyklen hinweg erhalten bleibt.

1.2 Grundlagen der Produktkomplexität

Wie in Abschnitt 1.1 dargestellt wurde, führen aktuelle Entwicklungen und die Kräfte, die im Umfeld der Unternehmen wirken, dazu, dass produzierende Unternehmen mit einem Anstieg der Komplexität in Produkt und Unternehmen konfrontiert sind. Auch der Blick in die unternehmerische Praxis bestätigt, dass die wahrgenommene Komplexität durch die Mitarbeitenden der Unternehmen stetig steigt. Dieser Komplexitätsanstieg lässt sich auf vier grundlegende Effekte zurückführen. In der Kombination und Überlagerung dieser Effekte entsteht eine rasant steigende Gesamtkomplexität:

1. Als Erstes ist der Effekt der gestiegenen *Funktionskomplexität* zu nennen. Die Funktionskomplexität beschreibt die zunehmende Erweiterung des funktionalen Leistungsumfangs moderner Produkte. Insbesondere durch Digitalisierung, Softwareintegration und intelligente Assistenzfunktionen steigt die Zahl funktionaler Abhängigkeiten innerhalb technischer Systeme. Damit wächst nicht nur die Produktfunktionalität, sondern auch die Kopplung zwischen Subsystemen – was die Robustheit, Validierung und Beherrschbarkeit erheblich erschwert.
2. Außerdem ist der Effekt der gestiegenen *Programmkomplexität* zu beobachten. Programmkomplexität entsteht durch die Ausweitung des Produktportfolios und die Zunahme von Varianten, Optionen und Derivaten. Was marktseitig als Kundenorientierung erscheint, führt intern häufig zu einem disproportionalen Anstieg von Entwicklungs-, Planungs- und Prozessaufwand. Die Vielzahl paralleler Produkte erhöht die Koordinationslast und erzeugt Intransparenz über Profitabilität und strategische Relevanz einzelner Varianten.
3. Darüber hinaus ist der Effekt der gestiegenen *Netzwerkkomplexität* aufzuführen. Netzwerkkomplexität resultiert aus der zunehmenden internationalen Verflechtung von Lieferketten, Produktionsnetzwerken und Distributionssystemen. Die Anzahl von Partnern, Schnittstellen und Interdependenzen nimmt zu, wodurch Störungen, Informationsasymmetrien und Koordinationsaufwand exponentiell wachsen können. Produkte werden nicht mehr isoliert hergestellt, sondern in hochgradig vernetzten Ökosystemen orchestriert.
4. Abschließend ist der Effekt der gestiegenen *Nachhaltigkeitskomplexität* zu nennen. Nachhaltigkeitskomplexität entsteht durch neue regulatorische Berichtspflichten (z. B. ESG/CSRD), zusätzliche Nachhaltigkeitskennzahlen sowie die Integration zirkulärer Wertschöpfungssysteme. Unternehmen müssen nicht nur Produkte entwickeln, sondern deren Materialflüsse, Emissionen und Rückführungsprozesse über

den gesamten Lebenszyklus hinweg dokumentieren und steuern. Zudem erzeugen wiederaufbereitete Produkte im Feld zusätzliche Varianz in den jeweiligen Konfigurationen entlang der Zeitachse.

Die Produktkomplexität lässt sich dabei prinzipiell von zwei Seiten aus betrachten: die externe und interne Produktkomplexität. Während auf der externen Seite unterschiedliche Kundenanforderungen in immer kleineren Marktsegmenten bei einem steigenden Kostendruck aufgrund von internationalen Wettbewerbern durch das Angebot eines Unternehmens abgedeckt werden wollen, erschweren Kostenoptimierungsprojekte, der Wechsel von Zulieferern oder global verteilte Produktionsstandorte eine Reduzierung der internen Vielfalt. Die externe und interne Produktkomplexität muss erkannt, aufeinander abgestimmt und schließlich beherrscht werden, um die möglichen Potenziale zu erschließen.

1.2.1 Komplexe Systeme

Die vier zu adressierenden Effekte suggerieren zahlreichen Unternehmen ein unterschiedliches Verständnis von Komplexität. Daher ist die Festlegung eines einheitlichen Begriffsverständnisses notwendig. Einen möglichen Ansatz hierfür bietet die Definition von Komplexität nach *Ulrich* und *Probst*. *Ulrich* und *Probst* verstehen unter Komplexität eine Systemeigenschaft, deren Grad von der Anzahl der Systemelemente, von der Vielzahl der Beziehungen zwischen diesen Elementen sowie der Anzahl möglicher Systemzustände abhängt.¹⁹⁾ *Ulrich* versteht Komplexität vielmehr als die Eigenschaft von Systemen, in einer gegebenen Zeitspanne eine große Anzahl von verschiedenen respektive „ungeheuer viele Zustände“²⁰⁾ annehmen zu können (oder zu müssen), was deren geistige Erfassung und Beherrschbarkeit durch den Menschen erschwert.²¹⁾

In der Literatur werden die Begriffe *Komplexität*, *Varietät* und *Variantenvielfalt* oft synonym verwendet. Im Folgenden soll daher versucht werden, diese Begriffe zu präzisieren. Bezeichnet die *Komplexität*²²⁾ (lat. *complexus*: zusammengeknüpft, verwoben, vernetzt) eine Eigenschaft des Systems, ist die Vielfalt (engl. *variety*) die dazugehörige Maßeinheit.²³⁾ Dabei wird versucht, die Varietät eines komplexen Systems mithilfe kombinatorischer Überlegungen zu ermitteln.²⁴⁾ Aufgrund der Tatsache, dass schon Systeme mit sehr wenig Elementen und Beziehungen eine sehr hohe Varietät erreichen, stellt sich jedoch die Frage der Aussagekraft der Varietät als Maßzahl für komplexe Systeme.²⁵⁾

¹⁹⁾ Vgl. Ulrich/Probst 1988, S. 58, sowie Reiss 1993a, S. 55

²⁰⁾ Vgl. Malik 2002, S. 186

²¹⁾ Vgl. Ulrich 1970 in Bleicher 2004, S. 55

²²⁾ Vgl. Stüttgen 1999, S. 18 ff.

²³⁾ Vgl. Espejo et al. 1996, S. 60

²⁴⁾ Vgl. Beer 1979, S. 37 f.

²⁵⁾ Vgl. Grossmann 1992, S. 25

Überlegungen zur Varietät eines Systems gewinnen vor allem im Zusammenhang mit den für die Lenkung von Systemen wichtigen *Varietätsgesetzen*²⁶⁾ an Bedeutung.²⁷⁾ Diese Gesetze besagen (ohne auf eine absolute Maßzahl für Varietät einzugehen), dass ein System ein anderes nur lenken kann, wenn seine Varietät (Varietät des Managements oder der Organisation) ebenso groß ist wie jene des zu lenkenden Systems (Varietät der Situation oder der Umwelt). Organisationen müssen sich daher bewusst mit der Komplexität ihrer Unternehmen und der Umwelt sowie dem Fit zwischen interner und externer Komplexität beschäftigen.

Die Zusammensetzung eines Systems wird bestimmt durch *Anzahl und Verschiedenheit der Elemente und Beziehungen*, die in diesem System vorkommen. Zudem hängt die Komplexität von der *Veränderlichkeit im Zeitablauf* ab, die sich ihrerseits durch Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente und durch die Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen Elementen ausdrückt. Bei dem Versuch, den Komplexitätsbegriff zu operationalisieren und damit einer Messung zugänglich zu machen, wird erkennbar, dass dieser nur anhand von mehreren Komplexitätsfaktoren zu erfassen ist. Hierbei handelt es sich um Größen, die untereinander abhängig sind, ohne dass sich einer der Faktoren vollkommen auf einen anderen reduzieren lässt. Reiss unterscheidet die vier Faktoren „Vielzahl“, „Vielfalt“, „Vieldeutigkeit“ und „Veränderlichkeit“, die sich zu den Komplexitätstreibern „Masse“ bzw. „Dynamik“ zusammenfassen lassen.²⁸⁾ Somit wird das Komplexitätsproblem in eine statische bzw. dynamische Komponente aufgetrennt, was für die Verständlichkeit und Bewältigung des Systems Unternehmen hilfreich erscheint. Werden diese beiden Hauptkriterien (Art der Zusammensetzung sowie Veränderlichkeit im Zeitablauf) in einer Matrix dargestellt (vgl. Bild 1.3) und werden die Ausprägungen der beiden Dimensionen mit Veränderlichkeit/Dynamik und Vielzahl/Vielfalt festgelegt, so lassen sich vier grundsätzliche Systemtypen unterscheiden:

- *einfache Systeme* (wenige Elemente, Beziehungen und Verhaltensmöglichkeiten)
- *komplizierte Systeme* (viele Elemente und Beziehungen; Verhalten ist deterministisch)
- *relativ komplexe Systeme* (wenige Elemente und Beziehungen; hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten; keine vollständige Beherrschbarkeit möglich)
- *äußerst komplexe Systeme* (Vielzahl von Elementen mit vielfältigsten Beziehungen; große Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten mit veränderlichen Wirkungsverläufen zwischen den Elementen)²⁹⁾

²⁶⁾ Vgl. Ashby 1964, S. 206 f., sowie Espejo et al. 1996, S. 62

²⁷⁾ Vgl. Grossmann 1992, S. 26

²⁸⁾ Vgl. Reiss 1993a, S. 57

²⁹⁾ Vgl. Grossmann 1992, S. 18 f.

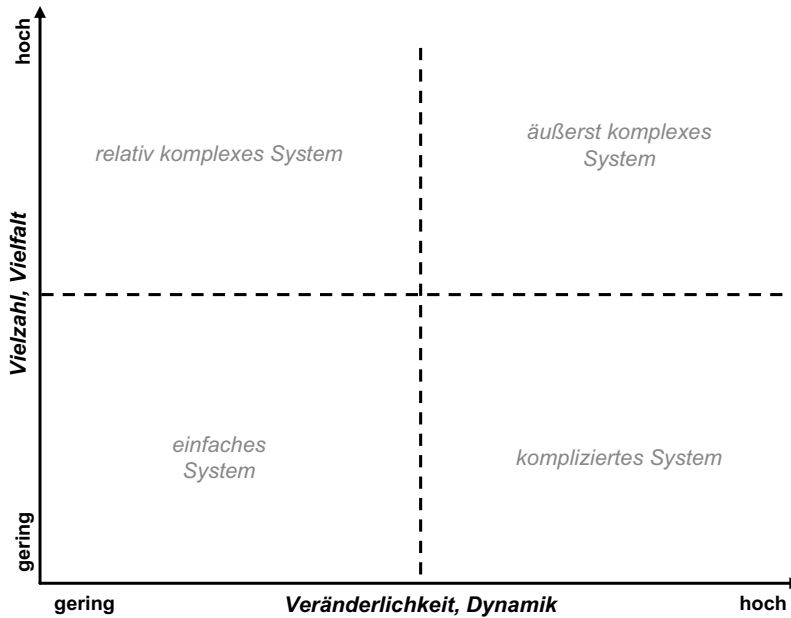


Bild 1.3 Zustände komplexer Systeme

Komplexität besagt eigentlich zweierlei: Zum einen wird damit ein System bezeichnet, in dem nicht mehr alle Elemente miteinander verknüpft werden können, und zum anderen wird damit Unbestimmtheit und Unvorhersehbarkeit gemeint. Es ist nicht ausreichend bekannt, was passieren wird, und es existieren zu viele Möglichkeiten. Die Antwort auf Unbestimmtheit ist Entscheidung. Unternehmen als komplexe Systeme stehen unter Entscheidungszwang. Sie müssen wählen und das Überangebot an Möglichkeiten auf ein bearbeitbares Maß reduzieren.

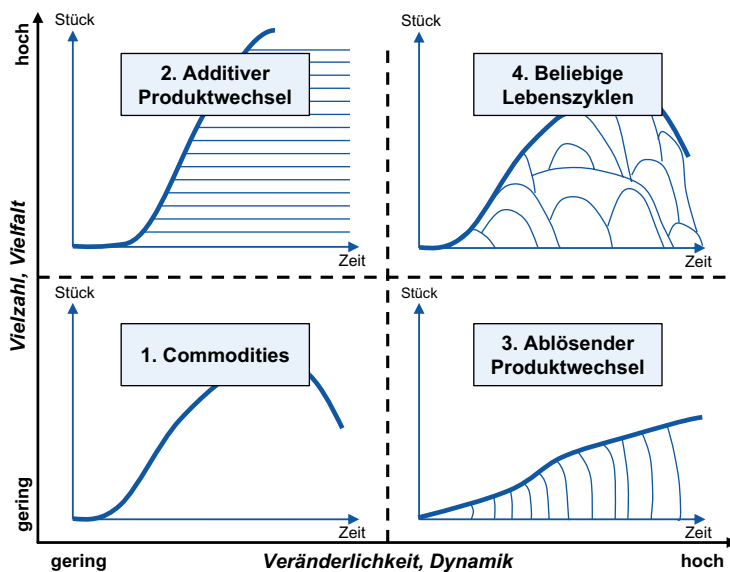
Die *zunehmende Marktorientierung* hat neben der steigenden Anzahl von Produkten bzw. Komponenten auch zu einer zunehmenden Dynamisierung geführt. *Dynamik* äußert sich einmal in kontinuierlichen Wachstums- bzw. Schrumpfungsmustern. Sie zeigt sich im Unternehmen insbesondere durch die *Veränderlichkeit* und *Vieldeutigkeit* im Produktprogramm.

Mit der *Vieldeutigkeit* wird die Schwierigkeit bezeichnet, sich ein klares Bild vom betreffenden System zu machen. Verantwortlich für derartige Unbestimmtheiten, Unsicherheiten und Risiken sind meist Defizite im Wissen über das System. Vieldeutige Relationen zeichnen sich durch Unschärfe aus. Unschärfe Zuordnungsrelationen zwischen Kostenträgern einerseits und den in Anspruch genommenen Ressourcen andererseits entstehen durch Ressourcen-Pooling und provozieren das heikle Gemeinkostenproblem. Die *Veränderlichkeit* gibt das komplexe Zeitverhalten von vieldeutigen Systemen wieder. Damit wird die Frage abgeklärt, wie sich das in

der Vieldeutigkeit implizierte Veränderungspotenzial konkret im Zeitablauf aktualisiert.³⁰⁾

Sanderson und Uzumeri unterscheiden in diesem Zusammenhang vier Arten von Produktwechsel (vgl. Bild 1.4):³¹⁾

- einfache Güter (*Commodities*) für die keine Alternative besteht oder der Kunde kein Substitutionsprodukt akzeptiert
- *varianten-intensive Produkte*, bei welchen ein additiver Produktwechsel stattfindet, d. h., „alte“ Produkte werden nicht aus dem Markt genommen
- *wechsel-intensive Produkte*, bei welchen die Unternehmen versuchen, durch die hohe Innovationsrate den Technologiefortschritt zu meistern und gleichzeitig die Produktvielfalt tief zu halten
- Güter in einem „dynamisch-turbulenten“ Marktumfeld, die aufgrund der Technologieentwicklung allgemeiner Marktveränderung losgelöst von jeglicher Systematik beliebige Lebenszyklen beschreiben



Legende

— Lebenszyklus Produktfamilie — Lebenszyklus Produktvariante

Bild 1.4 Formen des Produktwechsels

³⁰⁾ Vgl. Reiss 1993a, S. 59

³¹⁾ Vgl. Sanderson/Uzumeri 1997, S. 4 ff.

Komplexität tritt bei *produzierenden Unternehmen* besonders deutlich zutage. Die Wettbewerbsbedingungen von Produktionsunternehmen werden durch zwei Spezifika geprägt. Einerseits sind produktionsorientierte Managementkonzepte an die Starrheit oder Kontinuität des Systems Produktion gebunden. Große Vorleistungen im Sinne von Forschungs- und Entwicklungsaufwänden, Investitionen in kapitalintensive Betriebsmittel sowie der Aufbau (technologischer) Kernkompetenzen erfordern einen zunehmenden Vorlauf in zeitlicher und finanzieller Hinsicht. Demgegenüber nimmt die Dynamik des Marktes zu. Die am Markt angebotenen Leistungen und Produkte müssen immer schneller verändert und angepasst werden, was prinzipiell der vorangehend genannten Starrheit oder Kontinuität des Systems Produktion zuwiderläuft (vgl. Bild 1.5). Daraus ergeben sich vielfältige, wenig voraussagbare, ungewisse Verhaltensmöglichkeiten.

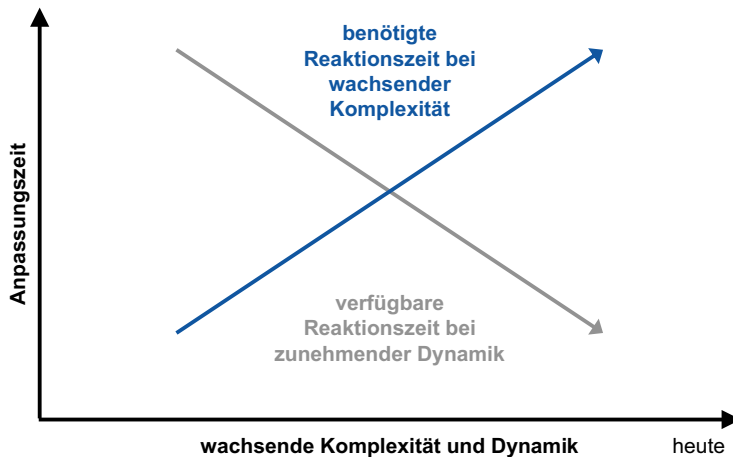


Bild 1.5 Zeitschere zwischen benötigter und verfügbarer Reaktionszeit

Diese Eigenschaft steht dem einfachen *Ursache-Wirkung-Denken* entgegen, das dem Bestreben vieler Manager bei ihrem zweckgerichteten Denken und Handeln zugrunde liegt: der Annahme, dass eine bestimmte Maßnahme auch mit Sicherheit zu einem bestimmten Ergebnis führen werde. Häufig wird versucht, Komplexität im sozialen System dadurch zu beherrschen, dass eine Reduktion wahrnehmbarer Komplexität auf ein für den Mitarbeiter tragbares Maß angestrebt wird. Damit entsteht lediglich eine interne Reduktion der von der Umwelt induzierten Komplexität. Das System selbst wird im Inneren jedoch aufgrund von zusätzlichen koordinativen Tätigkeiten zunehmend komplexer. Erkennbar ist dies unter anderem an der Vielzahl der Abstimmungen zwischen den für die Abbildung der Komplexität zuständigen Abteilungen, wie Vertrieb, Produktmanagement, Entwicklung und Produktion.

Dieses Buch legt den Fokus nicht auf die Beherrschung von Komplexität im Allgemeinen, sondern auf das Management von Produktkomplexität im Speziellen. Die relevanten Begriffe im Kontext der Produktkomplexität werden in den nachfolgenden Abschnitten definiert.

1.2.2 Komplexitätsmanagement, Variantenmanagement und Produktkomplexität

Management im Kontext der Komplexität ist in erster Linie als Komplexitätsbewältigung zu verstehen, was zur Wortverbindung „Komplexitätsmanagement“ führt.³²⁾ Abgesehen von der theoretischen Herleitung des Begriffs Komplexitätsmanagement werden in der Literatur die damit verbundene Tätigkeit bzw. die verbundenen Aktivitätsfelder beschrieben. Im Vordergrund steht dabei die Vermeidung von Komplexität im Sinne eines antizipativen Managements, darüber hinaus die reaktive Beeinflussung des Komplexitätsgrades durch die systematische Reduktion von Komplexität und, wenn ein bestimmter Grad an Komplexität unvermeidbar ist, die möglichst wirtschaftliche Beherrschung von Komplexität.³³⁾ Zu bewerkstelligen ist dies im weitesten Sinne mittels Strukturgestaltung unter Verwendung von Komplexitätsmaßen. Dies betrifft insbesondere Produkt-, Produktions-, Logistik-, Dispositions-, Organisations- und Personalstrukturen. Kernelemente des Komplexitätsmanagements bilden die Modellierung der betrieblichen Strukturen sowie die Diagnose der Strukturkomplexität, Stabilität und Anpassungsfähigkeit. Die Blickrichtung der Analyse sollte insbesondere auf die Vielfaltproblematik in vernetzten Strukturen gerichtet sein. In diesem Zusammenhang wird auf den Vielfaltstreiber Markt sowie die damit verbundene Vielfalt an Kundenanforderungen, die sich in den Produktstrukturvarianten spiegeln, hingewiesen.³⁴⁾

Unter Berücksichtigung der dargestellten Sichten ergibt sich folgende Definition von „Komplexitätsmanagement“:



Komplexitätsmanagement umfasst die Gestaltung, Steuerung und Entwicklung der Vielfalt des Leistungsspektrums (Produkte, Prozesse und Ressourcen) im Unternehmen. Durch die Verstärkung und Dämpfung der Komplexität wird die Fähigkeit angestrebt, die Vielfalt in allen Wertschöpfungsstufen so zu beherrschen, dass ein maximaler Beitrag zum Kundennutzen bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit des Leistungserstellers erzielt werden kann.

³²⁾ Vgl. Ulrich 1984, S. 247, sowie Grossmann 1992, S. 32

³³⁾ Vgl. Homburg/Daum 1997, S. 333

³⁴⁾ Vgl. Luczak/Fricker 1997, S. 314 ff.