

**Beitrag zur modellbasierten Bewertung der
Komplexität in der Montagelogistik der
Automobilindustrie**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund

Dissertation

vorgelegt von

M. Sc. Veronika Feldhütter

aus

Starnberg

Dortmund, 2018

Danksagung

Nach diversen praktischen Einblicken in die Logistik mit der immer weiter wachsenden Komplexität hat es mich gereizt, in diesem spannenden Umfeld zu promovieren. Daher habe ich mich ganz besonders über die Gelegenheit gefreut, dies im Rahmen einer Industriepromotion zu tun.

Die Fertigstellung einer solchen Arbeit ist nur mit der Unterstützung von zahlreichen Personen möglich, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Michael ten Hompel, der sich dazu bereit erklärt hat, mich als externe Doktorandin zu betreuen. Dabei habe ich sehr wertvolle und spannende Eindrücke sowohl in die wissenschaftliche als auch praktische Arbeit durch den produktiven Austausch mit den seinen Mitarbeitern am Fraunhofer IML sammeln dürfen. Die stets wertschätzenden und inspirierenden Gespräche mit Herrn Prof. ten Hompel haben wesentlich zu meiner fachlichen, aber auch persönlichen Weiterentwicklung beigetragen.

Bei Jens Koböcken möchte ich mich ganz herzlich für die Möglichkeit, die Promotion in der Industrie zu schreiben, und für seine Unterstützung während der letzten drei Jahre bedanken. Zum Erfolg der Arbeit haben auch Corinna Steck, Natalie Wegener, Hanna Braun und Susanna Stapff einen wesentlichen Beitrag geleistet, wofür ich ihnen an dieser Stelle gerne meinen Dank aussprechen möchte. Die Diskussionen mit den Industriepartnern waren stets zielführend und haben mir sehr viel Spaß gemacht.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meiner Familie bedanken. Meine Eltern Christine und Hans-Otto Feldhütter haben mich immer unterstützt und in dem Dissertationsvorhaben bestärkt. Auch meine beiden Schwestern, Anna und Elisabeth, hatten immer ein offenes Ohr und Vertrauen in mich.

Kurzfassung

Die Automobilindustrie wurde in den letzten Jahren durch vielfältige Herausforderungen geprägt, wodurch insbesondere die Logistik aufgrund ihrer Querschnittsfunktion betroffen ist. Globalisierung, verändertes Nachfrageverhalten und eine höhere Marktheterogenität führten zu einer substanziellen Ausweitung der Modellpalette, während sich gleichzeitig, begründet durch eine höhere Marktdynamik, die Entwicklungszyklen drastisch verkürzt haben. Durch die Notwendigkeit, immer mehr Modelle in bestehende Werksstrukturen integrieren und deren Versorgung sicherstellen zu müssen, sieht sich vor allem die Logistik mit einem steigenden Komplexitätsniveau konfrontiert. Die Logistiknetzwerke sind heutzutage geprägt durch eine große Anzahl, Vielfalt und Dynamik der Netzwerkpartner. Aufgrund der Größe und des hohen Vernetzungsgrads erscheinen diese Netzwerke unübersichtlich und komplex. Der zunehmende Trend des Global Sourcing verstärkt diesen Effekt zusätzlich. In den kommenden Jahren wird im Zuge der zunehmenden Bedeutung von Elektromobilität, Digitalisierung und Vernetzung ein weiterer Komplexitätsanstieg erwartet.

Es ist bisher jedoch nicht möglich, diese Komplexitätszuwächse zu quantifizieren und fundierte Aussagen über deren Auswirkungen auf den Logistikerfolg zu treffen. Daher wird in dieser Arbeit zunächst Transparenz über die Komplexitätstreibenden Faktoren in der Montagelogistik geschaffen, um darauf aufbauend eine Bewertungsmethodik für Logistikkomplexität zu entwickeln. Dafür werden zunächst, aufbauend auf einer Literaturrecherche, im Rahmen einer qualitativen Studie leitfadengestützte Experteninterviews durchgeführt, um die relevanten Komplexitätstreiber in der Montagelogistik zu identifizieren sowie Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu formulieren. Anschließend werden die vermuteten Zusammenhänge zwischen Komplexitätstreibern und Logistikkennzahlen anhand einer statistischen Kausalanalyse im Rahmen einer Strukturgleichungsmodellierung empirisch überprüft. Darauf aufbauend wird eine Bewertungsmethode zur Operationalisierung von Logistikkomplexität entwickelt und anhand eines Use Cases bei einem deutschen Premium-OEM hinsichtlich Praxistauglichkeit und Funktionalität validiert. Die Anwendung der Methodik und die inhaltliche Auseinandersetzung mit dieser ermöglicht es, die notwendige Transparenz über Komplexität in der Logistik zu schaffen, diese zu bewerten und dementsprechend Handlungsempfehlungen für ein effektives Komplexitätsmanagement abzuleiten.

Abstract

The automotive sector has to face various challenges recently and especially logistics as an interdisciplinary field. Globalization and higher market heterogeneity lead to a substantial increase of model variety in the automotive sector. Simultaneously innovation cycles abbreviate due to rising market dynamics. Caused by the necessity to integrate a growing number of models in existing plant structures a considerable increase of complexity is observable within the automobile manufacturer's plants, especially in logistics. Market based, higher product variety represents a strategic success factor, but the resulting inner variety often has a negative impact on the company's processes and cost structures. Logistical networks are nowadays determined by a high number of suppliers, variety and dynamic within the network partners. Due to their size and high degree of cross-linking, these networks seem to be chaotic and complex. The ongoing trend of globalization increases this effect. In the coming years, a further increase in complexity is expected in the wake of the growing importance of electromobility, digitalization and networking.

However, it is not yet possible to quantify these complexity increases and to make informed statements about their effects on the logistical success. Therefore, transparency is first created on the complexity-driving factors in the assembly logistics, in order to develop an assessment methodology for complexity in logistics. For this purpose, on the basis of a literature research qualitative interviews are conducted, in order to identify the relevant complexity drivers in the assembly logistics as well as to formulate cause-and-effect relationships. Subsequently, the expected connections between complexity drivers and logistic key performance indicators are empirically examined by means of a statistical causal analysis within the framework of a structural equation model. Based on this, an assessment method for the operationalization of logistics complexity is developed and validated with regard to practicality and functionality by a German premium OEM. The application of the methodology and the analysis of the content makes it possible to create the necessary transparency about complexity in the logistics, to evaluate it and to derive recommendations for an effective complexity management accordingly.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Ausgangssituation..... | 1 |
| 1.2 | Problemstellung..... | 3 |
| 1.3 | Zielsetzung..... | 4 |
| 1.4 | Forschungsmethodische Einordnung der Arbeit..... | 6 |
| 1.5 | Aufbau der Arbeit..... | 7 |
| 2 | Grundlagen Logistik und Automobilindustrie..... | 9 |
| 2.1 | Überblick Fahrzeugmontage..... | 9 |
| 2.2 | Unternehmenslogistik im Kontext der Automobilindustrie..... | 10 |
| 2.2.1 | Logistische Kennzahlen..... | 11 |
| 2.2.2 | Logistikplanung vor SOP..... | 12 |
| 2.3 | Veränderte Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie..... | 15 |
| 2.3.1 | Rückblick..... | 15 |
| 2.3.2 | Wettbewerbsveränderung..... | 16 |
| 2.3.3 | Wertewandel der Kunden..... | 17 |
| 2.3.4 | Mass Customization und Individualisierung..... | 18 |
| 2.3.5 | Globalisierung..... | 18 |
| 2.4 | Folgen für die Logistikplanung..... | 19 |
| 3 | Theoretischer Bezugsrahmen..... | 21 |
| 3.1 | Komplexitätsbegriff..... | 21 |
| 3.2 | Komplexe Systeme..... | 22 |
| 3.2.1 | Systemtheorie..... | 22 |
| 3.2.2 | Kybernetik..... | 25 |
| 3.2.3 | Complex systems theory..... | 26 |
| 3.3 | Klassifikation von Komplexität..... | 26 |
| 3.3.1 | Interne und externe Komplexität..... | 27 |
| 3.3.2 | Statische und dynamische Komplexität..... | 29 |
| 3.3.3 | Strukturell vs. funktional..... | 30 |
| 3.3.4 | Markt-, Produkt-, Prozess-, und Organisationskomplexität..... | 30 |
| 3.4 | Auswirkungen von Komplexität auf Unternehmen..... | 31 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5 | Komplexitäts- und Variantenmanagement | 36 |
| 3.5.1 | Begriffsdefinition Variante | 38 |
| 3.5.2 | Klassifizierung von Varianz | 39 |
| 3.5.3 | Strategien des Variantenmanagements..... | 40 |
| 3.6 | Maßnahmen der Produktstrukturierung..... | 45 |
| 3.6.1 | Spaltungsstrategien..... | 46 |
| 3.6.2 | Bündelungsstrategien..... | 49 |
| 3.7 | Komplexitätsbeherrschung durch Industrie 4.0 | 51 |
| 3.8 | Zwischenfazit | 52 |
| 4 | Stand der Forschung zur Operationalisierung von Komplexität | 55 |
| 4.1 | Entropie | 56 |
| 4.2 | Vektorbasierte Komplexitätsmessung..... | 58 |
| 4.3 | Graphentheorie | 60 |
| 4.4 | Baumhierarchie | 62 |
| 4.5 | Mathematisch-produktorientierte Ansätze | 63 |
| 4.6 | Bisherige Arbeiten zur Untersuchung kausaler Zusammenhänge von Komplexität und Erfolgsfaktoren..... | 64 |
| 4.7 | Bewertung des Stands der Forschung und Ableitung des Forschungsbedarfs | 66 |
| 5 | Kombination von Forschungsmethoden: Mixed Methods Ansatz | 68 |
| 5.1 | Qualitative Forschung..... | 68 |
| 5.1.1 | Merkmale der qualitativen im Vergleich zur quantitativen Forschung | 68 |
| 5.1.2 | Datenerhebung..... | 69 |
| 5.1.3 | Leitfadenorientierte Experteninterviews zur Datenerhebung exklusiven Wissens..... | 72 |
| 5.1.4 | Datenauswertung..... | 73 |
| 5.2 | Quantitative Forschung | 74 |
| 5.2.1 | Datenerhebung..... | 74 |
| 5.2.2 | Datenauswertung | 75 |
| 5.3 | Kausalanalyse zur Untersuchung komplexer Konstrukte | 81 |
| 5.3.1 | Grundbegriffe und Bestandteile eines Strukturgleichungsmodells | 81 |
| 5.3.2 | Kovarianz- und varianzbasierte Strukturgleichungsmodelle..... | 83 |
| 5.3.3 | Vergleich reflexiver und formativer Messmodelle..... | 84 |
| 5.3.4 | Ablauf der Modellierung | 86 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | Komplexitätstreiber als Einflussfaktoren auf das Komplexitätsniveau | 90 |
| 6.1 | Literaturübersicht | 90 |
| 6.2 | Qualitative Vorgehensweise zur Identifikation der Komplexitätstreiber und Hypothesengenerierung | 92 |
| 6.2.1 | Zusammensetzung des Samples | 92 |
| 6.2.2 | Ablauf der Interviews | 94 |
| 6.2.3 | Datenanalyse | 95 |
| 6.3 | Zwischenergebnis der Komplexitätstreiberbetrachtung | 99 |
| 6.3.1 | Produkt | 100 |
| 6.3.2 | Prozess/Struktur | 103 |
| 6.3.3 | Netzwerk | 106 |
| 7 | Kausalanalyse zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg | 112 |
| 7.1 | Datenerhebung | 112 |
| 7.2 | Deskriptive Datenanalyse | 115 |
| 7.3 | Modellentwicklung und -spezifikation | 119 |
| 7.3.1 | Hypothesenbildung | 119 |
| 7.3.2 | Spezifizierung der Struktur- und Messmodelle | 124 |
| 7.4 | Ergebnisse der Untersuchung | 127 |
| 7.4.1 | Parameterschätzung | 128 |
| 7.4.2 | Gütebeurteilung | 135 |
| 7.5 | Fazit zur kausalanalytischen Untersuchung | 140 |
| 7.6 | Ermittlung der Beziehungen zwischen den Komplexitätstreibern | 141 |
| 7.6.1 | Erstellung eines Einflussportfolios | 143 |
| 7.6.2 | Implikationen für das Komplexitätsmanagement | 147 |
| 8 | Modellbasierte Methodik zur Komplexitätsbewertung in Montagelogistiksystemen | 149 |
| 8.1 | Modellbegriff | 149 |
| 8.2 | Konzeption eines Komplexitätsvektors zur Bewertung von Logistikkomplexität in Montagewerken | 151 |
| 8.3 | Anwendung der Methodik in der Praxis | 155 |
| 9 | Schlussbetrachtung | 164 |
| 9.1 | Zusammenfassung zentraler Erkenntnisse | 164 |
| 9.2 | Kritische Würdigung | 166 |
| 9.3 | Ausblick | 167 |

| | |
|---|------------|
| Literaturverzeichnis | 170 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 187 |
| Abbildungsverzeichnis | 189 |
| Tabellenverzeichnis | 192 |
| Anhang..... | 194 |
| A Leitfäden für Experteninterviews | 194 |
| A.1 Produktkomplexität | 194 |
| A.2 Netzwerkkomplexität | 196 |
| A.3 Strukturkomplexität..... | 198 |
| B Partial-Least-Squares-Algorithmus | 201 |
| C Vollständige Korrelationsmatrix | 204 |

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Unternehmen, insbesondere im automobilen Umfeld, sind zunehmend veränderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ausgesetzt. Die anhaltende Globalisierung und der daraus resultierende stärkere Wettbewerbsdruck, eine hohe Marktdynamik sowie steigende Kundenanforderungen sind nur einige Beispiele für ein verändertes Unternehmensumfeld. Auch eine breite Produktpalette mit der Möglichkeit zur kundenindividuellen Gestaltung sowie kurze Lieferzeiten werden immer wichtiger, um Wettbewerbsvorteile zu generieren. Hinzu kommt die Notwendigkeit, den Blickwinkel von den unternehmensinternen Strukturen auf die gesamte Lieferkette auszuweiten, um effektive und effiziente Prozesse zu gestalten. Somit richtet sich der Fokus auf weitverzweigte Netzwerke entlang der gesamten Wertschöpfungskette [Gie10]; [Wil10]; [Bec04].

Diese globale, dynamische und vor allem kompetitive Unternehmensumgebung führt zu einem Komplexitätsanstieg in allen Unternehmensbereichen, unter anderem auf Produkt-, Service- und Prozessebene. Dadurch werden unternehmensweit neue Planungsmethoden und -kenntnisse erforderlich, weshalb ein effektives Komplexitätsmanagement einen entscheidenden Erfolgs- und Wettbewerbsfaktor darstellen kann [TS01]; [WPB08]. Aufgrund einer Zunahme des Steuerungs- und Kontrollaufwands von Abläufen sind jedoch besonders die planenden und steuernden Bereiche, wie Entwicklung, Logistik und Produktionsplanung, von diesem Komplexitätsanstieg betroffen. Besonders die Logistik als Schnittstelle zu externen Partnern und mit vielen Querschnittsfunktionen wird vor neue Herausforderungen im Umgang mit Komplexität gestellt [Gie10]; [GL10a]. Die Logistik ist in der Praxis oft eher ein Betroffener als ein Erzeuger von Komplexität und verfügt nur über eingeschränkte Möglichkeiten, ihr entgegenzuwirken ([Bre16], S. 9).

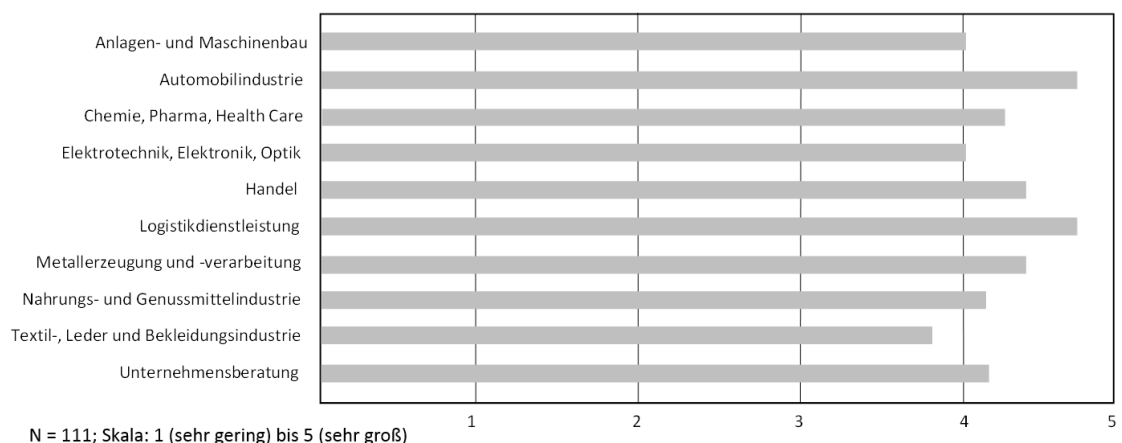


Abb. 1.1: Bedeutung der Logistik für einzelne Wirtschaftsbereiche (nach [Göp12b], S. 7)

Die bedeutende Rolle der Logistik in der Automobilindustrie, auch in Zukunft, betont die Studie der Philipps-Universität Marburg aus dem Jahr 2012. Bei einer branchenübergreifenden Befragung mit jeweils 100 der größten Unternehmen Deutschlands wurde festgestellt, dass die Logistik zwar in allen Branchen als wichtig eingestuft wird, vor allem aber in der Automobilindustrie als bedeutender Wettbewerbsfaktor gilt [Göp12b].

Seit den 1970er Jahren steigt die von Automobilherstellern angebotene Anzahl an Fahrzeugvarianten, um den Anforderungen von Markt und Kunden gerecht zu werden. Doch nie war der Trend so stark ausgeprägt wie heute [Kur04]. Alleine im Zeitraum von 1998 bis 2008 verdreifachte sich die am Markt verfügbare Anzahl an Basismodellen [DS08]; [Kur04]. Eine immer größer werdende Anzahl an Derivaten mit speziellen Ausstattungsmerkmalen besetzt mehr Marktsegmente und Marktnischen, wobei der Absatz je Fahrzeug sinkt und einen internen Wettkampf bewirkt. Dies führt zu einem Kannibalisierungseffekt zwischen den Fahrzeugmodellen [LBM07]. Diese Mischform aus Kostenführerschaft und Differenzierung ist für viele Automobilhersteller die Lösung, um Marktmacht zu halten und gleichzeitig die Produktkosten zu minimieren ([Por13], S. 41 ff.)

Mehr Derivate in kürzerer Zeit bedeuten zudem eine Verkürzung der Produkt-, Entwicklungs- und Technologielebenszyklen [Kir08]; [ES09]. Zudem lässt sich eine Zunahme der Arbeitsteilung sowie eine steigende Bedeutung von Dienstleistungen bemerken [Klu10]; [WV11]. Die Ausstattungsmöglichkeiten der Fahrzeuge steigen, um der Erfüllung individueller Kundenwünsche nachzukommen. Die Vielzahl an Derivaten und Ausstattungsvarianten stellt einerseits zwar einen Erfolgsfaktor im Wettbewerb dar. Andererseits erhöht die resultierende Komplexität jedoch den Aufwand sowohl in der strategischen als auch in der operativen Logistik um ein Vielfaches [ES09]; [Kir08]. Um im Wettbewerb zu bestehen, gilt es, den richtigen Umgang mit der wachsenden Komplexität zu finden, wobei ein Ausgleich zwischen kundenspezifischem Produktangebot und den dadurch induzierten Kosten angestrebt wird. Die Folgen unzureichenden Komplexitätsmanagements sind ausufernde und überalternde Produktprogramme und daraus entstehende hohe direkte und indirekte Kosten. Zugleich werden bestehende Prozesse und Unternehmensstrukturen ineffizient [WV11].

Malik bezeichnet die Beherrschung von Komplexität als eine essenzielle Herausforderung im Management sozio-technischer Systeme ([Mal96], S. 33). Zum einen wirkt sich Komplexität negativ auf die Effizienz des Wertschöpfungsprozesses aus, zum anderen wird aber auch die Prognosefähigkeit des zukünftigen Systemverhaltens erschwert ([Kös98], S. 30; [Kra13], S. 48). Produktionssysteme können als komplexe Wertschöpfungsnetzwerke charakterisiert werden, da sie durch

- eine große Anzahl und Verschiedenartigkeit der Systemelemente und deren Beziehungen,
- ein zeitlich veränderliches Systemverhalten sowie
- eine große Unsicherheit in der Planung aufgrund Informationsmangel

gekennzeichnet sind ([WK01], S. 79 f.). Jedoch ist Komplexität im Rahmen einer holistischen Betrachtung nicht ausschließlich negativ zu beurteilen, denn durch das Beherrschen von Komplexität können Unternehmen einen maßgeblichen Wettbewerbsvorteil erlangen ([DP09], S. 14). Die Komplexitätsbeherrschung ist somit ein strategischer Erfolgsfaktor für Unternehmen ([GW04], S. 7), und es ist somit nicht zielführend, Komplexität unter allen Umständen zu vermeiden oder zu reduzieren: „Nicht das Minimum an Komplexität ist wettbewerbsfähig, sondern das Optimum“

([Sch05b], S. 292). Die Transparenz bezüglich der Ursachen und Auswirkungen von Komplexität ist essenziell, um jenes optimale Niveau an innerer und äußerer Komplexität zu erreichen ([Sch05b], S. 8 ff.).

1.2 Problemstellung

Der Komplexitätsanstieg wird in der Wissenschaft bereits umfassend thematisiert, und auch Unternehmen sind sich seiner immer mehr bewusst. Insbesondere die Logistik produzierender Unternehmen ist mit einer hohen internen und externen Komplexität konfrontiert. Trotzdem ist zu beobachten, dass Komplexität in der Praxis oft unterschätzt wird, was mit einem mangelnden Verständnis des Phänomens begründet werden kann ([Mal96], S. 51). Es sind jedoch vertiefte Kenntnisse bezüglich der grundlegenden Ursachen und Wirkzusammenhänge notwendig, um den Faktor Komplexität im Unternehmen effektiv und effizient handzuhaben ([Gro01], S. 23). *Tar-ride* beschäftigt sich vor diesem Hintergrund mit dem grundlegenden Problem, ob die Komplexität eines Systems gemessen werden kann, mit dem Ergebnis, dass keine Möglichkeit besteht, die Systemkomplexität unmittelbar zu bestimmen. Respektive ist es erforderlich, komplexe Sachverhalte einem Prozess der Reduktion zu unterziehen, wodurch das Ausgangskonstrukt in einen messbaren Sachverhalt gewandelt werden kann ([Tar13], S. 174 ff.). Da bisher kein allgemeingültiges Maß für die Komplexität von Systemen existiert (vgl. [Mas10], S. 261; [Rau99], S. 115), müssen Lösungsansätze demnach stets die spezifischen Charakteristika eines zu bewertenden Sachverhalts berücksichtigen ([CS08], S. 111). Bei der Entwicklung eines Komplexitätsmaßes ist es daher nach *Lammers* erforderlich, neben Kriterien aus der Literatur auch Aspekte aus der Unternehmenspraxis in Betracht zu ziehen. Zudem ist es wichtig, eine benutzerfreundliche Handhabbarkeit des Komplexitätsmaßes sicherzustellen ([Lam12], S. 63).

In diesem Zusammenhang liegt bei Großunternehmen vor allem Kenntnis über die externen Komplexitätsursachen vor, welche sich intern im planenden und steuernden Bereich der Logistik bemerkbar machen [Gie10]. Steigende Anforderungen an Elektronik, Komfort und Sicherheit ebenso wie tiefere und breitere Produktprogramme sind ausschlaggebend für eine Erhöhung der Logistikkomplexität in der Automobilindustrie ([Klu10], S. 41). Als Folge einer steigenden Fahrzeugkomplexität erhöht sich unvermeidlich die werksinterne und werksübergreifende Komplexität der Logistiksysteme [Mal96]. Disposition, Materialbereitstellung und Kommissionierung werden aufwändiger und Lagerbestand sowie Einkaufspreise erhöhen sich aufgrund geringer Bestellvolumina [Wil08c]. Trotz der Kenntnis über aktuelle Herausforderungen in der Logistik werden unternehmensinterne Komplexitätstreiber und ihre Auswirkungen auf logistische Erfolgsgrößen bisher nur vermutet und wurden trotz intensiver Forschungen zum Thema Komplexität noch nicht vollständig nachgewiesen. „Vielen Unternehmen fehlt (eine grundlegende) Transparenz über die Produktkomplexität ihres Sortiments und deren Auswirkungen auf ihre (...) Wertschöpfungsketten“ [SAB⁺10]. Sowohl in Theorie als auch Praxis besteht Einigung darüber, dass hochkomplexe Systeme einen größeren Logistikaufwand erfordern. Bezüglich der konkreten Auswirkungen von erhöhter Logistikkomplexität herrscht jedoch Intransparenz. Der kausale Zusammenhang zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg wird lediglich vermutet und unterliegt noch keinem ganzheitlichen empirischen Nachweis. Die Kenntnis über die exakten und quantitativen Folgen

von Komplexität sind jedoch essenziell für einen effizienten und effektiven Umgang mit dieser und sollten daher nicht vernachlässigt werden ([Boh98], S. 63; [GL10a]; [MS07]).

1.3 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der dargestellten Problemstellung ist das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit die Erstellung eines Messmodells zur Bewertung und Quantifizierung von Komplexität in der Werkslogistik eines Automobilherstellers. Mit der Bewertungsmethodik soll es Unternehmen ermöglicht werden, Logistikkomplexität in Form einer Komplexitätszahl zu berechnen, sodass diese als Entscheidungskriterium bei der Auswahl von Prozessen, Werkebelegungen und Ressourcen berücksichtigt werden kann. Zur Entwicklung der Methodik ist es zunächst erforderlich, die internen Treiber der Logistikkomplexität zu identifizieren und Transparenz insbesondere bzgl. Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu schaffen. Dies wird auch von *Schuh* und anderen Autoren als einer der wichtigsten Schritte im Komplexitätsmanagement bzw. allgemein bei der Erstellung von Kennzahlensystemen genannt ([Sch05b], S. 119; [Arn08], S. 119). Aufgrund der Vielschichtigkeit und Mehrdimensionalität der Komplexität wird nicht der Anspruch erhoben, ein vollständiges Modell zur Abbildung sämtlicher Komplexitätsursachen zu erstellen, vielmehr wird eine Fokussierung auf die relevanten Komplexitätsfaktoren für die Montagelogistik eines Automobilherstellers angestrebt. Anhand einer empirischen Untersuchung werden vermutete Zusammenhänge bzw. Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen der Werkskomplexität und dem Logistikerfolg in der Montagelogistik statistisch überprüft. Denn für das Logistik- und Komplexitätsmanagement bilden das Wissen und die Transparenz über bestehende Ursache-Wirkungs-Beziehungen sowie Systemzusammenhänge die entscheidende Grundvoraussetzung, um zielgerichtet Handlungsempfehlungen ableiten zu können [GL10a]. Ausgehend von dieser Zielsetzung können folgende Forschungsfragen formuliert werden:

Forschungsfrage 1: Welche Faktoren beeinflussen die Logistikkomplexität eines Montagewerks in der Automobilindustrie?

Nach der Identifikation der relevanten Komplexitätstreiber in der Montagelogistik können deren Effekte auf logistische Kennzahlen mittels Verfahren der multivariaten Statistik quantitativ überprüft und kausale Zusammenhänge aufgedeckt werden. Grundlage dafür bieten Daten eines deutschen Premium-Herstellers. Diese Effekte sollen dann zur Entwicklung eines Bewertungsansatzes für die Operationalisierung von Logistikkomplexität verwendet werden:

Forschungsfrage 2: Wie kann die Werkskomplexität eines OEM operationalisiert werden und gibt es kausale Zusammenhänge zwischen Komplexität und Logistikerfolg?

Die zu entwickelnde Methodik soll dann im Rahmen einer Fallstudie in der Praxis zum Einsatz kommen und validiert werden. Dadurch wird die Funktionalität des Bewertungsansatzes sichergestellt, welcher als Entscheidungsunterstützungsinstrument auf strategischer Ebene dienen soll.

Aufbauend auf der genannten Zielsetzung können nun die Anforderungen an diese Arbeit sowohl seitens der Industriepartner als auch der Wissenschaft im Rahmen eines Anforderungssystems spezifiziert werden. Dabei wird zunächst der Gegenstand und Umfang der Betrachtung definiert. Es sollen sämtliche Faktoren berücksichtigt werden, die die Komplexität in der Montagelogistik beeinflussen, wobei produktbezogene, netzwerkbezogene und strukturelle Aspekte des Werks betrachtet werden. Da der Fokus auf der Systemkomplexität eines Montagewerks liegt, ist es wichtig alle Elemente und Akteure, wie den OEM selbst, aber auch die Lieferanten, Dienstleister, Ressourcen und Strukturen, zu berücksichtigen. Die Komplexität in der Logistik endet nicht mit der Fertigstellung des Fahrzeuges am Produktionsband, es wird sich in den folgenden Untersuchungen jedoch auf die Versorgungs- und Produktionslogistik konzentriert. Die Distribution und Entsorgung von bspw. Leergut wird nicht betrachtet.

Tab. 1.1: Anforderungssystem für das zu entwickelnde Bewertungsinstrument

| Anforderung | Beschreibung |
|-------------|---|
| A1 | Berücksichtigung von produkt-, netzwerk- und strukturbezogenen Komplexitätstreibern |
| A2 | Integration von OEM, Lieferanten, Dienstleistern, Strukturen und Prozessen |
| A3 | Erfassung und Quantifizierung der Folgen von Komplexität auf Logistikerfolg |
| A4 | Einsatz als Entscheidungsunterstützungsinstrument |
| A5 | Berücksichtigung der wechselseitigen Abhängigkeiten der Komplexitätstreiber |
| A6 | Modellbasierter Aufbau zur Abbildung von Szenarien und Experimenten |
| A7 | Erhebung realer, quantitativer Messgrößen |
| A8 | Akzeptabler Pflegeaufwand des Bewertungsansatzes |

Durch das entwickelte Bewertungsinstrument soll es gelingen, die Folgen von Komplexität auf den Logistikerfolg zunächst zu erfassen und in einem nächsten Schritt zu quantifizieren. Somit kann die Methodik als Entscheidungsunterstützungsinstrument in der strategischen Logistikplanung Anwendung finden. Der genaue Einsatzzweck des Modells ist eine wichtige Voraussetzung für die spätere Modellvalidierung in der Praxis ([Wag07], S. 165). Um konkrete Handlungsempfehlungen ableiten zu können ist es zudem notwendig, die Interaktionen der Komplexitätstreiber herauszuarbeiten, um jene Treiber mit dem größten Beeinflussungspotenzial zu identifizieren und ein zielgerichtetes und effektives Komplexitätsmanagement betreiben zu können. Die Methodik soll modellbasiert aufgebaut werden, da somit Veränderungen abgebildet und Szenarien bzw. Experimente durchgeführt werden können (vgl. [Wag07], S. 49). Die Anforderungen des Praxispartners bilden den Abschluss der im Vorhinein definierten Erwartungen an das zu entwickelnde Bewertungsinstrument: Es sollen reale Messgrößen erhoben werden, die mit einem handhabbaren

Aufwand in der Datenbeschaffung quantifizierbar sind. Außerdem soll der Pflegeaufwand des entwickelten Kennzahlensystems in einem akzeptablem Rahmen gehalten werden.

Zur Erfüllung der genannten Anforderungen und Zielsetzung wird im Folgenden der Lösungsansatz der Arbeit forschungsmethodisch eingeordnet.

1.4 Forschungsmethodische Einordnung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit kann der empirischen Forschung zugeordnet werden, wobei eine Hauptaufgabe in der Überprüfung von Theorien bzw. Hypothesen liegt ([Ste14], S. 136). Zur Beantwortung der vorgestellten Forschungsfragen wird das methodische Vorgehen in zwei Phasen unterteilt, welches in folgendem Vorgehensmodell skizziert wird:

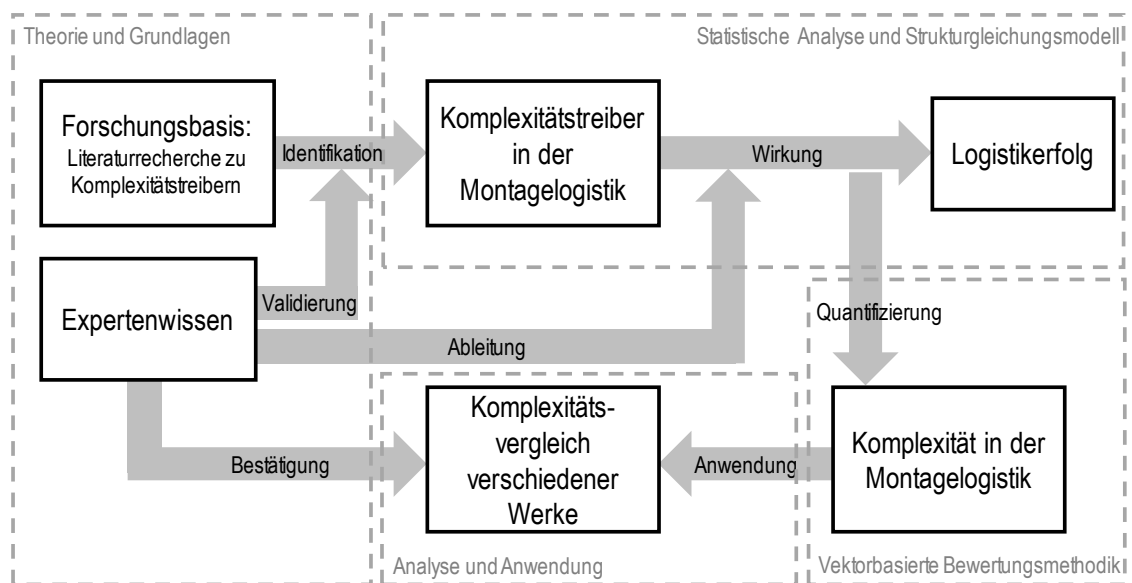


Abb. 1.2: Vorgehensmodell zur Beantwortung der Forschungsfragen inkl. verwendeter Forschungsmethoden

Ausgehend von einer Literaturrecherche, anhand derer eine erste Identifikation von Einflussfaktoren auf die Logistikkomplexität stattfindet, werden diese im Rahmen einer qualitativen Studie validiert und um weitere praxisrelevante Komplexitätstreiber ergänzt. Dabei weist qualitative Forschung kein deduktives Vorgehen auf mit dem Ziel, bereits bestehende Annahmen und Theorien zu überprüfen, vielmehr geht es darum, neue Hypothesen und theoretische Konstrukte zu generieren ([Gie13], S. 42). Zusammenfassend kann Qualitatives Forschen bezeichnet werden als „der Versuch herauszufinden, wie Menschen einen Sachverhalt sehen, welche individuelle Bedeutung er für sie hat und welche Handlungsmotive in diesem Zusammenhang auftreten. Daraus werden Theorien konstruiert und Folgerungen für die Praxis gezogen.“ [See04]. Eine Methode der offenen Befragung, die oft verwendet wird und auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung findet, sind leitfadengestützte Experteninterviews ([BB14], S. 53). Hier ist eine Definition der relevanten Begriffe unumgänglich, damit der gemeinte Sinn der verwendeten Begriffe auch von allen Beteiligten verstanden werden kann ([Ste14], S. 137). Neben der Identifikation der relevanten Komplexitätstreiber ist ein weiteres Ergebnis der qualitativen Forschung die Darstellung der Wirkzusammenhänge zwischen den Komplexitätstreibern und Kennzahlen. Daraus können sog.

Strukturhypothesen abgeleitet werden, wobei die logische Begründung der Zusammenhänge äußerst wichtig ist. Die Generierung der Wirkzusammenhänge bildet dann die Basis für eine quantitative empirische Studie, wobei „Quantitative empirische Forschung beabsichtigt, soziale und psychische Phänomene genau zu definieren, sie möglichst objektiv zu »messen« und anhand dieses Datenmaterials Hypothesen zu überprüfen“ ([Dex11], S. 115). Die quantitative Induktion schließt dabei von den quantitativen Eigenschaften einer Stichprobe auf die Gesamtheit ([Rei14], S. 77). Die Hauptgütekriterien der quantitativen Forschung beziehen sich auf den Messvorgang und werden durch Objektivität, Reliabilität und Validität spezifiziert ([Rei14], S. 72). Es existiert eine Vielzahl verschiedener Statistikverfahren zur Überprüfung von wissenschaftlichen Hypothesen, in dieser Arbeit wird zum Testen der vermuteten Zusammenhänge zwischen Indikatoren für Logistikkomplexität und Logistikkennzahlen ein Strukturgleichungsmodell verwendet. Die genaue Funktionsweise und Vorteile des Ansatzes werden in Abschnitt 5.3 diskutiert.

Zusammenfassend weist die forschungsmethodische Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit somit explorative und konfirmatorische Züge auf. Im Zusammenhang mit empirischer Forschung soll an dieser Stelle noch auf die wissenschaftstheoretische Grundposition des Kritischen Rationalismus verwiesen werden. Hier werden die Ergebnisse, vor dem Hintergrund der Messfehlerproblematik, nicht als die einzige Wahrheit angesehen. Vielmehr dienen sie lediglich als Indiz dafür, dass Hypothesen nicht falsifiziert werden konnten. Eine approximative Annäherung an die Gültigkeit der überprüften Annahmen kann nur durch ein wiederholtes Testen in der Realität erreicht werden ([Gie10], S. 9). Vor diesem Hintergrund sollen die Ergebnisse der Forschungsarbeit hinsichtlich ihrer Allgemeingültigkeit stets kritisch hinterfragt werden.

1.5 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung der genannten Ziele wird das methodische Vorgehen in mehrere Teilschritte untergliedert, daher ist die vorliegende Arbeit in neun Kapitel unterteilt. Das methodische Vorgehen und der logische Aufbau der Arbeit sowie die zugehörigen Kapitel sind in Abb. 1.3 skizziert. Nach einer Erläuterung der theoretischen Grundlagen über Logistik und Komplexität in Kapitel 2 und 3 wird in Kapitel 4 der Stand der Forschung zu bestehenden Ansätzen zur Operationalisierung von Komplexität erarbeitet. Die der Arbeit zugrunde liegenden methodischen Grundlagen der qualitativen und quantitativen Forschung werden in Kapitel 5 beschrieben. In Kapitel 6 werden die in der Literatur diskutierten Komplexitätstreiber anhand von leitfadengestützten Experteninterviews validiert. Aus den Erläuterungen der Experten sollen zudem Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den identifizierten Treibern ermittelt und dann in Hypothesen überführt werden. Des Weiteren sollen hieraus Messgrößen zur Operationalisierung der identifizierten Treiber bestimmt werden. Mittels statistischer Analysen in Form einer Strukturgleichungsmodellierung werden in Kapitel 7 die ermittelten Zusammenhänge sowohl zwischen Komplexitätstreibern als auch zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg überprüft. Die Ergebnisse aus Kapitel 6 und 7 dienen schließlich der Entwicklung der Methodik in Kapitel 8 zur Bewertung der Komplexität in der Montagelogistik. Basis hierfür ist ein vektorieller Bewertungsansatz mit Hinblick auf den Stand der Forschung. Dieser wird im Anschluss in der Praxis angewendet und eva-

liert. Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung und kritischen Würdigung der zentralen Ergebnisse sowie einem Ausblick auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten.

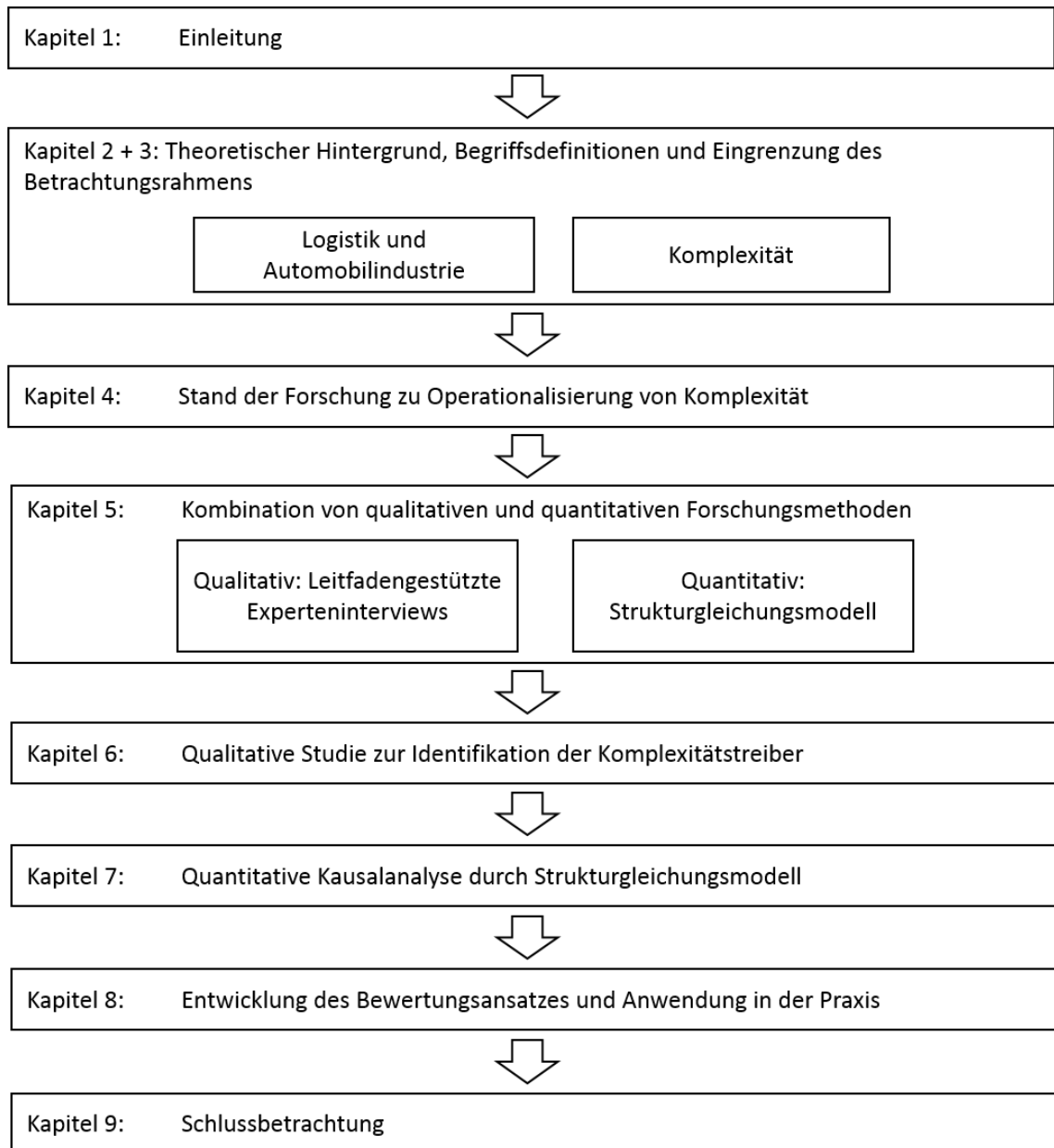


Abb. 1.3: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen Logistik und Automobilindustrie

Im Folgenden Kapitel werden grundlegende Begriffe aus der Automobilindustrie und Logistik erläutert, um die thematische Eingliederung der Arbeit aufzuzeigen.

2.1 Überblick Fahrzeugmontage

Die Automobilproduktion ist, seitdem Henry Ford 1913 die Fließbandfertigung einführte, von einer tayloristischen Produktion mit größeren Stückzahlen geprägt ([Bay10], S. 36). Fahrzeuge im Premiumsegment sind variantenreiche Serienprodukte, die vom Hersteller auftragsunabhängig entwickelt und von Kunden in vordefinierten Produktbereichen spezifisch konfiguriert werden ([Lec12], S. 13). Kennzeichnend für die Automobilfertigung ist die Variantenfließfertigung oder Mehrproduktfließfertigung, bei der auf derselben Linie mehrere Varianten eines Produkts hergestellt werden ([Gol14]). Der Vorteil einer Variantenfließfertigung, die eine Erweiterung der Fließfertigung darstellt, ist die enge Kopplung nacheinander folgender Fertigungsprozesse, die dazu führt, dass Durchlaufzeiten und Zwischenpuffer gesenkt, Produktionssteuerungskosten vermindert, die Kapazitätsauslastung verbessert und Abläufe standardisiert werden können (vgl. [Mei09], S. 20 f.).

Die Produktion von PKW aus Stahlblechkarossen gliedert sich im Wesentlichen in die Bereiche Karosseriebau, Lackiererei und Montage auf. Das Presswerk kann sich entweder auf dem Werksgelände befinden oder die Karossen werden von extern angeliefert. Nachdem die benötigten Blechteile im Presswerk erzeugt und im Karosseriebau zusammengeschweißt wurden, wird die Rohkarosse lackiert. Darauf folgt die Vor- und Endmontage ([Ihm06], S. 10 f). Bei der Endmontage ist die übliche Organisationsform die Taktstraßenmontage, die durch eine Kombination von manuellen Arbeitsplätzen und maschinellen Stationen gekennzeichnet ist. Im Fahrzeugbau beträgt der Montageanteil, abhängig von der Fertigungstiefe, 30 bis 50 Prozent ([LW12], S. 3). In einem Arbeitstakt wird die Fahrzeugkarosserie entweder manuell von einem Mitarbeiter oder teilautomatisiert oder automatisiert von einem Roboter bearbeitet. Bei der Karosseriemontage wird die Karosse auf einer Transferstraße oder Elektrohängebahn (EHB) befördert. Dabei werden Bauteile und die Innenausstattung in das Fahrzeug montiert. Die Schwenkmontage bezeichnet den Bereich, bei dem das Fahrzeug in einer EHB in einem Schwenkwinkel positioniert wird, um eine ergonomische Montage am Unterboden von bspw. Leitungen, Bremssystemen und Unterbodenverkleidung zu ermöglichen. Parallel wird der Motor mit dem Fahrwerk zusammengefügt. Dieser Prozess wird als die „Verlobung“ bezeichnet. Das anschließende Zusammenführen der Karosse mit einem kompletten Antriebsstrang wird in der Automobilfertigung als „Hochzeit“ bezeichnet. Zum Abschluss wird die Befüllung durchgeführt, indem das Fahrzeug – auf eigenen vier Rädern stehend – mit Treibstoff, Flüssigkeiten und auch Daten versorgt wird. Die Taktzeiten in der PKW-Endmontage liegen bei etwa 60 Sekunden ([Ihm06], S. 337).

2.2 Unternehmenslogistik im Kontext der Automobilindustrie

Der ursprünglich aus dem Militär stammende Begriff Logistik ist noch relativ jung, in Deutschland wird er erst seit den 1970er Jahren gebraucht (vgl. [Ihm06], S. 13; [AIK⁺08], S. 3.). Seitdem hat die Logistik aber weltweit immens an Bedeutung gewonnen, dies lässt sich an der wachsenden Zahl an Logistikabteilungen in Industrieunternehmen oder an dem breiten Angebot an Logistikdienstleistungen erkennen ([AIK⁺08], S. 3). Nach der Automobilindustrie ist die Logistik der stärkste Wirtschaftsbereich in Deutschland ([Wan14], S. 1). Die Logistik hat sich somit zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor entwickelt ([Bau08], S. 13). Grundsätzlich kann die Logistik folgendermaßen definiert werden:

„Logistik steht in der Volkswirtschaft und im Betrieb für die Gestaltung und Ausführung des gesamten Materialflusses und des begleitenden Informationsflusses“ ([Koe07], S. 11).

Arnold et al. verstehen unter dem Begriff Logistik die „Gestaltung logistischer Systeme sowie die Steuerung der darin ablaufenden logistischen Prozesse.“ ([AIK⁺08], S. 3). Charakteristisch für ein logistisches System ist das Ineinandergreifen von Bewegungs- und Lagerprozessen ([Pfo10], S. 5). Dies lässt sich graphisch durch eine Netzwerkstruktur darstellen, die aus Knoten (z. B. Lagerorte) und Kanten (Transportwege) besteht (vgl. [AIK⁺08], S. 3). Im Umfeld der Automobilproduktion verantwortet die Logistik alle logistischen Tätigkeiten entlang der Wertschöpfungskette, von der Entwicklung über den Lieferanten, die Produktion, den Vertrieb bis hin zum Kunden.

Die vorliegende Arbeit versteht Logistik als eine „marktorientierte, integrierte Planung, Gestaltung, Abwicklung und Kontrolle des gesamten Material- und dazugehörigen Informationsflusses zwischen einem Unternehmen und seinen Lieferanten innerhalb eines Unternehmens sowie zwischen einem Unternehmen und seinen Kunden.“ ([Sch09], S. 1). Deren Ziel ist es, den Logistikerfolg, der sich in die Logistikleistung und -kosten aufteilt, zu optimieren (vgl. [Sch09], S. 7 ff.; [Lec12], S. 41). Die Logistikleistung umfasst dabei die Lieferzeit, -zuverlässigkeit, -flexibilität, -qualität und Informationsfähigkeit. Übertragen auf ein Produktionsunternehmen umfasst die Logistik Aufgaben und Vorgänge, die sich zwischen dem Beschaffungsmarkt und dem Absatzmarkt bewegen ([Ihm06], S. 15). Abb. 2.1 zeigt dieses Spannungsfeld sowie die funktionale Abgrenzung der Logistiksysteme innerhalb der Unternehmenslogistik. Diese Einteilung verdeutlicht ebenfalls, dass die Unternehmenslogistik im Gegensatz zu den Bereichen Entwicklung, Beschaffung oder Vertrieb keine Linien-, sondern eine Querschnittsfunktion besitzt (vgl. [Ihm06], S. 20). Dadurch können Entscheidungen anderer Bereiche Logistikleistungen, -kosten und die Gestaltung der Logistiksysteme erheblich beeinflussen (vgl. [Lec12], S. 17). Ein Beispiel hierfür ist die Produktvielfalt, die überwiegend im Vertrieb und in der Entwicklung verursacht wird, deren Kosten aber hauptsächlich von der Logistik getragen werden ([Wil08c], S. 12).

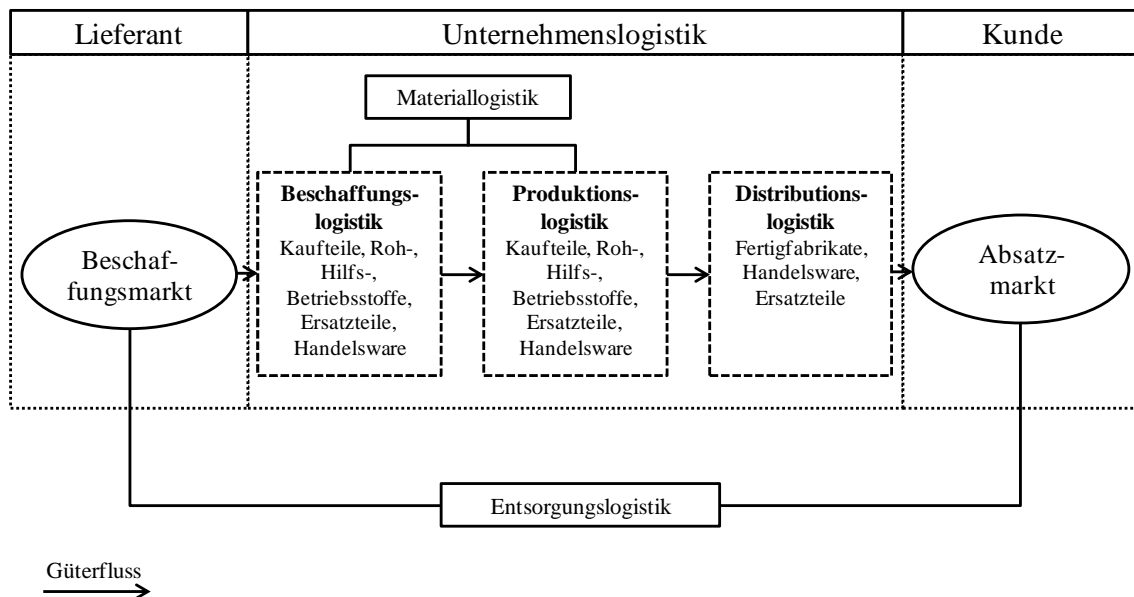


Abb. 2.1: Funktionelle Abgrenzung von Logistiksystemen nach den Phasen des Güterflusses am Beispiel eines Industrieunternehmens (nach [Pfo10], S. 19)

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Materiallogistik. Sie beinhaltet jene Planungs-, Steuerungs- und ausführenden Aktivitäten, die sich auf den räumlichen, zeitlichen und mengenmäßigen Transfer der in der Produktion eingesetzten Verbrauchsfaktoren sowie der Waren von den Lieferanten bis zu ihrer Verarbeitung in einem Produktionsprozess bzw. bis zur Einlagerung im Fertigproduktlager einer Unternehmung beziehen ([GT], S. 1). Insbesondere umfasst sie die betrieblichen Bereiche Beschaffungslogistik und Produktionslogistik ([Ihm06], S. 229).

2.2.1 Logistische Kennzahlen

Durch die rasante Entwicklung der Logistik werden heute die Ziele der Unternehmen unter anderem durch Logistikziele bestimmt ([See10], S. 1). Dabei ist das generelle Ziel der Logistik,

- das richtige Objekt (Güter, Informationen, Dienstleistungen etc.)
- zum richtigen Zeitpunkt
- in der richtigen Qualität und Quantität
- am richtigen Bedarfsort
- auf wirtschaftliche Art und Weise

bereitzustellen und verfügbar zu machen ([Paw07], S. 15). Der Logistikerfolg bzw. -misserfolg eines Unternehmens kann im Wesentlichen durch Zahlenwerte definiert werden. Zur Unterstützung dieser Quantifizierung von Erfolgsfaktoren werden Logistikkennzahlen eingesetzt ([Web93], S. 256).

Kennzahlen stellen Vergleichsgrundlagen für Analysen und Kontrollen dar, sie dienen als Zielvorgaben bei Planungen und wirken im Rahmen der Steuerung als Steuerungsindikatoren ([Web93], S. 256). Vor allem im Rahmen von Planungsprozessen ist es wichtig, diese Einzelkennzahlen in einen gemeinsamen Zielkontext zu bringen und Konflikte zu bewerten. Darauf aufbauend ist eine abgestimmte und optimierte Planung erreichbar [PH84]. Auch die Logistik

macht von den positiven Eigenschaften der Kennzahlen Gebrauch, da mit ihnen eine einfache und anschauliche Darstellung komplexer Strukturen und Zusammenhänge möglich ist [Web93], [Küp93], [VS05]. Gleichzeitig erlauben Kennzahlen konkretisierte Prognosen für Zukunftssituationen und dienen als Frühwarnindikatoren. Die Einsatzmöglichkeiten von Kennzahlen erstrecken sich über den gesamten Zeithorizont von Vergangenheit über Gegenwart bis hin zur Zukunft. Trotz ihrer überwiegend positiv erscheinenden Einsatz- und Aussagefähigkeiten gilt zu beachten, dass Kennzahlen jedoch niemals ohne sachlogische Beurteilung der anwendenden Personen interpretiert werden sollten.

Es wird zwischen absoluten und relativen Kennzahlen unterschieden. Absolute Kennzahlen treten in Form von einzelnen Zahlen, wie beispielsweise dem Umsatz auf, aber auch in Form von Summen, Differenzen und Mittelwerten, zum Beispiel in Bezug auf Lagerbestände. Relativzahlen setzen diese Größen in ein Verhältnis und geben daher einen relativierten Aufschluss über die Situation ([Web93], S. 255). Nach *Schulte* [Sch09] werden Kennzahlen in der Logistik des Weiteren in Struktur- und Rahmenkennzahlen, Produktivitätskennzahlen, Wirtschaftlichkeitskennzahlen und Qualitätskennzahlen klassifiziert. Strukturkennzahlen betreffen den Aufgabenumfang innerhalb einer Periode, Kapazitäten eines jeweiligen Bereichs in Form von Personal, Transport- und Fördermitteln sowie Kosten in allen Logistiksystemen. Im Gegensatz hierzu ist das Ziel von Produktivitätskennzahlen die Messung der Produktivität von Mitarbeitern und Maschinen, sodass beispielsweise Auslastungen ermittelt werden können. Als Wirtschaftlichkeitskennzahlen dienen Relativzahlen. Hier werden Materialeinsatz und Logistikleistung oder Kosten- und Erlösgrößen ins Verhältnis gesetzt, um Ergebnisse über die Effizienz der Logistik zu erhalten. Auch als Qualitätskennzahlen sind relative Werte nützlich, da sie in diesem Fall eine Beurteilung des Grades der Zielerreichung bzw. der Qualität der logistischen Leistung implizieren [Sch09]. Als Beispiele für relevante Kennzahlen in der Logistik nennt *Klug* ([Klu10], S. 112) die Variantenvielfalt, Frachtkosten, Behältervielfalt und Behälterstatus sowie Logistikzeiten. Neben monetär messbaren Erfolgsgrößen gewinnen aber auch ökologische Kennzahlen immer mehr an Bedeutung, welche in der Regel im Konflikt mit den monetären Zielen stehen. Zielsetzung ist hier, die negativen Wirkungen der Logistik auf die Umwelt, wie beispielsweise Lärm, Schadstoffemissionen oder Energieverbrauch, zu minimieren ([AIK*08], S. 8).

Auch die Balanced Scorecard findet in Logistikkennzahlensystemen Verwendung. Mit diesem Controlling Instrument wird ein Ausgleich zwischen verschiedenen Kennzahlen angestrebt, indem das Unternehmen aus verschiedenen Perspektiven analysiert wird. Beispiele hierfür sind die Finanzperspektive, Kundenperspektive, Perspektive der internen Geschäftsprozesse und Lern- und Entwicklungsperspektive. Je nach Branche können sowohl die Perspektiven als auch deren Anzahl variieren. Dadurch, dass Kennzahlen, die im Rahmen der Balanced Scorecard erhoben werden, in Ursache-Wirkungs-Beziehungen zueinander stehen, vereinfachen sich Analysen bezüglich Strategieauswirkungen und Ursachen von Negativentwicklungen ([VS05], S. 444).

2.2.2 Logistikplanung vor SOP

Die Fähigkeit, das Logistiksystem weit vor dem Start of Production (SOP) eines Produkts belastbar zu planen, gehört vor dem Hintergrund kürzer werdender Produktlebenszyklen und der steigenden Anzahl immer komplexerer Modelle und Derivate zunehmend zu den Kernkompetenzen eines Automobilherstellers ([SSS08], S. 161). Der Produktentstehungsprozess (PEP) umfasst

sämtliche Abläufe zur Realisierung eines Produktes, beginnend mit dem Start eines Fahrzeugprojekts bis zum SOP. Die Entscheidungen, die während des PEP getroffen werden, haben eine erhebliche finanzielle Auswirkung für einen Automobilhersteller: Nach ca. fünf bis sechs Jahren Entwicklungszeit wird das Fahrzeug ca. fünf bis sieben Jahre lang produziert. Anschließend müssen Ersatzteile je nach Typ bis zu ca. 15 Jahre vorgehalten werden ([GS12], S. 251).

Die Logistikplanung wird bereits in einem frühen Stadium in den PEP eingebunden und lässt sich in die strategische, taktische und operative Planungsphase einteilen ([Sch08], S. 162; [DRM08], S. 144). Sie hat die Aufgabe, die Verbindung zwischen der Entwicklung und der Produktion sicherzustellen sowie die unternehmensübergreifende Koordination der Wertschöpfungspartner zu übernehmen ([DRM08], S. 143). Das zentrale Ziel der Logistikplanung ist die frühzeitige Berücksichtigung der logistischen Anforderungen im gesamten PEP, weil die Logistik als Querschnittsfunktion von anderen Funktionen tangiert wird und das Kostenoptimierungspotenzial im Verlauf abnimmt ([DRM08], S. 144). Wichtigstes Kriterium für die Logistikplanung ist die bedarfsgerechte Bereitstellung der Materialien an der Montagelinie ([Sch08], S. 166). Abb. 2.2 zeigt die Arbeitspakete der Logistik im PEP auf.

In der **strategischen Logistikplanung** (ca. fünf bis zwei Jahre vor SOP) wird eine kostenoptimale Entscheidung im Hinblick auf den Standort für die Produktion eines neuen Derivats und die Werkebelegung getroffen ([Bie04], S. 57). Diese Phase umfasst die Definitions- und Konzeptentwicklungsphase, in der Grundsatzentscheidungen getroffen und Rahmenbedingungen definiert werden.

Die **taktische Logistikplanung** beginnt gegen Ende der strategischen Planung und endet ca. drei Monate vor SOP. Sie baut auf den Grundsatzentscheidungen der strategischen Planung auf und definiert geeignete Maßnahmen, um die Umsetzung der Entscheidungen zu ermöglichen und die dafür benötigten Mittel unter Einhaltung von Kostenzielen sicherzustellen ([DRM08], S. 145; [Bie04], S. 70 ff.). Verpackungsarten, Behälterinhalte, Anlieferkonzepte, logistische Beeinflussung der Lieferantenauswahl und die verschiedenen Kostenfaktoren wie bspw. Flächen- und Personalbedarf sind wesentliche Einflussfaktoren der taktischen Planung. Außerdem werden Möglichkeiten zur Variantenminderung gesucht ([Sch08], S. 165).

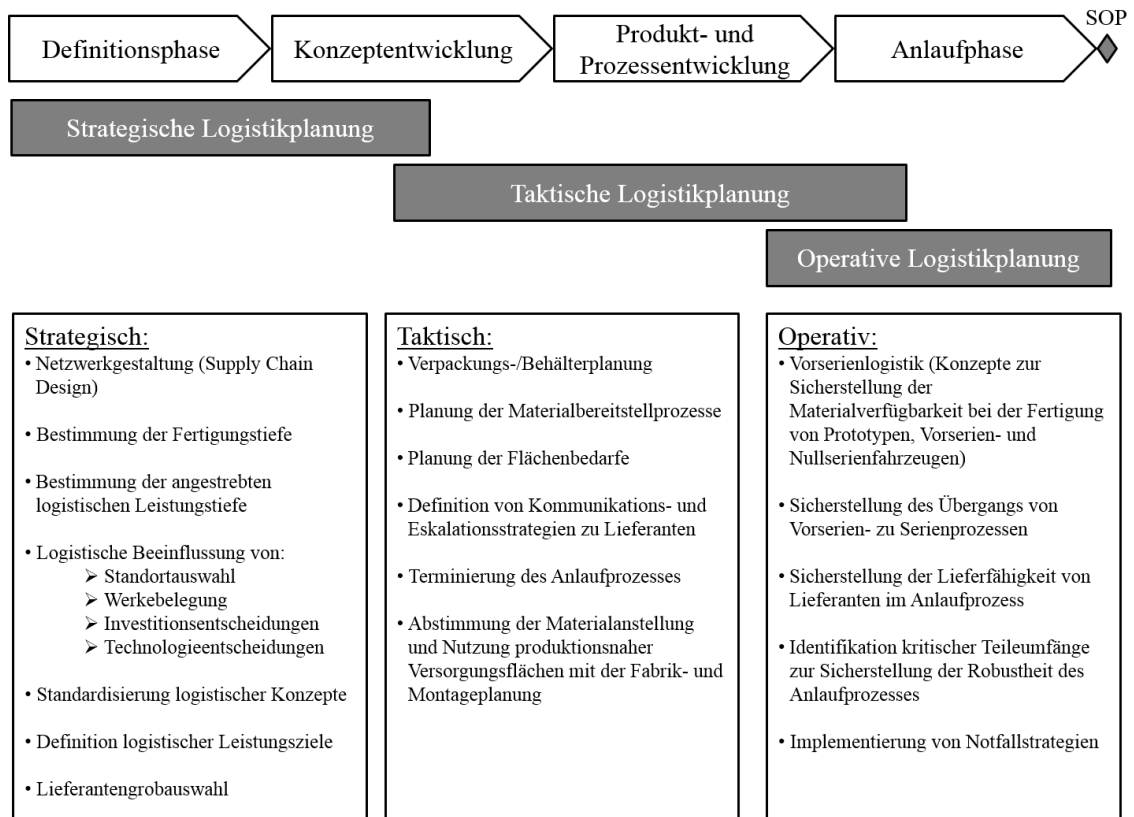


Abb. 2.2: Planungsumfänge der Logistik im PEP (nach [DRM08], S. 145; [Klu10], S. 79)

In dieser Phase werden Materialbereitstellungsprozesse in Absprache mit der Fabrik und Montageplanung nach dem Line-Back-Planungsprinzip geplant, um eine optimale Verfügbarkeit des Materials am Verbauort zu ermöglichen. Dabei wird der Materialfluss retrograd beginnend vom Bereitstellort des Bauteils an der Fertigungslinie bis hin zum Lieferanten betrachtet, weil Logistikflächen direkt am Verbauort knapp und wertvoll sind. Der Fläche werden der größte Wertschöpfungsanteil und zugleich die höchste Kapitalbindung zugewiesen ([Klu10], S. 80). Somit befindet sich auch dort der Engpass der Logistikkette. Gemäß dem Ausgleichsgesetz der Planung nach *Gutenberg* sollte sich die gesamte betriebliche Planung auf den Engpassbereich beziehen, weil dieser die Durchsatzleistung des gesamten Systems bestimmt ([Gut83], S. 164 f.). Eine Versorgungslücke am Verbauort führt dazu, dass der Fertigungsmitarbeiter nicht in der Lage ist, die maximale Leistung zu erreichen. Deshalb müssen logistikoptimierte Layouts, ergonomische Abläufe sowie Arbeitsplätze und die Art der Materialanstellung frühzeitig geplant werden ([Klu10], S. 80). Zur Line-Back-Planung gehört – neben der Berücksichtigung der Arbeitsplatzanforderungen – die Bestimmung der Materialabrufstrategie, des internen Transports, der internen Umschlagsprozesse, des externen Transports, der externen Lagerung und Umschlags sowie der Logistikprozesse beim Lieferanten ([Klu10], S. 81 ff.). Entscheidend für den Erfolg der taktischen Planung ist eine ganzheitliche Vorgehensweise, bei der die intraorganisationale Koordination von Logistik, Beschaffung und Produktion realisiert wird ([DRM08], S. 146).

Die **operative Logistikplanung** beginnt ca. ein Jahr vor SOP und dauert bis drei Monate nach SOP. Diese Phase wird auch als Anlaufphase bezeichnet, die in die Abschnitte Vorserie, Nullserie und Produktionshochlauf unterteilt ist ([Fit06], S. 51 f.). Die effiziente Durchführung der vorangegangenen Planung und die Überführung der Vorserien- zur Serienlogistik sind Ziele

der operativen Planung. Seriennahe Bedingungen werden geschaffen, um Produktions- und Logistikprozesse in der Vorserie zu erproben und sukzessiv in die Serienorganisation zu integrieren ([Klu10], S. 145). Diese Phase endet mit der Produktion des ersten kundenfähigen Fahrzeugs, dem SOP. Es folgt der Produktionshochlauf bis zur Erreichung der gewünschten Tagesproduktionszahl ([Fit06], S. 55).

Zusammenfassend lässt sich herausstellen, dass die Herausforderung für die Planung der Beschaffungs- und Produktionslogistikprozesse in der Gestaltung eines komplexen Netzwerks zur Sicherstellung des Materialflusses vom Lieferanten über die externen und internen Transport-, Umschlags- und Lagerprozesse bis hin zur Fertigungslinie nach dem Line-Back-Planungsprinzip liegt ([Klu10], S. 149; [DRM08], S. 143). Erschwert wird diese Planung jedoch durch die in den letzten Jahren zu beobachtenden Veränderungen im automobilen Umfeld, welche im Folgenden näher beschrieben werden.

2.3 Veränderte Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie

Die Automobilindustrie unterliegt seit vielen Jahren einem schnellen und nachhaltigen Veränderungsprozess. Diese Entwicklungen beeinflussen wesentlich die an die Logistik und damit auch die Logistikplanung gestellten Anforderungen und Randbedingungen. Ausgehend von einem Rückblick werden die veränderten Randbedingungen in der Automobilindustrie im Folgenden dargestellt.

2.3.1 Rückblick

„Any customer can have a car painted any colour that he wants so long as it is black.“ ([For22], S. 72).

Ende des 19. Jahrhunderts wurde durch die Erfindung von elektrischen Antrieben und Verbrennungsmotoren, aber auch durch die Entdeckung des Erdöls und die großindustrielle Massenproduktion in Chemie-, Elektro- und Maschinenbauindustrie möglich ([BHV14], S. 6). Durch das schnelle Wachstum der Automobilindustrie in den USA, den daraus resultierenden Zwang zur wirtschaftlichen Montage und das Fehlen qualifizierter Arbeitskräfte entstand die extreme Arbeitsteilung in der Montage. Als logische Folge der Arbeitsteilung wurde das Fließband durch Henry Ford erfunden und die Automobilproduktion damit massentauglich ([LW12], S. 1). Das 1908 eingeführte T-Modell (Tin Lizzie) war bis 1972 das meistverkaufte Auto der Welt und mit 260 Dollar für viele Menschen erschwinglich. Um dieses Modell jedermann zugänglich zu machen, war eine kostengünstige Produktion durch Nutzung von Skaleneffekten in Form der reinen Massenproduktion erforderlich. Daher konnte der Kunde nicht aus verschiedenen Ausstattungsvarianten wählen, dies wird am obigen Zitat von Henry Ford deutlich. Am Beispiel der Mercedes A-Klasse lässt sich zeigen, dass es heute für Fords Strategie keinen Absatzmarkt mehr gibt: Von 1,1 Mio. innerhalb von zwei Jahren gebauten A-Klasse Fahrzeugen waren nur zwei Fahrzeuge vollkommen identisch ([Sch05a], S. 38).

Anfang der 1960er Jahre wurde dann, getrieben durch Informations- und Kommunikationstechnologien, eine fortschreitende Automatisierung der Produktionsprozesse ermöglicht. Die dadurch bedingten Rationalisierungsmaßnahmen haben den Weg für eine variantenreiche Serienproduktion geebnet, wie sie heute in der Automobilproduktion zu finden ist ([BHV14], S. 7; [Lec12], S. 1).

Lange Zeit reduziert auf Transport, Lager und LKW-Spediteure, erfuhr auch die Logistik bahnbrechende Veränderungen im letzten Jahrhundert. Der in den 1980er Jahren beginnende Kostendruck, bedingt durch die weltweit gestiegene Konkurrenzsituation und die Übersättigung vieler Märkte, erzeugte bald neue Anforderungen an die logistische Prozessabwicklung. In der Automobilindustrie stieg der Druck insbesondere durch steigende Marktanteile japanischer Konkurrenten spürbar. Durch die bisherige tayloristische, funktionale Zergliederung der Produktion konnten zwar Produktivitätssteigerungen realisiert werden, gleichzeitig wurde der Produktionsprozess aber unüberschaubar und komplex im Aufbau. Durch eine Erweiterung des Betrachtungsumfangs der Logistik von der reinen Produktion zu einer ganzheitlichen Wertschöpfungsorientierung hat sich in der Logistik viel verändert. Mit dem Konzept des Supply Chain Management¹ (SCM) wurden das Prozessdenken und die konsequente Kundenorientierung in vielen Branchen zum neuen Paradigma, außerdem wurde der Fokus auf Informationsströme und Kosten in der Logistik gelegt ([Bau08], S. 13). Die Logistik hat sich zu einem entscheidenden Erfolgsfaktor für ein Unternehmen entwickelt, und die hochdynamische Entwicklung in den letzten Jahrzehnten wird bis heute weitergetrieben. Durch das Internet wurde die unternehmensinterne und -übergreifende Kommunikation und als Konsequenz die dezentrale Steuerung von Netzwerken ermöglicht. Basierend auf der RFID-Technologie und Schwarmintelligenz kann als neue Innovation in diesem Bereich die Selbstorganisation von Logistiksystemen genannt werden (vgl. [Bau08], S. 15).

2.3.2 Wettbewerbsveränderung

In den vergangenen Jahren haben der Nachfragerückgang auf den sog. Triademärkten in Nordamerika und Westeuropa und der Aufbau neuer Fertigungskapazitäten auf dem Weltmarkt zu Überkapazitäten und zu einem zunehmenden Verdrängungswettbewerb geführt ([Dre97], S. 37). Speziell im Premiumsegment versuchen Automobilhersteller der zu beobachtenden Marktsättigung und -stagnation in traditionellen Absatzmärkten wie Europa, Nordamerika und Japan mit immer mehr verschiedenen Modellen und Modellvarianten zu begegnen, um ihre Gesamtstückzahlen zu steigern oder wenigstens zu stabilisieren. Um Marktanteile zu sichern oder zu erhöhen, werden auch Produkte für Nischenmärkte angeboten, in denen nur wenige Stückzahlen prognostizierbar sind ([Ebe00], S. 343). Dieses Phänomen verstärkt sich vor allem in Zeiten schlechter Konjunkturlage, um durch die Einführung neuer Produktvarianten jeden nur möglichen Kunden zu gewinnen ([Kai95], S. 52). Letztendlich führt die Variantenvielfalt zu einer Fragmentierung

¹ Supply Chain Management bezeichnet die Koordination von Aktivitäten entlang der Wertschöpfungskette – von der Produktentwicklung des Lieferanten bis zum Beziehungsmanagement des Händlers. Der Begriff entstand aus dem Zusammenspiel der weltweit zunehmenden Verflechtung in der Leistungserstellung sowie dem gestiegenen Qualitäts- und Kostendruck durch erhöhte Kundenanforderungen ([AIK⁺08], S. 21).

der Märkte, wodurch im Extremfall ein Marktsegment nur noch von einem Kunden besetzt werden würde ([Wil08c], S. 3).

Um konkurrenzfähig zu bleiben und mit ständig neuen Produkten aufwarten zu können, unterstehen die Produktlebenszyklen wie auch die den Unternehmen zur Verfügung stehenden Entwicklungs- und Anlaufzeiten in der Produktion einer stetigen Verkürzung ([WKP06], S. 87). Dieser Trend wird in Abb. 2.3 dargestellt:

Modelle je Marke (1987-2000)

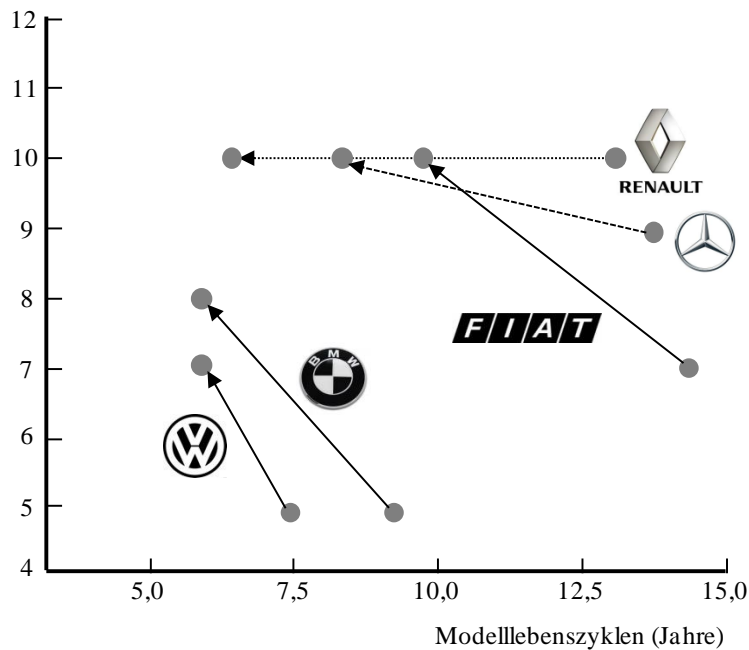


Abb. 2.3: Innovationszyklen in der Automobilindustrie (nach [Sch10], S. 3)

Im Zeitalter der Digitalisierung wird die Automobilindustrie zudem mit ganz neuen Konkurrenten konfrontiert. Unternehmen wie Google oder Apple wollen mit ihren Softwarelösungen die Zukunft des Automobils diktieren und befinden sich, verglichen mit traditionellen Zulieferern in einer starken Verhandlungsposition. Digitalisierung und damit einhergehende technische Fortschritte wie beispielsweise das hochautomatisierte Fahren werden das Mobilitätsverhalten in den nächsten Jahren maßgeblich verändern. Dadurch sind OEM gezwungen, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, um im Mobilitätswettbewerb weiterhin bestehen zu können.

2.3.3 Wertewandel der Kunden

Durch die eben beschriebene Sättigung der traditionellen Märkte, globale Konkurrenz und weltweite Überkapazitäten sind OEM einem ständigen Druck unterworfen, die Bedürfnisbefriedigung ihrer Kunden zu optimieren ([Göp12b], S. 12). Die damit gestiegene Macht der Kunden begründet den in den letzten Jahrzehnten zu beobachtenden Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt in der Automobilindustrie. Durch die erhöhte Verhandlungsmacht wird es dem Kunden somit ermöglicht, seinen spezifischen Produkt- und Serviceanforderungen Geltung zu verschaffen. Generell ist der Autokäufer von heute wesentlich anspruchsvoller und emanzipierter geworden. Aufgrund des Wertewandels weg von den Pflicht- und Akzeptanzwerten hin zu Individualität und

Hedonismus ist die Toleranzschwelle zur Hinnahme von Kompromissen gesunken. Die Loyalität der Fahrzeugkunden zu einer bestimmten Marke nimmt laufend ab. Gleichzeitig ist der Autokäufer preisbewusster geworden. Der Kunde fordert umfangreichere Serienausstattungen, ohne dafür wesentlich mehr zu bezahlen ([Klu10], S. 43). Um diesen gestiegenen Kundenanforderungen gerecht zu werden, reagieren OEM mit einer ständigen Ausweitung der Modellpalette und der Ausstattungsoptionen, die bis hin zu individualisierten Produkten reicht. Dieses Phänomen wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

2.3.4 Mass Customization und Individualisierung

Ein aktueller Trend, der nicht nur im Bereich der Automobilindustrie zu beobachten ist, ist die Massenproduktion von individualisierten Produkten. Dieser gilt branchenübergreifend als einer der zentralen Verhaltens-Megatrends der 2000er Jahre ([MBK13], S. 852). Er reicht von der kundenindividuellen Gestaltung von Sportschuhen bis hin zur persönlichen Konfiguration der Sitzbezüge des bestellten Neufahrzeuges. Aufgrund der überdurchschnittlichen Bedeutung wird dieser Trend in der Automobilindustrie aufgespalten, da die Individualisierung sowohl durch einen „Anstieg der angebotenen Modellvielfalt“ als auch durch die „Individualisierung der Fahrzeugausstattung“ erfolgen kann, was für das SCM jedoch stark unterschiedliche Konsequenzen hat. ([Göp12a], S. 9).

Konsumenten fordern speziell im hochklassigen Preissegment Individualisierungs- und Differenzierungsmöglichkeiten, da das Automobil zur Verlängerung der eigenen Identität geworden ist, welche zum Ausdruck gebracht werden muss ([HB08], S. 95). Die Hersteller reagieren darauf mit einer hohen Anzahl an Sonderausstattungen (SA), welche die Variantenvielfalt weiter ansteigen lässt. Die BMW Group beispielsweise bietet heute unter dem Dach ihrer drei Marken BMW, Mini und Rolls Royce bereits ca. 350 Modellvarianten an, die mit bis zu 500 Sonderausstattungen zu einer möglichen Zahl von 10^{31} Varianten pro Fahrzeugtyp führen ([MSG07], S. 4). Diese Entwicklung ist jedoch nicht allein auf das Premium-Segment begrenzt, wie auch die Variantenzahlen bei Volumenmodellen am Beispiel des VW Golf mit 10^{23} theoretisch möglichen Fahrzeugkonfigurationen demonstrieren ([Göt07], S. 19).

2.3.5 Globalisierung

Seit Anfang der 1990er Jahre, insbesondere nach dem Zusammenbruch der kommunistischen Systeme in Mittel- und Osteuropa sowie in China, aber insgesamt weltweit, lässt sich eine neue Dimension an Herausforderungen für die Gestaltung logistischer Prozesse erkennen: die Globalisierung ([Sta08], S. 27). Unter Globalisierung versteht man „... Prozesse der Zunahme sowie der geographischen Ausdehnung grenzüberschreitender anthropogener Interaktion“ ([Kes09], S. 35). Bezogen auf die Automobilindustrie bedeutet dies das Aufspannen weltweiter Wertschöpfungsnetzwerke aus Kunden, Herstellern und Zulieferern. Durch den erhöhten Anteil an weltweit bezogenen Subprodukten und die weltweite Bereitstellung von Fahrzeugen und Ersatzteilen sieht sich die Logistik mit einer enormen Komplexitätserhöhung konfrontiert. Dadurch bedingt sind höhere Transportdistanzen und als Konsequenz Wiederbeschaffungszeiten, aber auch aufwendi-

gere Planung durch zusätzliche Relationen und Intermediäre ([Göp12b], S. 12). Zusätzlich bedeutet eine oft mehrstufige internationale Logistikkette steigende Unsicherheit im Anlieferprozess, welche durch erhöhte Bestände im Werk kompensiert werden muss ([Klu10], S. 43).

Ein weiterer Aspekt der Globalisierung ist die Ausdehnung der Absatzmärkte. Die Fokussierung der Vertriebsaktivitäten auf neue, wachstumsstarke Märkte, allen voran die sog. BRIC-Staaten Brasilien, Russland, Indien und China, lässt die Vielfalt weiter ansteigen. Zwar erreichen fast alle deutschen Premium-Automobilhersteller dort die erhofften Absatzzuwächse, besondere marktspezifische oder legislative Anforderungen an die Produkte erfordern jedoch häufig eine Anpassung an die lokalen Rahmenbedingungen, welche sich entsprechend in einer Erhöhung der Teilevielfalt im Unternehmen niederschlägt. Somit treibt die zunehmende Globalisierung der Absatzmärkte die Komplexität durch geforderte länderspezifische Anpassung in die Höhe ([LMB09], S. 3).

Weitere wichtige Herausforderungen der Globalisierung sind Zölle, sprachlich-kulturelle Barrieren sowie das Abfedern von Wechselkursschwankungen, was viele OEM Produktionsstätten in den wichtigsten Währungsräumen eröffnen lässt ([Göp12b], S. 12).

2.4 Folgen für die Logistikplanung

Die genannten aktuellen Entwicklungen in der Automobilindustrie nehmen in besonderem Maße Einfluss auf die Logistikplanung. Durch die Verkürzung der Produktlebenszyklen sind die Planungszeiträume für die Logistik- und Fertigungsabläufe deutlich verkleinert worden. Dadurch ist der Logistikplaner gezwungen, seinen Planungsprozess in einer wesentlich kürzeren Zeit fertiggestellt zu haben. Die Qualität der Ergebnisse der Logistikplanung vor SOP hat aber maßgeblichen Einfluss auf die Herstellungskosten eines Automobils. Somit sieht sich die Logistikplanung mit einem wachsenden Kostendruck konfrontiert. Dadurch wird eine Betrachtung verschiedener Alternativen im Vorfeld notwendig, und es ist eine detaillierte Kostenbewertung der Optionen vorzunehmen. Folglich muss ein fundiertes Planungsergebnis erzielt und Optimierungspotenziale schon frühzeitig identifiziert und genutzt werden ([Sch08], S. 1 ff.).

Insbesondere durch die stetige Ausweitung der Produktvielfalt wird der Faktor Fläche zunehmend ein knappes Gut in der Logistikplanung. Oftmals muss die Logistik zu Gunsten der Montage die wertvollen bandnahen Bereitstellflächen abtreten. Mangelndes Verständnis anderer Fachbereiche spielt in diesem Zusammenhang auch eine große Rolle. Stellen zum Beispiel unterschiedliche Lackierungen für den Entwickler keine unterschiedlichen Varianten dar, so wächst die Komplexität mit jeder neuen Farbe in der Logistik signifikant ([Klu10], S. 46). Dies hat zur Konsequenz, dass immer mehr Teilefamilien sequenziert bereitgestellt werden müssen. Einhergehend mit der permanenten Forderung nach einer Reduktion der Bestände und Kosten hat dies zur Folge, dass der Planungsprozess in der Logistik stetig herausfordernder wird. Dies ist nicht zuletzt darin begründet, dass immer genauere Vorhersagen notwendig sind, um den ansteigenden Herausforderungen gerecht zu werden. Da Planung aber meist unter der Bedingung unvollkommener Information stattfindet, müssen Annahmen bzgl. der Entwicklung des zu planenden Systems getroffen werden (vgl. [AIK⁺08], S. 35). Im PEP geschieht dies häufig auf Basis von Ableitungen von Vorgängermodellen oder einfachen Dreisatz. Durch den stetigen Komplexitätsanstieg besteht jedoch keine Transparenz mehr über die jeweiligen Abhängigkeiten, und Erfahrungswerte

können nicht mehr unter der Annahme linearer Beziehungen extrapoliert werden. Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt, dass der deterministische Ansatz in der Logistikplanung den Anforderungen an die Planungsergebnisse nicht mehr gerecht wird, da die Umfeldbedingungen nicht mehr genau vorauszusehen sind ([Gün08], S. 380).

3 Theoretischer Bezugsrahmen

Gegenstand des folgenden Kapitels ist die Darstellung des theoretischen Bezugsrahmens der Arbeit. Die folgenden Ausführungen dienen dem Verständnis von wesentlichen Begriffen und Konzepten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit Anwendung finden.

3.1 Komplexitätsbegriff

Die wissenschaftliche Anwendung des Begriffs der „Komplexität“ ist interdisziplinär und findet Niederschlag in einer Vielzahl von Wissenschaften (vgl. [KS03], S. 12). Nach Meinung von *Olbrich* und *Battenfeld* sind die Definitionen des Komplexitätsbegriffes sehr allgemein gehalten, da Komplexität in den unterschiedlichsten Formen und Unternehmensbereichen auftreten kann ([OB05], S. 162). Die transdisziplinäre Natur des Begriffs lässt eine allgemeingültige Definition des Komplexitätsphänomens unmöglich erscheinen. *Nicolis/Prigogine* unterstellen dem Begriff der Komplexität eine Eigenkomplexität und stellen fest: „Komplexität ist einer jener Begriffe, deren Definition ganz wesentlich mit zu den Problemen gehört, die er aufwirft“ ([NPR87], S. 58). Auch *Luhmann* ist der Meinung, dass der Terminus Komplexität in sich selbst komplexe Strukturen aufweist ([Luh84], S. 49).

Ausgehend von einer sprachwissenschaftlichen Analyse lässt sich der Begriff aus dem lateinischen „complexus“ bzw. „complectere“ ableiten, das umschlingen, umfassen, zusammenfassen oder zusammenhängen bedeutet, sowie synonym dafür verflochten und vielschichtig ([Gel96], S. 66). Im umgangssprachlichen Gebrauch besitzt die Bezeichnung „komplex“ eine eher negative Bedeutung. Komplexe Strukturen werden oft mit Begriffen der Kompliziertheit, der Undurchschaubarkeit und der Unverständlichkeit verwoben. *Bohne* charakterisiert Komplexität als Vielschichtigkeit von Objekten und stellt den Wirkzusammenhang von Vielfalt und Verbundenheit in den Vordergrund ([Boh98], S. 20). Eine in der Literatur oft zitierte Begriffsbestimmung ([SKA13], S. 31) von Komplexität stammt von *Ulrich/Probst*, nach der Komplexität als Systemeigenschaft durch folgende Dimensionen charakterisiert werden kann: die Anzahl der Systemelemente, die Vielzahl der Beziehungen zwischen diesen Elementen und die Anzahl möglicher Zustände des Systems, also der Veränderlichkeit im Zeitablauf ([UP95], S. 58). Diese dreidimensionale Definition kann noch um „Unschärfen innerhalb des Systems“ sowie um „Wechselwirkungen mit dem Umfeld“ ([Ren07], S. 21) erweitert werden. Das Ergebnis dieser Begriffsbildung ist in Abb. 3.1 ersichtlich:

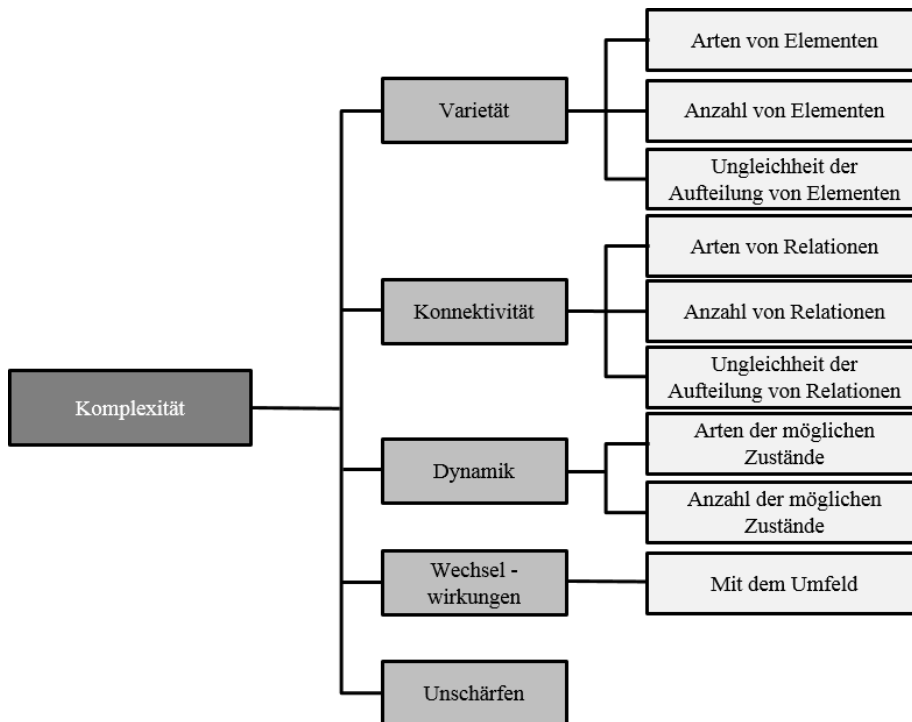


Abb. 3.1: Begriffsdefinition Komplexität (nach [Ren07], S. 21)

Ulrich und *Malik* ergänzen, dass in einer gegebenen Zeitspanne diese Systemeigenschaft „ungeheuer viele Zustände“ annehmen kann, was deren geistige Erfassung und Beherrschbarkeit durch den Menschen erschwert (vgl. [Sch05b], S. 5; [Mal96], S. 168; [Ulr70] in [Ble11], S. 69). *Schuh* differenziert Komplexität von Kompliziertheit, unter der er Sachverhalte und Zusammenhänge versteht, die nur relativ schwer zu verstehen sind ([SKA13], S. 31). Im Gegensatz dazu zeichne sich Komplexität durch eine eingeschränkte Analysierbarkeit, Gestaltbarkeit und Beherrschbarkeit aus. Alleine der Versuch, Komplexität vollständig durchdringen zu wollen, sei zum Scheitern verurteilt (vgl. [SKA13], S. 31). Zum Verständnis der Komplexität im betriebswirtschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Kontext kann ein systemtheoretischer oder kybernetischer Ansatz von Komplexität verfolgt werden, worauf im Folgenden genauer eingegangen wird.

3.2 Komplexe Systeme

3.2.1 Systemtheorie

Der Begriff der Komplexität kann insbesondere im Hinblick auf die Betrachtung von Unternehmen nicht isoliert behandelt werden, sondern findet vielmehr attributive Verwendung als Eigenschaft bzw. Zustand eines Systems ([Bli00], S. 81). Aufgrund der engen Verknüpfung der Termini Komplexität und System soll der Systembegriff näher spezifiziert werden ([Mal96], S. 186).² Der Terminus System leitet sich von dem griechischen Wort „systema“ ab und lässt sich mit „ein aus mehreren Teilen zusammengesetztes, gegliedertes Ganzes“ ([Lud01], S. 12) übersetzen. Die

² Malik knüpft an die enge Verbindung der beiden Begriffe an und weitet darüber hinaus aus, dass die Interaktionen der Systemelemente hauptursächlich für die Existenz von Komplexität sind.

Systemtheorie wird als formale Wissenschaft von der Struktur, den Verknüpfungen und dem Verhalten komplexer Systeme bezeichnet und beschäftigt sich mit der Strukturierung von Systemen ([Her10], S. 99).

Etymologisch wird ein System als „(...) sinnvoll in sich gegliedertes, geordnetes Ganzes“ ([Pfe97], S. 1403) definiert. *Herrmann* betont, dass es sich bei Systemen nicht um natürlich vorkommende Strukturen handelt, sondern um Modelle, „(...) die vom menschlichen Denken konstruiert werden (...)“ ([Her10], S. 99). Als vom Menschen konstruierte Modelle sollen diese zur verbesserten Wahrnehmung und Beschreibung von Problemsituationen dienen ([Her10], S. 99). Zur Bestimmung der Eigenschaften von Systemen differenziert *Ropohl* drei Facetten: die strukturelle, die funktionale und die hierarchische Systemfacette ([Rop09], S. 75f).

- Systeme bestehen aus Elementen, die durch Relationen miteinander verbunden sind.
→ strukturelle Facette
- Systeme erfüllen eine bestimmte Funktion im Rahmen einer Input-Output-Betrachtung.
→ funktionale Facette
- Elemente eines Systems können wiederum in Subsysteme untergliedert werden. →
hierarchische Facette

Die hierarchische Facette verdeutlicht, dass die Eigenschaften eines Systems im besonderen Maße von dessen Detaillierungs- bzw. Abstraktionsgrad abhängig sind. In Bezug auf komplexe Systeme kann somit festgehalten werden, dass erst das Setzen von Systemgrenzen die Betrachtung eines bestimmten Komplexitätsumfelds ermöglicht bzw. der Betrachtungsfokus eines Systems eine entscheidende Auswirkung auf die Höhe der Komplexität hat ([LF97], S. 317f.).

Nach *Schuh* hängt die Zusammensetzung eines komplexen Systems von der Anzahl und Verschiedenheit der Systemelemente und Beziehungen ab. Zum anderen wird Komplexität von der Veränderlichkeit im Zeitablauf beeinflusst, welche sich durch die Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente und durch die Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen Elementen ausdrückt ([Sch05b], S. 5). Fasst man diese Kernaussprägungen von komplexen Systemen in einer Matrix zusammen und legt die Ausprägungen der beiden Achsen mit Veränderung/Dynamik und Vielzahl/Vielfalt fest, so lassen sich vier idealtypische Systeme klassifizieren:

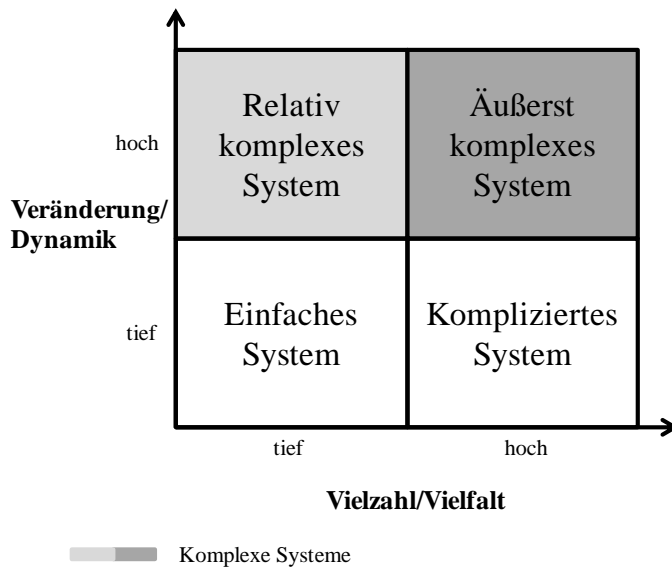


Abb. 3.2: Vier grundsätzliche Systemtypen (nach [UP95], S. 61)

Einfache Systeme weisen wenige Elemente, Beziehungen und Ausprägungsformen auf, welche starr miteinander verknüpft sind. Simple analytische Verfahren helfen bei der Beschreibung dieser Systemausprägung ([BD08], S. 27). Im Gegensatz dazu weisen komplizierte Systeme eine Vielzahl an Elementen und Beziehungen auf, welche statisch miteinander verknüpft sind. Das Verhalten dieser Systeme ist determinierbar und kann mithilfe statistischer Verfahren bei entsprechendem Zeitaufwand berechnet und beherrscht werden. Relativ komplexe Systeme unterliegen wie äußerst komplexe Systeme einer hohen Dynamik. Die hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten kann innerhalb kürzester Zeit zu unerwarteten Veränderungen des Gesamtsystems führen. Im Gegensatz zu relativ komplexen Systemen weisen äußerst komplexe Systeme eine hohe Anzahl von Elementen und Beziehungen auf. Die formale Zusammensetzung des Systems ist nicht beschreibbar. Die Beherrschbarkeit und Vorhersage der Wirkungsverläufe ist nicht mehr umfassend gewährleistet (vgl. [Gro92], S. 21). Demzufolge liegt der Unterschied zwischen komplizierten und komplexen Systemen in einer dynamischen Veränderlichkeit eines bereits komplizierten Systems ([Her10], S. 101). Eine klare Trennung zwischen relativ und äußerst komplexen Systemen ist jedoch meistens schwierig, ihr Übergang fließend ([KS03], S. 20).

Nach *Schuh* handelt es sich bei Unternehmen per Definition um komplexe Systeme ([Sch05b], S. 5). Unternehmen als Organisationen bestehen aus einer Vielzahl untereinander stark vernetzter Elemente. Zur Erfüllung ihres Unternehmenszwecks stellen sie durch den Austausch von Leistungen und Informationen offene Systeme gegenüber ihrer Umwelt dar. Die Unternehmensumwelt ist durch eine hohe Dynamik geprägt, welche unmittelbar auf das Unternehmen als antizipatives Subsystem einwirkt. Geprägt durch die Vielzahl der miteinander vernetzten Elemente in Verbindung mit der hohen Dynamik, sind sowohl die interne wie auch die externe Struktur eines Unternehmens komplex. Unternehmen können folglich als komplexe offene Subsysteme in einer komplexen Systemumwelt bezeichnet werden ([KS03], S. 36).

3.2.2 Kybernetik

Während sich die Systemtheorie allgemein mit Systemen auseinandersetzt, liegt der Fokus in der Kybernetik auf dynamischen Systemen ([Her10], S. 102). Im Gegensatz zur Systemtheorie beschäftigt sich die Kybernetik mit Prinzipien des Informationsaustausches innerhalb von Systemen ([DGE⁺12], S. 1017). Der Begriff Kybernetik wurde aus dem Griechischen abgeleitet und kann mit *Steuermann* übersetzt werden. Er geht auf Norbert Wiener zurück, der sie als „das gesamte Gebiet der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstheorie sowohl bei Maschinen als auch bei Lebewesen“ ([Wie48], S. 19) versteht. Die Kybernetik hat sich aus der Notwendigkeit heraus entwickelt, konkrete, komplexe und somit schwierige Problemstellungen der Ingenieurs- und Naturwissenschaften zu lösen ([Zie06], S. 25).

Der zentrale Begriff der Kybernetik ist das *Feedback*. Ein kybernetisches Systemelement ist eine Blackbox mit Input, internen Prozessen und einem Output, der im nächsten Zeitschritt über eine Rückkopplung einen Teil des neuen Inputs darstellt. Durch die Rückkopplung ist es möglich, bei Abweichungen der Ist-Werte von den Soll-Werten Korrekturen vorzunehmen ([Sch14], S. 48). Rückkopplung ist auch die Grundlage der Regelung, die von der Kybernetik besonders beachtet und verallgemeinert worden ist; *Regelung* bedeutet, im Gegensatz zur einfachen ursachegeleiteten Steuerung, eine erfolgsabhängige, wirkungsgeleitete Steuerung ([Her10], S. 102). Dieses Verständnis eines kybernetischen Systems, angewandt auf ein produzierendes Unternehmen, wird anhand Abb. 3.3 verdeutlicht:

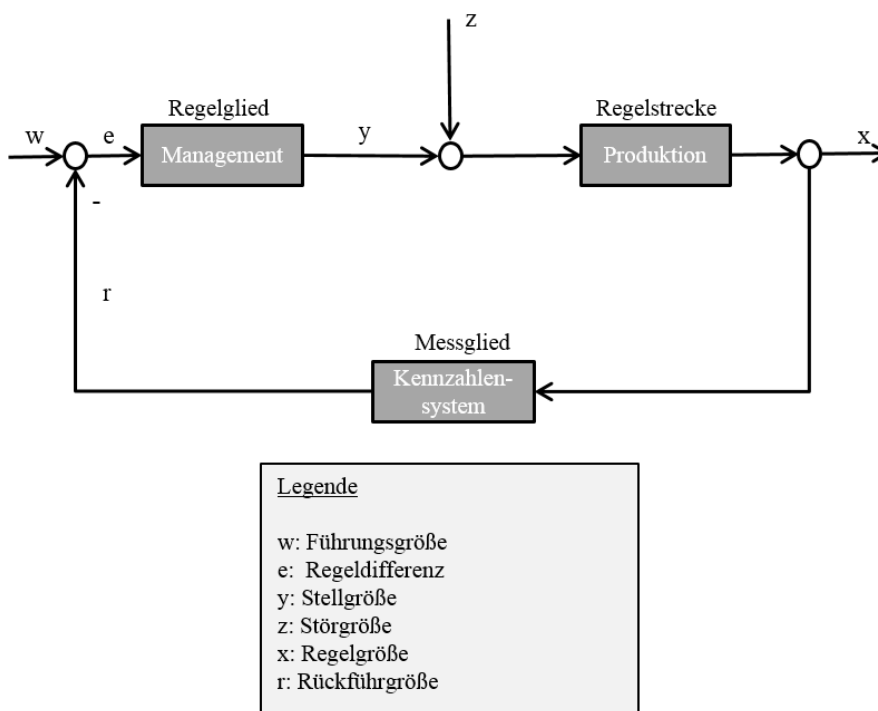


Abb. 3.3: Kybernetischer Regelkreis (nach [Her10], S. 103; [Bae74], S. 27)

Das Regelglied ist das Element eines Regelkreises, welches mit der Stellgröße y Anweisungen an die Regelstrecke bzw. die Produktion erteilt, damit diese eine Regelgröße x produziere, welche im Idealfall der Führungsgröße w entspricht. Die Produktion kann aber noch externe Störgrößen z erhalten, welche Einfluss auf den zu produzierenden Output nehmen. Das Messglied, beispielsweise

realisiert durch ein unternehmensinternes Kennzahlensystem, vergleicht Soll- und Ist-Wert der Produktionsmenge und berechnet die Regeldifferenz e . Diese wird an das Regelglied, hier das Management, weitergeleitet, woraufhin neue Entscheidungen getroffen werden können (vgl. [Bae74], S. 28).

Zusammenfassend beschäftigt sich die Kybernetik daher vor allem mit Regelungs- und Lenkungsvorgängen von und in Systemen sowie dem Informationsaustausch zwischen den Teilsystemen und ihrer dynamischen Umwelt ([Her10], S. 102). Gegenüber der Steuerung von Systemen besitzt die Regelung den Vorteil, dass nicht alle auf ein System wirkenden Störungen im Vorfeld bekannt und in ihrer Wirkung exakt zurechenbar sein müssen ([Bae74], S. 30). Hinsichtlich Komplexität besteht eine zentrale Fragestellung der Kybernetik darin, wie soziale Systeme daran gehindert werden können, dass diese unkontrolliert und unkoordiniert agieren. Dieses Problem wird anhand einer der wichtigsten Erkenntnisse der Kybernetik gelöst: Ein System mit einer gegebenen Komplexität kann nur mithilfe eines mindestens ebenso komplexen Systems unter Kontrolle gebracht werden ([Zie06], S. 30). Dem zugrunde liegt das durch den britischen Kybernetiker *Ashby* formulierte Grundgesetz der Kybernetik „Nur Varietät kann Varietät absorbieren.“ ([Ash56], S. 191).

3.2.3 Complex systems theory

Neben systemtheoretischen und kybernetischen Ansätzen zur Untersuchung von Komplexität existiert die diesen sehr ähnliche Forschungsdisziplin *complex systems theory* ([DGE⁺12], S. 1017). Diese relativ junge Wissenschaft kann als Meta-Theorie gesehen werden, die verschiedene Sichtweisen aus Soziologie, Physik, Biologie und Chemie auf Komplexität vereint. Sie beruht auf der Erkenntnis, dass analytische und experimentelle Konzepte zur Untersuchung von komplexen Systemen eines Forschungsgebiets auf andere Bereiche übertragen werden können. Dabei können die von der *complex systems theory* untersuchten Systeme meistens in der Natur aufgefunden werden und sind selbstorganisierend, dynamisch und großflächig ([Cyr07], S. 240). Unter Selbstorganisation versteht man in diesem Zusammenhang die Entstehung von makroskopisch geordneten Zuständen, die Bildung von Strukturen, durch eine systemimmanente mikroskopische Dynamik – im Gegensatz zur Strukturierung eines Systems durch externe Beeinflussung. Ein Beispiel hierfür ist die Musterbildung in chemischen Reaktionen ([JO08], S. 47), wie sie bei dendritischen Kristallen von Schneeflocken zu beobachten ist ([Wol], S. 2).

In der *complex systems theory* wird davon ausgegangen, dass alle komplexen Systeme allgemeingültige Eigenschaften haben. Durch diese interdisziplinäre Sichtweise können Methoden aus jedem Feld der Komplexitätsforschung verwendet und universell eingesetzt werden ([Bar97], S. 2).

3.3 Klassifikation von Komplexität

Wurde in dem vorherigen Abschnitt einleitend auf den Komplexitätsbegriff und komplexe Systeme in der Forschung eingegangen, werden nun die verschiedenen wissenschaftlichen Ansätze zur Klassifikation von Komplexität vorgestellt. Tab. 3.1 stellt eine Zusammenstellung möglicher Klassifikationen dar und bewertet diese nach Art der Klassifikation und dem zugrunde liegendem

Betrachtungsobjekt. Ein Verweis auf den für diesen Ansatz stellvertretenden Autor/ stellvertretende Autoren erleichtert die literarische Einordnung.

Tab. 3.1: Ansätze zur Klassifikation der Komplexität

| Klassifikation | Betrachtungsobjekt | Autor |
|--|---|----------------------------------|
| Strukturell vs. funktional | Gesamtheitlich | Kirchhof, Reiss, Bliss |
| Intern vs. extern | Unternehmen | Wildemann, Schuh, Denk, Kirchhof |
| Dynamisch vs. statisch | Unternehmen | Schuh, Bliss |
| Markt-, Produkt-, Prozess-, Organisationskomplexität | Unternehmen bzw. speziell: Produktentwicklung | Lindemann, Maurer, Braun |

3.3.1 Interne und externe Komplexität

Komplexität kann zwischen einer externen (Markt und Kunde) und einer internen (u. a. Entwicklung, Beschaffung, Fertigung und Führung) unterschieden werden, wobei diese nicht gesondert betrachtet werden dürfen, sondern in einem sich gegenseitig beeinflussendem Beziehungsgeflecht stehen ([DP09], S. 19; [KS03], S. 39 ff.; [Wil08a], S. 8):

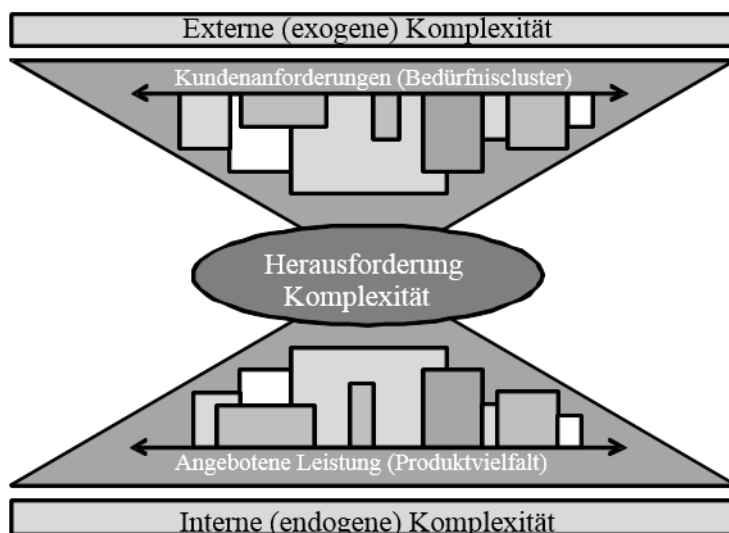


Abb. 3.4: Interne und externe Komplexität (nach [Sch05b], S. 13)

Die externe Komplexität resultiert aus den Rahmenbedingungen des Marktes, den bestimmten Branchenspezifika sowie den vom Gesetzgeber vorgegebenen Vorschriften. Externe, exogene Faktoren wirken somit von außen auf das Unternehmen ein. Treibende Einflussfaktoren der externen Komplexität sind die Globalisierung und die damit einhergehende Dynamik der Märkte, technologische Innovationen der Produkt- und Produktionstechnologien, die Individualisierung der Kundenwünsche sowie die weltweite Vernetzung anhand immer weiter voranschreitender

Entwicklungen aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien ([Wil09], S. 365, [Mey07], S. 27 f.).

Unternehmensspezifische Randbedingungen definieren hingegen die interne Komplexität. Durch die Gestaltung der internen Komplexität positioniert sich das Unternehmen gegenüber dem Markt, während die externe Komplexität nicht durch das Unternehmen beeinflussbar ist ([DP09], S. 20). Im Zusammenhang mit der Gestaltung der internen Komplexität kann *Ashbys* Gesetz herangezogen werden. Dieses besagt, dass die Varietät des steuernden Systems mindestens so hoch sein muss wie die Varietät des zu steuernden Systems. *Ashby* zeigte bereits 1957 auf, dass Unternehmen auf das komplexer werdende Umfeld mit dem Aufbau interner Komplexität reagierten ([Ash56], S. 195 ff.). Komplexität in einem Unternehmen entsteht demnach durch den Versuch der Überwindung der Komplexitätsdifferenz zwischen sich selbst und seiner Umwelt (vgl. [Sch05b], S. 12 f.). *Luhmanns* Aussage „Nur Komplexität reduziert Komplexität“ parallel zu *Ashbys* Aussage „Nur Varietät kann Varietät absorbieren“ verdeutlicht das Dilemma im Umgang mit Komplexität im Unternehmen. Die Lösung zur Komplexitätsbeherrschung sind Mechanismen der natürlichen Auslese von Lösungen, um mit der Umwelt umzugehen ([SKA13], S. 54).

Die im Unternehmen auftretenden internen Komplexitätstreiber können in strukturelle, informations- und kommunikationsbezogene und individuelle Einflussfaktoren differenziert werden. Als Hauptbestandteile der strukturellen Treiber seien hier die Aufbau- und Ablauforganisation wie auch die Produkt- und Prozessstruktur eines Unternehmens genannt. Aufgrund der immer wichtiger werdenden Ressource „Wissen“ beschreiben die informations- und kommunikationsbezogenen Treiber die aus dem Umgang mit Informationen entstehende Komplexität. Sowohl der Umfang von Wissen wie auch die Qualität und die Bereitschaft, dieses offenzulegen und weiterzugeben, haben Auswirkungen auf die entstehende Komplexität. Individuelle Treiber beziehen sich auf die Kompetenzen und Erfahrungen eines jeden Mitarbeiters, die Einfluss auf die Komplexitätsstruktur im Unternehmen haben können (vgl. [Wil09], S. 367 f.).

Es ist in vielen Fällen zu beobachten, dass Unternehmen den externen Einflüssen mit einer enormen Produktvielfalt begegnen, wobei zur Bereitstellung dieser, oftmals eine hohe Prozessvielfalt aufgebaut wird, die jedoch nicht zwingend aufgebaut werden müsste. *Schuh* argumentiert, dass eine „(...) übertriebene Kundennähe (...) zu einer nicht mehr kontrollierbaren Komplexität und damit zu erheblichen Effizienzverlusten im Leistungserstellungsprozess (...)“ ([Sch05b], S. 18) führen kann.

Erst die richtige Balance zwischen einer hohen Produktvielfalt einerseits und beherrschbaren internen Strukturen andererseits kann zu wettbewerbsstrategischen Vorteilen führen. In diesem Zusammenhang weitet *Schuh* aus und sieht den Grund für den rasanten Anstieg der Produkt- und Prozessvielfalt in Unternehmen nicht nur in der Reaktion auf steigende individuelle Kundenwünsche begründet, sondern vielmehr aufgrund der „Technikverliebtheit“ vieler Entwickler innerhalb dieser Unternehmen. Zwar ist die empfundene Marktorientierung vieler Unternehmen sehr hoch, in der Realität steht die Erreichung des Kundennutzens in vielen Entwicklungsvorhaben jedoch nicht im Mittelpunkt, sondern vielmehr das Produkt selbst mit seinen technologischen Innovationen ([Sch05b], S. 19).

3.3.2 Statische und dynamische Komplexität

Die Dynamik des Marktes nimmt immer mehr zu, da aufgrund der gestiegenen Kundenanforderungen und des erhöhten Wettbewerbes die angebotenen Leistungen und Produkte immer schneller verändert und angepasst werden müssen (vgl. [Sch05b], S. 6). Die Dynamik ist also ein wesentliches Charakteristikum der Komplexität ([GP95], S. 15). Auch *Bleicher* unterstreicht die Dynamik der Komplexität und sieht diese stellvertretend für die Eigenschaft, „(...) in einer gegebenen Zeitspanne eine große Anzahl von verschiedenen Zustände annehmen zu können (...)“ ([Ble11], S. 31). Ein weiterer, sich im Zeitverlauf ändernder Aspekt der Komplexität ist die Unsicherheit. Diese kann im Kontext der automobilen Logistik in Bedarfs-, Versorgungs-, Planungs- und Steuerungs- sowie in Produktionsrisiken bzw. -unsicherheiten unterschieden werden. In diesem Zusammenhang stellen Planungs- und Produktionsunsicherheiten nutzungsbezogene oder technologische Unsicherheiten dar. Dies kann noch um die Unsicherheiten aus dem externen Umfeld bzw. den Marktbedingungen ergänzt werden ([Lec12], S. 24). Die potenziellen Unsicherheiten entlang der Wertschöpfungskette eines Automobilherstellers werden in folgender Abbildung veranschaulicht:

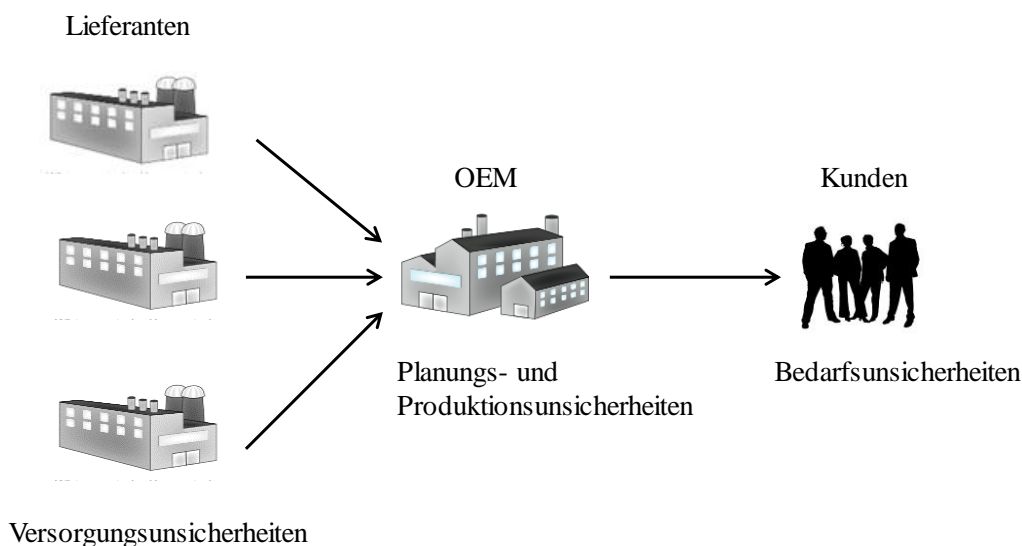


Abb. 3.5: Quellen der Unsicherheiten bei Automobilherstellern (nach [Lec12], S. 25)

Verallgemeinernd kann die dynamische Komplexität auch als die dynamische Veränderlichkeit der Beziehungen der Systemelemente untereinander beschrieben werden ([Bli00], S. 126). Im Gegensatz zu Dynamik und Unsicherheit sind die statischen Aspekte der Komplexität im Zeitverlauf nicht veränderlich. Sie ergeben sich aus der Struktur des Systems, die sich wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt aus der Vielzahl an Elementen und Beziehungen zusammensetzt. Nach *Bliss* ergibt sich die statische Komplexität aus der immanenten „Vielschichtigkeit eines Systems, dessen zahlreiche, unterschiedliche und weitgehend unabhängige Selektionsvariablen eine Vielzahl heterogener Beziehungen zueinander aufweisen und hierbei umfangreiche Konfigurationsdimensionen des Systems ermöglichen“ ([Bli00], S. 126).

3.3.3 Strukturell vs. funktional

Im Rahmen einer holistischen Betrachtung, also dem Betrachtungsobjekt eines betriebswirtschaftlichen Unternehmens übergeordnet, klassifiziert *Kirchhof* die Komplexität in eine strukturelle und eine funktionale Komplexität. Die strukturelle Komplexität, auch objektive Komplexität oder Zustandskomplexität genannt, beschreibt die aus dem Wirkgeflecht von Elementen und deren Relationen generierte Komplexität, wobei weiter klassifiziert werden kann in eine statisch-strukturelle und eine dynamisch-strukturelle Komplexität. Letztere trägt der in Abschnitt 3.3.2 erwähnten Dynamikkomponente Rechnung und beschreibt die Abhängigkeit komplexer Systeme von Umweltveränderungen.

Im Gegensatz dazu stellt die funktionale Komplexität, auch subjektive Komplexität, eine situative Variationsfähigkeit eines Systems dar. Ausgehend vom Betrachter ist dieser gezwungen, eine Selektion bezüglich des betrachteten Systems zu treffen und schließlich eine passende Antwort auf diese Komplexität zu finden. *Kirchhof* folgert daraus, dass die funktionale Komplexität aufgrund ihres Entscheidungscharakters und des daraus ableitbaren Entscheidungsspielraums subjektiv ist und somit immer betrachtet werden muss, wenn Menschen in oder mit Systemen interagieren ([KS03], S. 11 ff.).

Ähnlich der Unterscheidung von struktureller und funktionaler Komplexität definiert *Bliss* eine intrinsische Realkomplexität und eine extrinsische Abbildungskomplexität. Die intrinsische Komponente beschreibt die originäre Systembeschaffenheit, die zu umfangreichen Konfigurationsdimensionen führen kann, und sieht somit die Realkomplexität „(...) als Resultierende einer dem System innewohnenden, strukturellen Disposition.“ ([Bli00], S. 120). Die extrinsische Abbildungskomplexität beschreibt die Komplexität in Abhängigkeit von der Aggregationsstufe der Systembeschreibung bzw. der Gliederungstiefe, die der Betrachter definiert ([Gel96], S. 68). Im Gegensatz zu *Kirchhof* beschreibt *Bliss* die extrinsische Komponente nicht als subjektiv, sondern als relativ und reflexiv. Somit ist die Komplexität zwar abhängig von der gewählten Aggregationsebene des Systems, besitzt jedoch auf dieser wiederum einen objektiven Komplexitätsgrad, welcher den subjektiven Entscheidungsspielraum eines Beobachters ausschließt (vgl. [Bli00], S. 122 ff.).

Rosen widerspricht an diesem Punkt und bestreitet die Existenz einer intrinsischen Komplexität. Vielmehr sei die Komplexität ausschließlich davon abhängig, wie diese vom Betrachter erkannt und interpretiert wird. Daraus ergeben sich die verschiedensten Interaktionsmöglichkeiten mit dem System, welche resultierend die Komplexität ergeben ([ROS07], S. 229).

3.3.4 Markt-, Produkt-, Prozess-, und Organisationskomplexität

Während des Produktentwicklungsprozesses differenziert *Maurer* die auftretende Komplexität in die vier Teilaspekte Markt-, Produkt-, Organisations- und Prozesskomplexität (siehe Abb. 3.6).

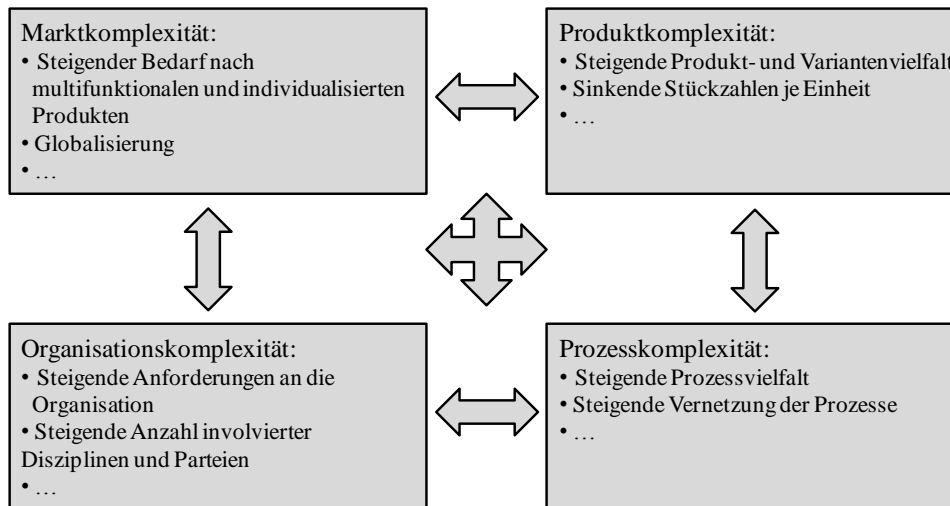


Abb. 3.6: Aspekte der Komplexität in der Produktentwicklung (nach [LMB09], S. 5)

Zu beachten ist, dass auch hier eine hohe Interaktion zwischen den Teilbereichen vorhanden ist. Eine isolierte Betrachtung nur eines Teilbereichs der Komplexität kann zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Folglich ist eine Optimierung des Komplexitätsgrads nur anhand eines ganzheitlichen Ansatzes möglich ([Mau07], S. 3; [LMB09], S. 5).

3.4 Auswirkungen von Komplexität auf Unternehmen

Wie bereits festgestellt wurde, sind mit dem Begriff der Komplexität überwiegend negative Komponenten verbunden. Er umschreibt für die Allgemeinheit einen Zustand, der nicht oder nur unter sehr hohem Ressourcenaufwand unter Kontrolle zu bringen ist. Interessant ist nun in diesem Zusammenhang eine weitere Untersuchung der Auswirkungen von zunehmender Komplexität auf Unternehmen. Es stellt sich die Frage, ob Komplexität für Unternehmen ausschließlich eine Belastung darstellt, die minimiert oder gar eliminiert werden sollte, oder ob diese auch gewollt und genutzt werden kann. Komplexität beschreibt einen unsicheren Aggregatzustand eines Unternehmens, wobei das Adjektiv „unsicher“ einen Gleichgewichtszustand darstellt, der sowohl aus einer Risiko- wie auch aus einer Chancendimension besteht (vgl. [DP09], S. 26).

Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wurde, ist der Kybernetiker *Ashby* der Meinung, dass nur Komplexität mit Komplexität umgehen kann und es somit fatal wäre, diese im Unternehmen zu eliminieren. Im Idealfall entspricht die unternehmensinterne Komplexität der äußeren Marktkomplexität, damit ein Unternehmen angesichts der heutigen Herausforderungen bestehen kann. Dies impliziert, es ist eine Fehleinschätzung zu glauben, dass Unternehmen ihre Leistungskomplexität, die der äußeren Marktkomplexität entsprechen muss, mit einfachen Systemen, also einer niedrigen inneren Komplexität, erreichen können. Wenn dies der Fall ist, sind Unternehmen ineffektiv, können kein Wachstum realisieren und geraten somit in eine Krise ([BHV14], S. 14 f.).

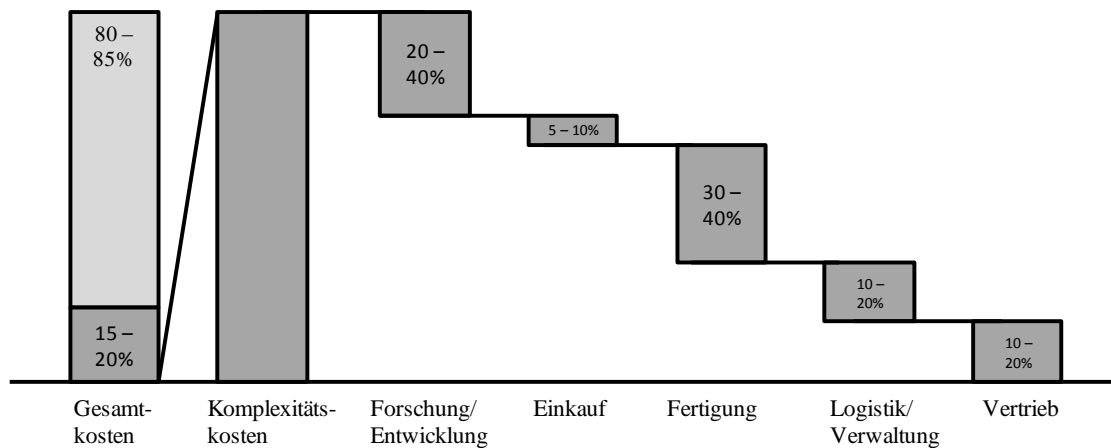


Abb. 3.7: Kostenstruktur eines Automobilherstellers (nach [Wil08c], S. 226)

Die in der Literatur diskutierten betriebswirtschaftlichen Konsequenzen der Komplexität beschränken sich meist auf den monetären Aspekt. Nach *Wildemann* beträgt der Anteil der Komplexitätskosten an den Gesamtkosten eines OEM 15 bis 16 Prozent. Es wird aufgezeigt, dass die Komplexitätskosten insbesondere in den indirekten, gemeinkostenverursachenden Geschäftsprozessen liegen ([Bay10], S. 1f.). Demnach müssen die Fertigung und die Logistik zusammen mehr als die Hälfte der Komplexitätskosten tragen. Eine einseitige Beschränkung auf die Kostensicht wäre jedoch fatal. Um einer aussagekräftigen Analyse der Auswirkungen von Komplexität auf Unternehmen gerecht zu werden, müssen sowohl die negativen Konsequenzen der Komplexität wie auch die Nutzeffekte dieser in einer ganzheitlichen Kosten-Nutzen-Analyse betrachtet werden.

In diesem Zusammenhang sieht *Wildemann* die Hauptaufgabe von Unternehmen darin, die externe Komplexität der Umwelt zu erfassen und diese innerhalb des Systems zu optimieren (vgl. [Wil09], S. 364). Durch den externen Komplexitätseinfluss wird die durch die Marktanforderungen in das Unternehmen induzierte Komplexität beschrieben. Um diese externen Anforderungen intern möglichst effizient abzubilden, muss die Eigenkomplexität der Produkt- bzw. der Prozessgestaltung optimiert werden. Eine zusätzliche Erhöhung der jeweiligen Eigenkomplexität würde zu höheren Komplexitätsgraden innerhalb des Unternehmens führen. Ein starker Anstieg der Kosten aufgrund einer fehlenden Deckungsgleichheit zwischen interner und externer Komplexität wäre die Folge. Besonders der Anstieg der Vielfalt ist einer der wesentlichen Komplexitätstreiber in Unternehmen und somit auch hauptverantwortlich für die entstehenden Komplexitätskosten. Komplexitätskosten können als „(...) bewertete, komplexitätsinduzierte zusätzliche Ressourcenverzehr“ ([Boh98], S. 43) charakterisiert werden. Komplexitätskosten stellen folglich einen bewerteten Unterschiedsbetrag des Ressourcenaufwands im Vergleich zu einem vielfaltsfreien Zustand dar. Das benötigte Prozessvolumen liegt vielfaltsbedingt höher als das Prozessvolumen zur Entwicklung, Herstellung und Vertrieb eines rein homogenen Produktionsvolumens bei gleicher Ausbringungsmenge. Ein erhöhter Ressourcenaufwand führt in Folge zu einem erhöhten Kapitaleinsatz und somit zu höheren Kosten.

In Abb. 3.8 sind die Nutzeffekte der Komplexität wie auch die negativen Konsequenzen dieser dargestellt. Als komplexitätsinduzierter Ressourcenverzehr können die operativen und dispositiven Prozesse in der gesamten Wertschöpfungskette verstanden werden, die durch eine Komplexitätserhöhung entstanden sind.

Als eine weitere negativ monetäre Auswirkung der Komplexität können die entstehenden kalkulatorischen Komplexitätskosten betrachtet werden. Führt eine erhöhte Angebotsvielfalt meistens zu einer erhöhten Nachfrage, muss beachtet werden, dass nur ein Teil dieser erhöhten Nachfrage ein echtes Zusatzvolumen für das Unternehmen darstellt. Der andere Teil stellt einen Substitutionsanteil eines schon bestehenden Produkts des gleichen Unternehmens dar, der diesem verloren ging bzw. von der neuentstandenen Variante „kannibalisiert“ wurde (vgl. [Pep06], S. 101; [Sch90], S. 227 f.). Im Allgemeinen kann festgehalten werden: je ähnlicher das Produktangebot untereinander ist, desto höher ist die Substitutionsgefahr. Diese kalkulatorischen Komplexitätskosten müssen in Produktentscheidungsprozessen und den zugrunde liegenden Deckungsbeitragsrechnungen betrachtet werden, da eine Nichtbetrachtung zu einer Ergebnisüberbewertung führen könnte.

Eine weitere wertmäßige Konsequenz der Komplexität stellen die Erlösminderungen aufgrund des ansteigenden Komplexitätsniveaus dar. Beispielsweise wird in der Automobilindustrie die Höhe der Händlermargen von dem Komplexitätsniveau, in diesem Falle getrieben durch die Angebotsvielfalt, bestimmt (vgl. [Boh98], S. 51). Erhöht sich die Angebotsvielfalt eines Automobilherstellers, benötigt der Händler größere Ausstellungsräume mit mehr Ausstellungsfahrzeugen, ein breiteres Produktwissen und gegebenenfalls weitere, produktspezifische Werkzeuge in den Werkstattbereichen. Um den Händler für diese Mehrkosten zu entschädigen, erhöht der Automobilhersteller die Händlermargen und mindert dadurch seine Erlöse.

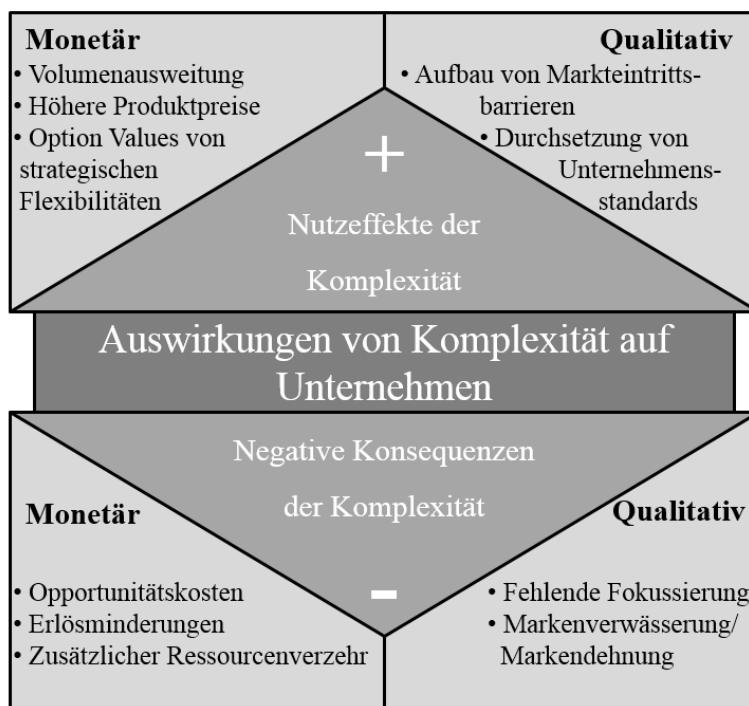


Abb. 3.8: Auswirkungen von Komplexität auf Unternehmen

Komplexität kann auch negativ qualitative Auswirkungen auf Unternehmen haben. Eine Erhöhung der Angebotsvielfalt und das Besetzen von eventuell komplementär zueinander stehenden Nischen können zu einer Verwässerung der Markenidentität führen. Eine ausufernde Differenzierung kann zu fehlender Fokussierung führen und somit zu einer Dehnung des gesamten Markenauftritts.

Komplexität ist jedoch ökonomisch nicht nur über Kosten definierbar, vielmehr sind bewusst entwickelte Komplexitäten oft Hauptbestandteil einer langfristigen Unternehmensplanung. Sie dienen somit zur strategischen Positionierung im Markt und der Gestaltung von nachhaltigen Erfolgspotenzialen. Monetäre Nutzeffekte sind die vielfaltsbedingte Ausweitung des Absatzvolumens, das höhere Preisniveau aufgrund der Erreichung eines höheren Kundennutzens durch kundenspezifischere Produkte wie auch die durch komplexere Strukturen entstehenden strategischen Flexibilitäten, welche einen positiven ökonomischen Wert aufweisen (vgl. [DP09], S. 26). Gerade letztere werden in der Diskussion um die betriebswirtschaftlichen Konsequenzen der Komplexität oft vernachlässigt. Ein vielfältiges Produktspektrum mit einer hohen Lieferantenzahl auf der Einkaufsseite wie auch einer hohen Kundenanzahl auf der Absatzseite gibt einem Unternehmen, das sich in einem hochdynamischen Marktumfeld befindet, die Möglichkeit, aus vielen Handlungsoptionen zu wählen. Der Wert dieser Optionen kann im Rahmen eines Value-Based-Management-Konzepts quantifiziert werden und ist für die Bewertung der ökonomischen Komplexitätsfolgen höchst relevant.

Als zentraler qualitativer Nutzeffekt soll in diesem Rahmen der Aufbau von Markteintrittsbarrieren genannt werden. Durch das Bedienen von Nischenmärkten und die Bereitstellung eines Vollsortiments auf dem Markt werden Konkurrenten immer geringer werdende Chancen zur Flankierung der eigenen Wettbewerbsposition eingeräumt. Darüber hinaus erleichtert ein breites und vielfältiges Produktangebot auch die Durchsetzung von Marktstandards.

Nur eine ganzheitliche Betrachtung der positiven wie auch der negativen Auswirkungen der Komplexität kann zielführend sein. Um das ökonomisch optimale Komplexitätsniveau zu identifizieren, lassen sich zumindest theoretisch die erwirtschafteten Deckungsbeiträge in Abhängigkeit von der entstehenden Komplexität grafisch in Abb. 3.9 darstellen.

Vielfaltsinduzierte Deckungsbeiträge steigen unterproportional an, während die Komplexitätskosten progressiv ansteigen. Im Bereich 1 wirkt sich eine Erhöhung der Vielfalt renditesteiigernd aus. Die wirtschaftlich optimale Vielfalt ist der Punkt, an dem der Grenznutzen der Deckungsbeiträge den Grenzkosten der Komplexitätskostenkurve entspricht. Wird das optimale Komplexitätsniveau überschritten, sinkt die Rendite aufgrund der überproportional ansteigenden Komplexitätskosten (Bereich 2).

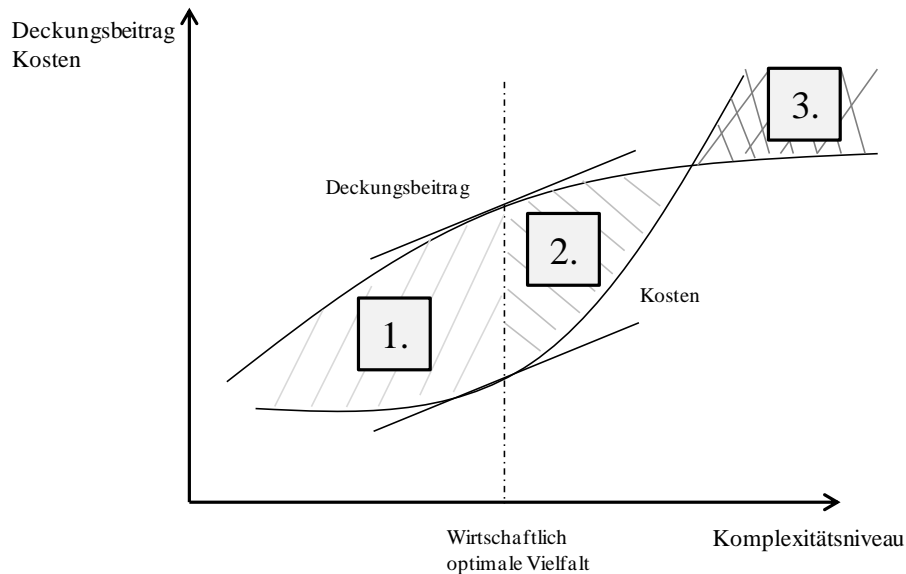


Abb. 3.9: Das optimale Komplexitätsniveau (nach [Boh98], S. 52)

Die Überkompensierung der Nutzeffekte durch die ansteigenden Kosten kann im Bereich 3 sogar zu Verlusten führen, ein Zustand, der in der Literatur allgemein als Komplexitätsfalle bezeichnet wird.

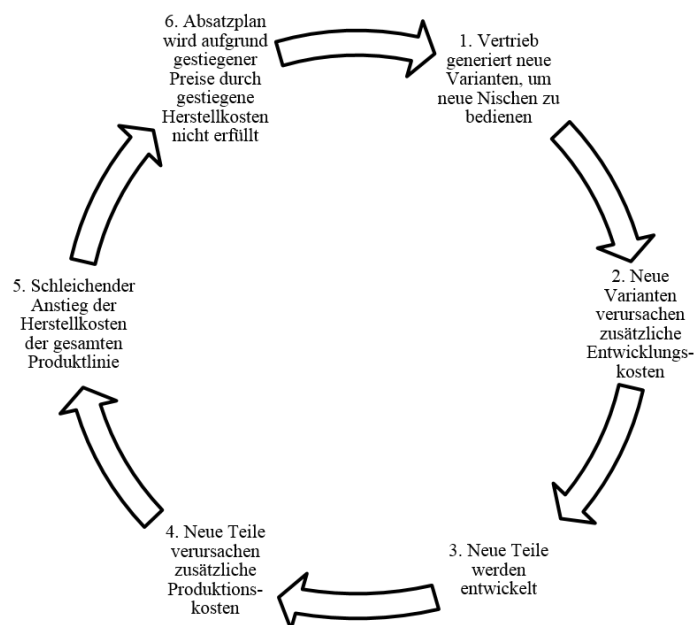


Abb. 3.10: Der Teufelskreis der Komplexität (nach [Wil08c], S. 13)

Aufgrund eines stagnierenden Absatzes entscheidet sich ein Unternehmen für die Erschließung von neuen Marktsegmenten (oft Nischen mit geringerem Marktvolumen) anhand neuer Produkte oder Produktvarianten. Diese verursachen eine Erhöhung der inneren Komplexität und dadurch eine Steigerung der Komplexitätskosten. Die Steigerung der Kosten führt zur Preiserhöhung der Produkte. Höhere Preise verursachen einen Verlust der Wettbewerbsfähigkeit und verschärfen somit die ursprüngliche Absatzkrise (vgl. [Pil98], S. 130ff., [Boh98], S. 52). Wildemann bezeichnet dieses Phänomen auch als Teufelskreis der Komplexität.

3.5 Komplexitäts- und Variantenmanagement

Angesichts der aufgeführten komplexitätsinduzierten Konsequenzen sowie deren negativen Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens wurde deutlich, dass die Beherrschung von Vielfalt und Komplexität zunehmend als strategischer Erfolgsfaktor angesehen wird [Sch05b], S. 13). Aus diesem Grund gilt es nach Wegen zu suchen, die Kosten der Komplexität zu senken, ohne dabei die monetären Nutzeffekte der Vielfalt zu schmälern. Lösungsansätze für dieses Spannungsfeld firmieren in der Literatur unter den Begriffen „Variantenmanagement“ und „Komplexitätsmanagement“. Da die beiden Begriffe oft synonym bzw. mit wechselnder Bedeutung verwendet werden, soll im Folgenden eine Präzisierung dieser Begriffe vorgenommen werden.

Komplexität kann als Systemeigenschaft angesehen werden, wobei die Vielfalt bzw. die Varietät eine dazugehörige Maßeinheit darstellt ([Sch05b], S. 34). *Schuh* definiert Komplexitätsmanagement als „(...) die Gestaltung, Steuerung und Entwicklung der Vielfalt des Leistungsspektrums (Produkte, Prozesse und Ressourcen) im Unternehmen“ ([Sch05b], S. 36). Durch die Verstärkung und Dämpfung der Komplexität versucht das ganzheitliche Komplexitätsmanagement die Vielfalt in allen Wertschöpfungsstufen in dem Grad zu beherrschen, dass eine Maximierung des Kundennutzens bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit des Leistungserstellungsprozesses erreicht werden kann (vgl. ebenda). *Schuh* erweitert mit seiner Auffassung das Tätigkeitsfeld des Komplexitätsmanagements, indem er diesem nicht nur eine reduzierende Tätigkeit zuschreibt, sondern unter gewissen Umständen auch explizit eine Erhöhung des Komplexitätsgrads fordert. Im Gegensatz dazu sieht *Bliss* die Komplexitätsreduktion als wesentliches Gestaltungsmotiv eines Komplexitätsmanagements ([Bli00], S. 20). *Wildemann* beschreibt vor dem Hintergrund des Zeithorizonts drei grundsätzliche Stoßrichtungen des Komplexitätsmanagements. Auf kurzfristige Sicht soll Komplexität, die durch die Umsetzung von externen Anforderungen in internen Prozessen entstanden ist, reduziert werden. Im Rahmen einer mittel- bis langfristigen Vorgehensweise soll diese vermieden werden und falls ein gewisser Grad an Komplexität unvermeidbar ist, möglichst wirtschaftlich beherrscht und optimiert werden ([Wil09], S. 372).

Denk/Pfneissl betonen in ihren Ausführungen den unternehmensweiten Ansatz eines erfolgreichen Komplexitätsmanagementsystems, bei dem es konkret um die Frage der Unternehmenswertgestaltung geht und nicht ausschließlich um die Generierung eines Kostensenkungssatzes ([DP09], S. 26). Bezüglich der Aktivitäten im Rahmen eines Komplexitätsmanagements kategorisiert *Schulte* drei Hauptaufgabenbereiche die zu einer erfolgreichen Handhabung der Komplexität beachtet werden müssen ([Sch95b], S. 757 ff.).

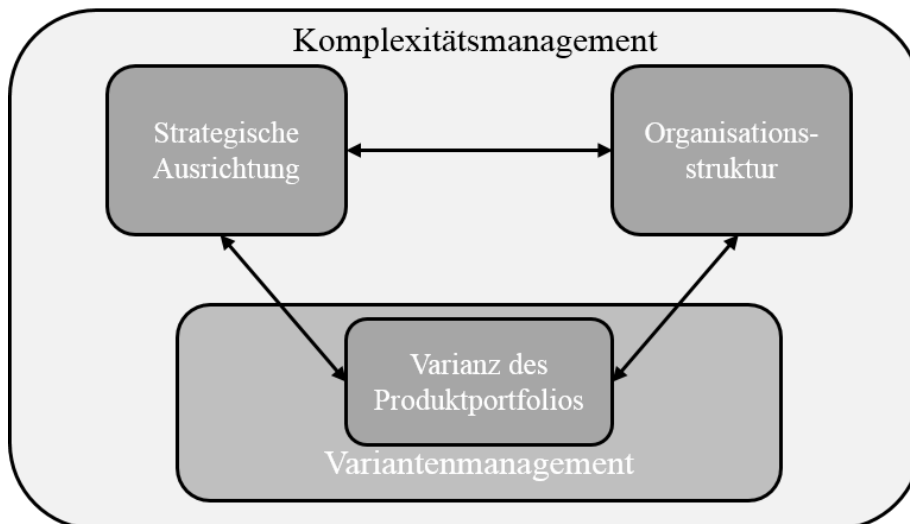


Abb. 3.11: Aktivitätsfelder im Rahmen eines Komplexitätsmanagements

Strategische Ausrichtung

Durch Strategien legen Unternehmen fest, in welchem Domänen sie langfristig aktiv sein wollen ([Cor95], S. 342). Diese Entscheidungen können erheblichen Einfluss auf die Komplexitätsstrukturen eines Unternehmens haben. Durch die Wahl einer Differenzierungsstrategie versuchen Unternehmen, gezielt wettbewerbsdifferenzierte, einzigartige Produkte anzubieten, um den dadurch entstehenden höheren Kundennutzen in Form höherer Marktpreise zu kapitalisieren ([Por13], S. 71). Eine Diversifikation des Unternehmensportfolios und die damit einhergehende Vielzahl heterogener Geschäftsfelder führen in der Folge zu komplexeren Strukturen ([Sch95b], S. 758). Das Ausweiten des Unternehmensportfolios kann jedoch auch zu einer signifikanten Risikodiversifizierung führen und die durch die Dynamik der Märkte hervorgehende Volatilität somit abgedeckt werden. Durch diese Dämpfung der Marktvolatilität können komplexitätsreduzierende Potenziale erschlossen werden ([Sch95b], S. 759).

Organisationsstruktur

Die Gestaltung der Ablauf- und Aufbauorganisation eines Unternehmens hat erhebliche Auswirkung auf den Grad der Komplexität. Inwiefern Unternehmen eine funktionale und verrichtungsorientierte Aufbauorganisation aufweisen bzw. divisional strukturiert sein sollten, hängt stark von den jeweiligen Wertschöpfungsprozessen ab. Auch die simultane Berücksichtigung von mehreren Dimensionen im Rahmen einer Matrixorganisation kann eine komplexitätsoptimierende Option darstellen (vgl. [Sch05b], S. 36).

Varianz des Produktportfolios

Auf Geschäftsfeldebene stellen die Produktvarianten die operative Ausgestaltung der Unternehmensstrategie dar. Aufgrund stagnierender Märkte und des Wandels von Verkäufer- zu Käufermärkten wird durch Variantengenerierung und die Bedienung von Nischenmärkten versucht, einen breiteren Kundenkreis anzusprechen. Die dadurch entstehende Komplexität ist im Unterschied zu den beiden im Vorfeld genannten Aufgabenbereichen vom Produkt selbst ausgehend

und beschreibt die variantengetriebenen Komplexitätsanteile. Der dadurch hervorgerufene Komplexitätsanstieg begründet sich nicht nur punktuell aufgrund des Bauteilanstiegs, sondern verursacht über die gesamte Wertschöpfungskette Mehraufwände ([Sch95b], S. 761 f.).

Die drei vorgestellten Hauptaufgabenbereiche dürfen nicht isoliert betrachtet werden. Es bestehen vielmehr starke Wechselwirkungen zwischen diesen Bereichen. Eine strategische Entscheidung zur Diversifikation des Portfolios kann z. B. zu einem enormen Anstieg der Varianten führen. Ein Anstieg der Produktvielfalt kann wiederum mit vorhandenen Organisationsstrukturen nicht effizient abgebildet werden und fordert eine Anpassung dieser.

Die Aufgabe zur Handhabung der Varianz des Produktportfolios wird als Aufgabe des Variantenmanagements gesehen. Dies umfasst alle Maßnahmen, mit denen die produkt- und sortimentsbezogene Variantenvielfalt aktiv beeinflusst wird ([EKL07], S. 287 f.). Das Variantenmanagement stellt folglich einen Teilbereich des Komplexitätsmanagements dar, bei dem das Produkt bzw. das Sortiment im Mittelpunkt der Betrachtung steht. Anhand ausgewählter Strategien sollte die Zielsetzung des Variantenmanagements sein, ein Gleichgewicht zwischen dem vom Kunden empfundenen Produkt- und Programmleistungen und dem dafür geleisteten unternehmensbezogenen Aufwand sicherzustellen. Nach *Schuh* umfasst das Variantenmanagement „(...) die Entwicklung, Gestaltung und Strukturierung von Produkten und Dienstleistungen bzw. Produktsortimenten im Unternehmen“ um die sowohl vom Produkt ausgehende, endogene Komplexität wie auch die auf das Produkt einwirkende, exogene Komplexität zu bewältigen ([Sch05b], S. 37).³

Im Aufgabenbereich des Variantenmanagements steht somit die physische Leistung im Zentrum der Betrachtung, wohingegen das Komplexitätsmanagement die vom Gesamtsystem erzeugte Komplexität aus dem Zusammenspiel von Produkten, Prozessen und Ressourcen betrachtet und versucht, diese effizient zu gestalten ([Sch05b], S. 37). Aufgrund der oftmals synonymen Verwendung der Begriffe Vielfalt und Variantenvielfalt soll im Folgenden der Begriff Variante spezifiziert werden.

3.5.1 Begriffsdefinition Variante

Nach DIN 199 Teil 1 sind Varianten „(...) Gegenstände ähnlicher Form oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“ ([DIN02], S. 15). Der Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (REFA⁴) definiert Varianten als eine „Abart der Grundaufführung“, wobei in diesem Zusammenhang fraglich ist, ob für die Existenz von Varianten eine Grundaufführung vorhanden sein muss bzw. identifiziert werden kann ([VDI76], S. 179).

Umfassender und ohne die Definition eines bestimmten Bezugsobjekts beschreibt *Lingnau* Varianten als „(...) Gegenstände mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Komponenten,

³ Die vom Produkt ausgehende, endogene Komplexität beschreibt die Anzahl der Bauteile bzw. die Komponentenanzahl, wohingegen die auf das Produkt einwirkende, exogene Komplexität z. B. in Form von Marktanforderungen, Gesetzesvorschriften, verschiedenen Produktionsabläufen etc. einwirken kann.

⁴ Die Hauptaufgabe des Verbands ist die Entwicklung von Methoden zur betrieblichen Datenermittlung. In der Tradition des tayloristischen Scientific Management vertritt der Verband das Industrial Engineering in Deutschland.

die Ähnlichkeiten in Bezug auf mindestens eines der Merkmale Geometrie, Material oder Technologie aufweisen.“ ([Lin94], S. 24), wobei die variantenübergreifenden, identischen Komponenten als Gleichteile bezeichnet werden ([Lin94], S. 24).

Am Beispiel von Personenkraftwagen differenziert Tab. 3.2 mögliche Variantenarten anhand von sechs unterschiedlichen Merkmalen.

Tab. 3.2: Variantenarten (nach [Gro10], S. 5; [Nic79], S. 5; [Sch88], S. 10 f.; [Bar94], S. 48 f.; [Zen06], S. 79 ff.)

| Variantenart | Erläuterung | Beispiel |
|---------------------|--|---|
| Materialvariante | Unterschiedliche Werkstoffe | Karosserieaußenhaut |
| Gestaltvariante | Unterschiedliche Geometrie | Karosserieform |
| Funktionsvariante | Erfüllung unterschiedlicher Aufgaben | Höchstgeschwindigkeit |
| Technologievariante | Einsatz unterschiedlicher Technologien | Ottomotor, Elektromotor |
| Prozessvariante | Unterschiedliche Prozesse mit gleichem Ergebnis | Variable Reihenfolge von Prozessschritten |
| Qualitätsvariante | Unterschiedliche Maßnahmen zur Absicherung von Eigenschaften | Gesonderte Prüfverfahren wegen Zertifizierungsanforderungen |

3.5.2 Klassifizierung von Varianz

Zur Klassifizierung der Varianz können unterschiedliche Dimensionen herangezogen werden. Eine Möglichkeit stellt die Unterscheidung in Zeit-, Mengen- und Artvarianz dar. Die Zeitvarianz tritt bei einer zeitlich unregelmäßigen Produktion des Produkts auf. Eine Mengenvarianz stellt die Ungleichheit der produzierten Stückzahlen dar. Die Artvarianz stellt die entscheidende Größe für die Variantenvielfalt des Produktspektrums dar und soll daher in diesem Rahmen näher betrachtet werden. Es können zwei Artvarianzen unterschieden werden: die Produktvarianz und die Prozessvarianz. Die Produktvarianz beschreibt die durch die Produkt- und Baugruppenstruktur entstehende Vielfalt. Sie ist in den meisten Fällen die intuitivste Art der Vielfalt, welche im besten Fall auch vom Kunden gesehen und toleriert wird. Die Prozessvarianz beschreibt hingegen diejenige Vielfalt, die durch die unterschiedliche Beanspruchung der Unternehmensbereiche aufgrund der Abbildung der verschiedenen Produktvarianten ausgelöst wird ([WG04], S. 7).

Für *Pil/Holweg* steht die Betrachtung der Produktvarianz im Mittelpunkt. Differenziert wird hierbei zwischen der externen und der internen Produktvarianz ([PH04], S. 395). Die externe Produktvarianz beschreibt die vom Kunden wahrnehmbare Varianz. Sie trägt zur Erfüllung von Kun-

denwünschen bei und folglich zur Erhöhung des Kundennutzens. Als Beispiel der externen Varianz ist in Abb. 3.12 die theoretisch mögliche Anzahl der Fahrzeugkombinationen für ausgewählte Automobile im Jahre 2002 abgebildet.

Als interne Produktvarianz verstehen *Pil/Holweg* diejenige Varianz, die zur Bereitstellung der externen Varianz innerhalb des Unternehmens entsteht. *Bayer* spricht in diesem Zusammenhang auch von der inneren Varianz als schädliche, kostentreibende Varianz und, abgrenzend dazu, von einer nützlichen, wertschaffenden externen Varianz ([Bay10], S. 20).

| Model | Bodies | Power trains | Paint-and-trim combinations | Factory-fitted options | Total number of variations |
|------------------|--------|--------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Peugeot 206 | 3 | 8 | 70 | 5 | 1.739 |
| VW Golf | 3 | 16 | 221 | 26 | 1.999.813.504 |
| Ford Focus | 4 | 11 | 64 | 19 | 366.901.933 |
| Renault Clio | 2 | 10 | 57 | 9 | 81.588 |
| Peugeot 307 | 4 | 8 | 70 | 9 | 41.590 |
| GM Astra | 4 | 11 | 83 | 14 | 27.088.176 |
| GM Corsa | 2 | 9 | 77 | 17 | 36.690.436 |
| Fiat Punto | 2 | 5 | 51 | 8 | 39.364 |
| VW Polo | 2 | 9 | 195 | 27 | 52.612.300.800 |
| BMW 3-Series | 3 | 18 | 280 | 45 | 64.081.043.660.000.000 |
| Ford Fiesta | 2 | 5 | 57 | 13 | 1.190.784 |
| Renault Megane | 2 | 6 | 52 | 14 | 3.451.968 |
| Mercedes C-Class | 2 | 16 | 312 | 59 | 1.131.454.740.000.000.000.000 |
| Toyota Yaris | 2 | 6 | 30 | 8 | 34.320 |
| Fiat Stilo | 3 | 7 | 93 | 25 | 10.854.698.500 |
| Mercedes E-Class | 2 | 15 | 285 | 70 | 3.347.807.348.000.000.000.000.000 |
| Toyota Corolla | 4 | 5 | 24 | 6 | 162.752 |
| Nissan Micra | 2 | 6 | 30 | 4 | 676 |
| Mini (BMW) | 1 | 5 | 418 | 44 | 50.977.207.350.000.000 |
| Nissan Almera | 3 | 5 | 30 | 5 | 3.036 |

Abb. 3.12: Theoretische Varianz ausgewählter Fahrzeuge (nach [PH04], S. 395).

3.5.3 Strategien des Variantenmanagements

Vor dem Hintergrund des Zeithorizonts können grundsätzlich drei generische Strategien zur Durchführung eines effizienten Variantenmanagements unterschieden werden: die Strategie der Komplexitätsreduzierung, der Komplexitätsbeherrschung und der Komplexitätsvermeidung, wobei laut *Wildemann* diese Strategien aus ökonomischer Sicht immer konsekutiv zu prüfen sind, also in zeitlicher Reihenfolge aufeinander aufbauend durchgeführt werden sollten ([Wil09], S. 379).

Komplexitätsreduzierung

Die Ansätze zur Komplexitätsreduzierung haben zum Ziel, das bestehende Produkt- und Ausstattungsprogramm zu straffen und gegebenenfalls auszudünnen. Diese reaktive Beeinflussung des Komplexitätsgrades in Form einer „Aufräumaktion“ eines schon in der Marktphase befindlichen Produkts bzw. eines Ausstattungsprogramms ist auf kurzfristige Sicht wirksam. Meist steht im Rahmen dieser Vorgehensweise die Klärung der Frage, wie sich unattraktive Kleinkunden bzw. exotische Produktvarianten auf das Gesamtergebnis auswirken. Anhand einer Cluster-Analyse

bzw. einer umsatzorientierten ABC-Analyse der Kunden können die jeweiligen Kosten und Deckungsbeiträge identifiziert und auf signifikante Unterschiede hin verglichen werden. Steht bei einem Kunden ein relativ geringer Deckungsbeitrag einem relativ hohen Aufwand gegenüber, kann dieser weiter untersucht werden und gegebenenfalls mit Mindestauftragsmengen konfrontiert bzw. die Geschäftsbeziehung gekündigt werden. Die europäische Automobilindustrie ist dadurch geprägt, dass neben der Basisausstattung eine Vielzahl an variantengenerierenden Sonderausstattungen angeboten wird. Es ist für die Angebotspolitik somit generell zu überlegen, ob Ausstattungsvarianten, die von 70 oder 80 Prozent der Kunden gewünscht werden, zum standardisierten Angebot erklärt werden. Bezüglich des Produktprogramms lassen sich mit ABC-Analysen Informationen hinsichtlich des Deckungsbeitrags und der Kosten gewinnen. Mit Hilfe der Positionierung im Marktanteils-Marktwachstums-Portfolio können kritische Produkte bzw. Varianten identifiziert und entweder profitabel gestaltet oder eliminiert werden (vgl. [Sch95b], S. 762, [Wil09], S. 380 ff.).

Im Rahmen einer Leistungstiefenoptimierung wird versucht, durch die Vergabe von kompletten Funktions- und Montagemodulen an Zulieferer (Modular and System Sourcing) eine Reduktion der Fertigungstiefe anzustreben. Durch die Vergabe von wertschöpfenden Tätigkeiten an Zulieferunternehmen kann sich somit eine Komplexitätsreduzierung im Unternehmen ergeben, da Teile der Produktentwicklung und -produktion auf die Lieferanten abgewälzt werden können ([Wil09], S. 377).

Komplexitätsbeherrschung

Können komplexitätsreduzierende Maßnahmen nur bedingt realisiert werden und ist die vorhandene Variantenvielfalt in ihrem Umfang zwingend erforderlich, sollte in einem nächsten Schritt versucht werden, die vorhandene Komplexität möglichst effizient zu beherrschen. Anhand von organisatorischen und produktionstechnischen Maßnahmen zielt die Strategie der Komplexitätsbeherrschung auf die Beschleunigung des Materialflusses und folglich auf eine Verkürzung der Durchlaufzeit sowie auf eine Optimierung des Handlings-, Rüst- und Steuerungsaufwands ([Wil09], S. 380). Um das Ziel einer möglichst hohen externen, kundenwirksamen Produktvielfalt anhand einer möglichst geringen, internen Produkt-, Teile- und Prozessvielfalt zu ermöglichen, wird versucht, die bestehenden Prozesse und Systeme innerhalb des Unternehmens anhand geeigneter Werkzeuge zu vereinfachen. Gegensätzlich zu den Strategien der Vermeidung und der Reduzierung von Komplexität unternimmt der Ansatz der Beherrschung den Versuch, ein vorhandenes Marktangebot konstant zu halten, die zur Darstellung dieses Angebots benötigten unternehmensinternen Vorgänge jedoch möglichst effizient und somit schlank und übersichtlich zu gestalten. Als wichtige Maßnahmen seien hier exemplarisch die Fertigungssegmentierung und die Verschiebung des Variantenbestimmungspunkts in Richtung Ende der Wertschöpfungskette genannt (vgl. [Sch95b], S. 764; [Wil09], S. 387).

Unter Fertigungssegmentierung versteht man die modulare Gestaltung der Produktionsbereiche. Ziel ist es, eine ablauforganisatorische Differenzierung der Fertigung zu erreichen, wobei ein einzelnes Segment eine produktorientierte Organisationseinheit darstellt, deren Produktionsfaktoren sowohl organisatorisch wie auch räumlich zusammengefasst werden können. Ein Fertigungssegment stellt im Idealfall ein selbstregulierendes, dezentrales Subsystem dar, das nur sehr

wenige, jedoch intensive Leistungsverflechtungen zu den anderen Segmenten aufweist. Das Ergebnis ist ein transparenter Wertstrom ([Wil09], S. 386).

Im Vergleich zu einer herkömmlichen Fabrik verursacht ein Anstieg der Varianten in einer segmentierten Fabrik einen geringeren Anstieg der variantenabhängigen Kosten. Eine größere Variantenvielfalt bei niedrigeren Preisen ist die Folge und somit eine verbesserte Wettbewerbsposition gegenüber den Konkurrenten (vgl. [Wil09], S. 387).

Ziel der Verschiebung des Variantenbestimmungspunkts ist es, eine möglichst lange variantenneutrale Produktion zu gewährleisten.⁵ Der Variantenbestimmungspunkt, auch „Freeze-Point“ genannt, beschreibt den Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess, an dem das bis dato noch standardisierte Produkt variantenspezifisch ausgelegt wird.⁶ Eine Verschiebung des Variantenbestimmungspunkts kann laut *Wildemann* durch kurzfristige Konstruktionsänderungen am Produkt, durch Änderungen bezüglich der Ablauforganisation oder verfahrenstechnische Wechsel erreicht werden ([Wil98], S. 47 ff.). Das damit verfolgte Ziel ist es, die Bestände in der Produktion zu senken, wie auch den logistischen Aufwand zu minimieren. Durch eine möglichst lange variantenneutrale Produktion ist die Produktion nicht mehr direkt der Volatilität des Marktes ausgeliefert und gewinnt somit an Prognosesicherheit und kann folglich höhere Auslastungsgrade erzielen. In der Automobilproduktion bedeutet dieser Aufschub, dass außer der Karosserieform und der Außenfarbe die Mehrheit der Variantenbildung in der Endmontage erfolgt.

⁵ Als Late-Configuration-Strategie bezeichnen Stäblein; Holweg; Miemczyk eine Strategie, bei der versucht wird, den Variantenbestimmungspunkt möglichst nahe an die Produktübergabe an den Kunden zu positionieren. Diese Strategie findet sehr oft Anwendung in der Automobilindustrie, speziell im Bereich des hartumkämpften Kleinwagensegments. Beispiel Toyota: Die Distributionszentren werden bei Toyota gezielt genutzt, um an diversen Fahrzeugen vor Ort wertschöpfende Tätigkeiten durchzuführen, die schließlich zu einer Kundenindividualisierung führen (z. B. das Einbauen eines Radios, das Anbringen von Interieurteilen, in einigen Fällen auch das nachträgliche Einfräsen eines Schiebedachs). Ziel dieser Tätigkeiten ist es, dass die Produktionsstätten ausschließlich standardisierte Produkte fertigen und diese dezentral individualisiert werden (vgl. [JSH⁺11], S. 356 f.).

⁶ Der Freeze-Point ist ein weiterer Ausdruck für den Variantenbestimmungspunkt, auch Differenzierungszeitpunkt genannt. „Freeze“ soll in diesem Zusammenhang verbildlichen, dass das Produkt nun variantenspezifisch ist und seine standardisierte Flexibilität verloren hat (vgl. dazu [Kai06], S. 151).

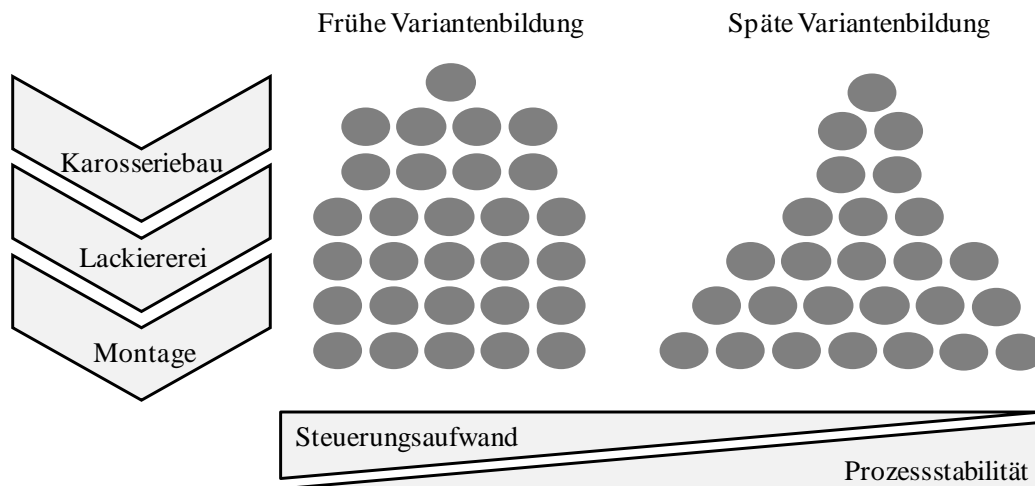


Abb. 3.13: Kostenwirksamkeit der Variantenbildung (nach [Klu10], S. 56)

Nachteilig wirkt sich dies jedoch auf die Austaktung der Montagelinie aus, da diese mit zunehmender Variantenvielfalt und den darin begründeten unterschiedlichen Arbeitsumfängen pro Takt immer schwieriger festzulegen ist ([Ihm06], S. 336).

Komplexitätsvermeidung

Eine auf langfristige Sicht wirksame Vorgehensweise ist die präventive Vermeidung von Komplexität. Sie setzt bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung ein und versucht, die Entstehung einer kostenintensiven Vielfalt zu vermeiden. Eine zu starke Einschränkung des Angebots aufgrund von Komplexitätseinsparungszielen kann jedoch auch zu einem geringeren Produktabsatz führen und somit ein Unternehmensrisiko darstellen. Unternehmen müssen Strategien verfolgen die sowohl eine Individualisierung nach außen wie auch eine Standardisierung nach innen gewährleisten. Um diese Gratwanderung zwischen notwendiger Differenzierung und Standardisierung zu erreichen, werden im Folgenden Komplexitätsvermeidungsstrategien in der Entwicklung und im Fertigungsprozess vorgestellt.

Während der Entwicklungsphase eines Produkts ist der Wirkhebel von komplexitätsvermeidenden Aktionen am höchsten. Im Laufe dieser Phase wird der Großteil der Produktkosten festgelegt ([EKL07], S. 10 ff.). Eine genaue Darstellung des Kostenbeeinflussungspotenzials liefert Abb. 3.14:

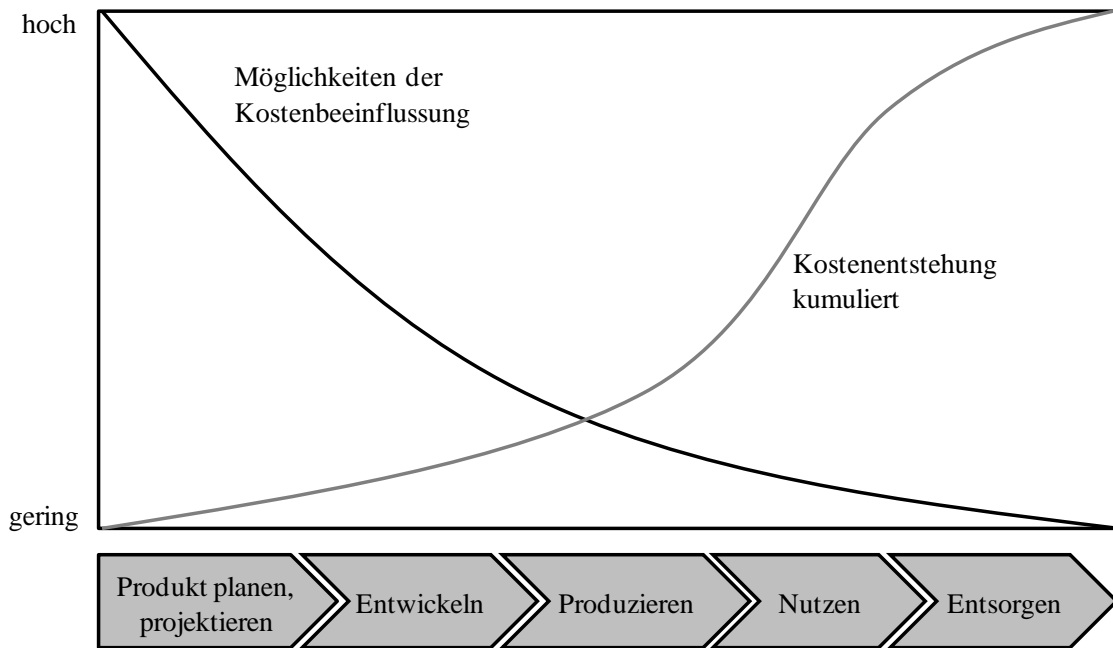


Abb. 3.14: Kostenbeeinflussungspotenzial und kumulierte Kostenentstehung (nach [EKL07], S. 10)

Von zentraler Bedeutung ist daher, über die Wünsche und Präferenzen der Kunden informiert zu sein bzw. diese gezielt zu erweitern, um eine kundenorientierte Produktplanung sicherzustellen. Für die Erforschung der Kundenwünsche eignet sich die Conjoint-Analyse. Im Rahmen eines Quality Function Deployment (QFD) wird folglich versucht, die Kundenwünsche in die „Sprache der Technik“ zu übersetzen. Ziel dieser Methode ist es, dass die Stimme des Kunden Anklang in allen Ebenen des Produktentstehungsprozesses findet und in der Folge sichergestellt werden soll, dass technisch reizvolle Lösungen, welche jedoch die Kundenerwartungen nicht erfüllen bzw. verfehlen, nicht betrachtet werden ([Wil09], S. 395). Der eigentliche Entwicklungsprozess kann anhand von Methoden wie dem Simultaneous Engineering, dem Rapid-Prototyping, der Integration von IT-Tools wie CAD mit CAM und CAE, der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und des Design for Manufacturing bzw. Design for Assembly unterstützt werden. Das gemeinsame Ziel dieser Ansätze ist eine rasche Entwicklung bei frühzeitiger Erkennung von Fehlern unter Berücksichtigung einer hohen Prozessorientierung.

Komplexitätsvermeidungsstrategien im Fertigungsprozess sind aktuell in der Praxis von hoher Relevanz. Vor allem in Industrien mit variantenreicher Fertigung finden diese Strategien einen sehr verbreiteten Einsatz. Wildemann unterscheidet in diesem Zusammenhang Bündelungsstrategien von Spaltungsstrategien ([Wil08b], S. 70), welche in Abschnitt 3.6 gesondert betrachtet werden.

Abb. 3.15 fasst die genannten Strategien des Variantenmanagements zusammen und weist dabei explizit auf das Beeinflussungspotenzial der jeweiligen Strategien hin. Mittels komplexitätsreduzierender Maßnahmen kann auf kurzfristige Sicht nur „symptomatisch ausgebeSSERT“ werden, da schon hohe Investitionen getätigt wurden, welche als „sunk costs“ nicht mehr rekaptalisiert werden können. Präventive Maßnahmen im Rahmen der Komplexitätsvermeidung stellen hingegen das größte Wirkpotenzial zur Verfügung. Allen Ansätzen gemein ist das Ziel, die unternehmensinterne Variantenvielfalt zu reduzieren und externe Leistungsvarianz zu ermöglichen.

| | Strategie | Methoden |
|-------------------------|---|---|
| Beeinflussungspotential | Komplexitätsreduzierung „Heute“ | <ul style="list-style-type: none"> • Reduktion der Kundenbreite/des Produktportfolios <ul style="list-style-type: none"> ➢ ABC-Analyse ➢ Cluster-Analyse • Leistungstiefenoptimierung → Modular and System Sourcing |
| | Komplexitätsbeherrschung „Morgen“ | <ul style="list-style-type: none"> • Fertigungssegmentierung • Verschiebung des Variantenbestimmungspunkts → „Late Configuration“ |
| | Komplexitätsvermeidung „Langfristig“ | <ul style="list-style-type: none"> • Maßnahmen in der Fertigung <ul style="list-style-type: none"> ➢ Bündelungsstrategien ➢ Spaltungsstrategien • Maßnahmen in der Entwicklung <ul style="list-style-type: none"> ➢ Conjoint-Analyse, QFD ➢ Simultaneous Engineering ➢ Rapid Prototyping ➢ FMEA, DFM, DFA |

Abb. 3.15: Strategien und Methoden des Variantenmanagements

Aufgrund der hohen Aktualität und des hohen Beeinflussungspotenzials von Komplexitätsvermeidungsstrategien werden im Folgenden Maßnahmen zur Produktstrukturierung vorgestellt.

3.6 Maßnahmen der Produktstrukturierung

Schuh versteht unter einer Produktstruktur „die strukturierte Zusammensetzung des Produktes aus seinen Komponenten. Baugruppen und Einzelteile führen dabei zu Strukturstufen, indem sie Komponenten auf tieferer Ebene in der Produktstruktur zusammenfassen.“ ([Sch05b], S. 119). *Rapp* definiert Produktstruktur als die Anordnung von funktionalen Elementen, deren Zuordnung zu Bauteilen oder Komponenten sowie die Spezifikation der Schnittstellen zwischen den Komponenten ([Rap99], S. 9 ff.). Somit kann die Produktstruktur als Komplexitätsindikator eines Produkts herangezogen werden ([Ren07], S. 16). Durch präventive komplexitätsvermeidende Maßnahmen wird versucht, die technische Vielfalt durch Maßnahmen am Produkt selbst zu reduzieren. Dadurch können Mengen- und Zeiteffekte im Unternehmen realisiert werden ([Sch05b], S. 120).

Tab. 3.3 soll einen einleitenden Überblick über mögliche technische Maßnahmen zur Komplexitätsvermeidung in der Produktstruktur geben. Dabei verfolgen alle Stoßrichtungen grundsätzlich das Ziel, Produkte so zu konzipieren, dass mit kleiner interner Varianz eine große Vielfalt für den Kunden erreicht werden kann. Die Herausforderung besteht folglich darin, in einem Spannungsfeld zwischen Standardisierung und Individualisierung das Produktprogramm so auszugestalten, dass sowohl die Kundenwünsche optimal erfüllt als auch die Effizienzpotenziale der Standardisierung genutzt werden können ([Wil09], S. 451).

Tab. 3.3: Technische Maßnahmen zur Verringerung der Teilevielfalt (nach [Sch05b], S. 125 ff.; [Boh98], S. 241 ff.)

| | |
|-------------------|---|
| Normteile | Normteile verwenden |
| Kaufteile | Kaufteile verwenden (werden ohnehin meist in großen Stückzahlen verwendet) |
| Wiederholteile | Gleiche Teile in unterschiedlichen Produkten verwenden |
| Gleichteile | Möglichst viele gleiche Teile in einem Produkt verwenden |
| Übernahmeteile | Übernahme von Komponenten aus dem Vorgängerprodukt |
| Integralbauweise | Umgestaltung mehrerer Teile zu einem Teil |
| Baureihen | Vermeidung von Sonderkonstruktionen bei Produkten gleicher Funktion |
| Baukastensystem | Mehrfachverwendung von Teilen und Baugruppen |
| Module | Verwendung von Anbauteilen unterschiedlicher Funktion, aber einheitlicher Schnittstellen |
| Plattformen | Standardisierte technische Basis für mehrere Produkte |
| Badge-Engineering | Entwicklung von baugleichen Produkten, z. B. in einem Joint Venture; Vertrieb unter verschiedenen Markennamen |

Wie bereits festgestellt wurde, können Produktstrukturierungsansätze in Spaltungs- und Bündelungsstrategien unterteilt werden, deren verschiedene Ausprägungen im Folgenden genauer betrachtet werden.

3.6.1 Spaltungsstrategien

Im Rahmen der Spaltungsstrategien wird versucht, das Produkt top-down in verschiedene Elemente zu zerlegen. Ziel dieser Spaltung ist es, die komplexe Gesamtaufgabe in komplexitätsreduzierende, voneinander abgeschlossene Aufgabenpakete zu unterteilen, die sich durch eine hohe Autonomie bezüglich ihres Funktionsumfangs auszeichnen. Durch den hohen Autonomiegrad und die geringen Interdependenzen zwischen den Teilaufgaben können die mit dem Produkt verbundenen Prozesse und Organisationseinheiten voneinander unabhängig arbeiten und verhindern

dadurch lange Fehlerschleifen. Modulstrategien gehören neben den Systemstrategien zu den Spaltungsstrategien.

Modularisierung

Grundsätzlich kann der Begriff Modularisierung aus drei verschiedenen Perspektiven betrachtet werden: Modularisierung in Design, Produktion und Organisation ([Dor03], S. 318). In dieser Arbeit wird das Augenmerk auf das Produktgestaltungsprinzip der Modularisierung gerichtet. Diese Designstrategie findet Anwendung in einer Vielzahl von Wirtschaftszweigen: von Luftfahrt, Automobil über Computer und Software bis hin zu Haushaltsgeräten ([Fre06], S. 168). Nach der Definition von *Pahl* ist ein Modul eine autarke, funktional und physisch beschreibbare Einheit, welche von Veränderungen in anderen Teilen des Systems weitgehend unabhängig ist. Unter dem Konstruktions- bzw. Entwicklungsprinzip „Modularisierung“ wird folglich die Gestaltung von Produkten und Komponenten durch die Kombination von substituierfähigen Modulen verstanden, welche durch definierte Schnittstellen miteinander verbunden sind ([PBF*05], S. 685 f.). Im Kontext der Automobilindustrie ist ein (Haupt-)Modul als physische Verbindung von Einzelteilen zu einer abgrenzbaren und einbaufertigen Entität definiert, wobei diese Einzelteile wiederum (Sub-)Module darstellen können ([Jun05], S. 14). Eine Übersicht über die mögliche Unterteilung eines Automobils in Haupt- und Submodule liefert Abb. 3.16. Der Großteil der Module wird von Zulieferern bereits vormontiert, funktionsgeprüft und einbaufertig an das Montageband des OEM geliefert. Die Modularisierung im klassischen Verständnis orientiert sich folglich an den gegebenen Rahmenbedingungen und Erfordernissen der Produktion.

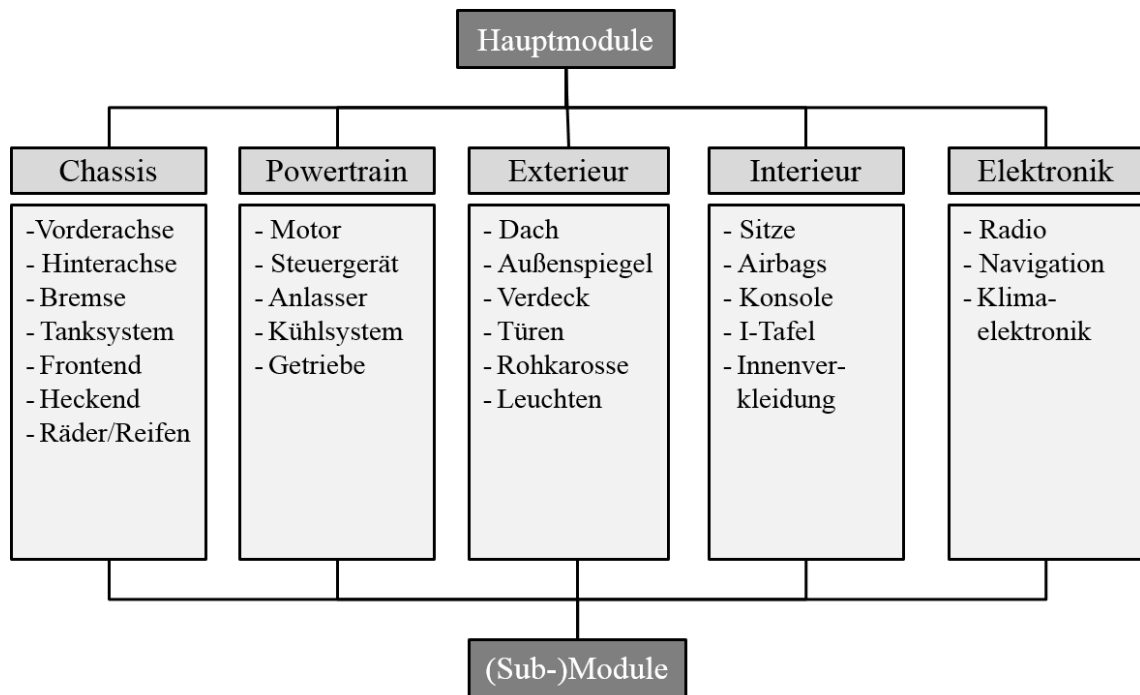


Abb. 3.16: Haupt- und Submodule eines Automobils (nach [HB08], S. 136)

Innerhalb der Produktstruktur ist die Modulbauweise als prozessorientierter Ansatz zur Komplexitätsvermeidung anzusehen: Mit der Unterteilung des Fahrzeugs in abgrenzbare Einheiten, die unabhängig voneinander entwickelt, produziert und beschafft werden können, kann die Komplexität im Unternehmen reduziert werden. Dieses komplexitätsreduzierende Potenzial äußert sich insofern, dass die Anzahl an Verknüpfungen sowohl innerhalb des Produktes als auch in der Organisation des Anbieters verringert wird (vgl. [Ren07], S. 70 f.). Auch in der Produktion kann ein niedrigeres Komplexitätsniveau aufgrund der verringerten Anzahl an Montageteilen und Störungen im Fertigungsprozess (z. B. durch Umrüsten) realisiert werden (vgl. [Rat93], S. 109 f.). Laut Rathnow liegt ein wesentlicher Stellhebel zur Beherrschung der internen Komplexität in der Frage, welche Elemente des Enderzeugnisses das Unternehmen selbst herstellt und welche Umfänge von Dritten bezogen werden sollen ([Rat93], S. 115). Für alle Leistungsprozesse, die nicht zur Kernkompetenz gehören, bietet es sich an, strategische Outsourcing-Überlegungen anzustellen ([Sch05b], S. 72). Durch die Nutzung externer Lieferanten können vor allem direkte Komplexitätskosten langfristig reduziert werden, da durch eine geringere Eigenleistungstiefe Ressourcen eingespart werden können ([Sch05b], S. 71 f.). Es besteht allerdings die Gefahr, in der Modularisierung eine Wunderwaffe zur Vermeidung von vielfaltsbedingter Komplexität zu sehen, da dem Nutzen der größeren Modularität erhöhte Kosten in der Produktentwicklung und höhere Einzelkosten durch Überdimensionierung gegenüberstehen ([Rap99], S. 60).

Systemstrategie

Den zweiten Bestandteil der Spaltungsstrategien stellt die Systemstrategie dar. Äquivalent zur Modularisierung hat auch die Systemstrategie das Ziel, eine Komplexitätsvermeidung durch die Abtrennung abgeschlossener Aufgabenpakete zu erreichen. Im Gegensatz zur Modulstrategie bildet das System eine Einheit, die eine geforderte Funktion vollständig abdeckt, wobei die Komponenten nicht zwingendermaßen zusammen angeordnet sein müssen. Die Forderung nach einer

räumlichen Einheit wie bei einem Modul ist hier somit nicht vorhanden ([Wil09], S. 452). Eine Überschreitung der Fahrzeuggrenzen ist bei einem System möglich, ein typisches Beispiel stellt das Soundsystem dar ([Wil08c], S. 154).

Baukastensysteme

Nach *Kohlhase* existiert keine einheitliche Definition des Begriffs Baukasten oder der darauf basierenden Produktstrukturierung ([Koh97], S. 35). *Wildemann* zählt das Baukastenprinzip allerdings zu den Spaltungsstrategien, welche Definition auch in dieser Arbeit Anwendung findet ([Wil08c], S. 151).

Der Baukasten ist ein gestalterisches Vorgehen, um eine möglichst große Zahl von zusammengesetzten Erzeugnissen durch Kombination aus einer möglichst geringen Varianz von Bausteinen herzustellen. Dabei können Bausteine Einzelteile, Baugruppen oder wiederum ein Baukastensystem höherer Ordnung sein. Darüber hinaus sind Baukästen durch einen oder wenige Grundkörper charakterisiert, in die über verschiedene Montagestufen Anbauteile montiert werden ([Sch05b], S. 128). Zielsetzung der Baukastenbauweise ist eine optimierte Betriebswirtschaft sowie die Unterstützung einer schnellen, ressourcenschonenden Umsetzung bei gleichzeitiger Individualisierbarkeit und spezifischer Anforderungserfüllung der Produkte ([Bie71], S. 10; [Jes97], S. 27; [Ren07], S. 53). Von dieser globalen Definition ausgehend, werden Baukastenstrategien im automobilen Sektor als Gleichteilekonzepte mit der Zielsetzung einer modellübergreifenden Verwendung identischer Teile, Komponenten oder Module präzisiert. Es wird deutlich, dass das Konzept andere technische Maßnahmen (z. B. Integralbauweise, Baureihen, Norm-, Gleich- und Wiederholteile) zur Komplexitätsvermeidung bereits beinhaltet. Folglich weist die Baukastenstrategie ein hohes Potenzial zur Komplexitätsvermeidung auf ([Ren07], S. 41 ff.).

3.6.2 Bündelungsstrategien

Von der Einzelteilbetrachtung ausgehend, versuchen Bündelungsstrategien eine möglichst hohe Anzahl von gleichen Einzelteilen über verschiedene Produkte und Produktgenerationen zu verwenden. Ziel dieser Strategie ist die Erreichung von Skaleneffekten aufgrund der Stückzahlerhöhung. Als Bündelungsstrategien können Gleichteil- und Plattformstrategien angesehen werden. Die Wahl der Bündelungsstrategie ist abhängig von externen Randbedingungen wie Marktbedürfnissen oder Konkurrenzprodukten sowie von internen Faktoren, verkörpert durch bereits bestehende Plattformen oder Fertigungsprozesse ([Wil08c], S. 156). Als ein bekanntes und vor allem erfolgreiches Beispiel einer Plattformstrategie sei hier das Plattformkonzept PQ 35 von Volkswagen erwähnt. In den Jahren von 2003 bis 2008 wurden auf dieser Plattform zwölf Modelle von vier Marken produziert:

| Jahr | PQ35 Plattform: 4 Marken, 12 Modelle |
|------|---|
| 2003 | Audi A3 II |
| 2003 | VW Touran |
| 2004 | VW Caddy |
| 2003 | SEAT Altea |
| 2003 | VW Golf/Rabbit V |
| 2005 | Skoda Octavia II |
| 2005 | SEAT Toledo III |
| 2006 | VW Jetta Vento/Bora |
| 2006 | SEAT Leon II |
| 2007 | VW Eos |
| 2007 | Audi TT II |
| 2008 | VW Tiguan |

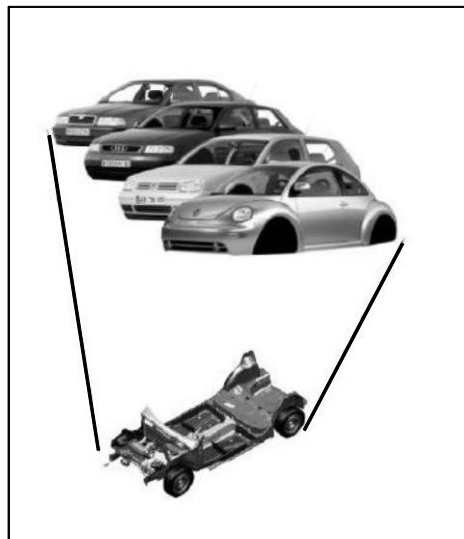


Abb. 3.17: Volkswagen Plattform PQ35 (nach [Stä11], S. 27; [Wan14], S. 413)

Im Gegensatz zur Modularisierung erfolgt die Standardisierung bei dem Plattformkonzept produktfamilienübergreifend ([Rap99], S. 73). Es wird versucht, den Produktstrukturlebenszyklus vom Produktlebenszyklus zu entkoppeln und somit Gleichteile über mehrere Produktgenerationen hinweg einzusetzen ([Sch05b], S. 132).

Nach *Piller und Waringer* ist eine Produktplattform als Entität von zusammengehörenden Baugruppen, Komponenten und Einzelteilen zu verstehen. Diese bilden eine gemeinsame Struktur, welche als Basis für die Entwicklung unterschiedlicher Produkte dient ([PW99], S. 64 f.). Für die Automobilindustrie konkretisiert, wird unter dem Begriff Plattform die Einheit aus Bodengruppe, Fahrwerk, Antriebsstrang, Lenkung sowie Bordnetz aufgefasst. Als Konsequenz bildet eine Plattform die technische Basis eines Automobils und definiert damit die grundlegenden Dimensionen wie Länge, Breite und Radstand der Plattformderivate ([HB08], S. 129). Ziel dieser Bauweise ist es, auf Basis eines Grundbaumusters eine Vielzahl von Fahrzeugen, auch verschiedener Marken, zu entwickeln und anzubieten, welche aufgrund ihres äußeren Erscheinungsbildes eigenständig und verschieden erscheinen ([Jun05], S. 13). Zu diesem Zweck werden an die Plattformen die übrigen Baugruppen und -teile montiert, die durch ihre unterschiedlichen Ausprägungen die verschiedenen Varianten des Endprodukts festlegen. *Ehrlenspiel* bezeichnet die für die kundenindividuelle Differenzierung relevanten Komponenten als sog. „Hüte“ ([EKL07], S. 353).

Bei konsequenter Anwendung dieser Produktstrukturierungsmaßnahme resultieren hohe Einsparpotenziale für den OEM, wie Abb. 3.18 veranschaulicht.

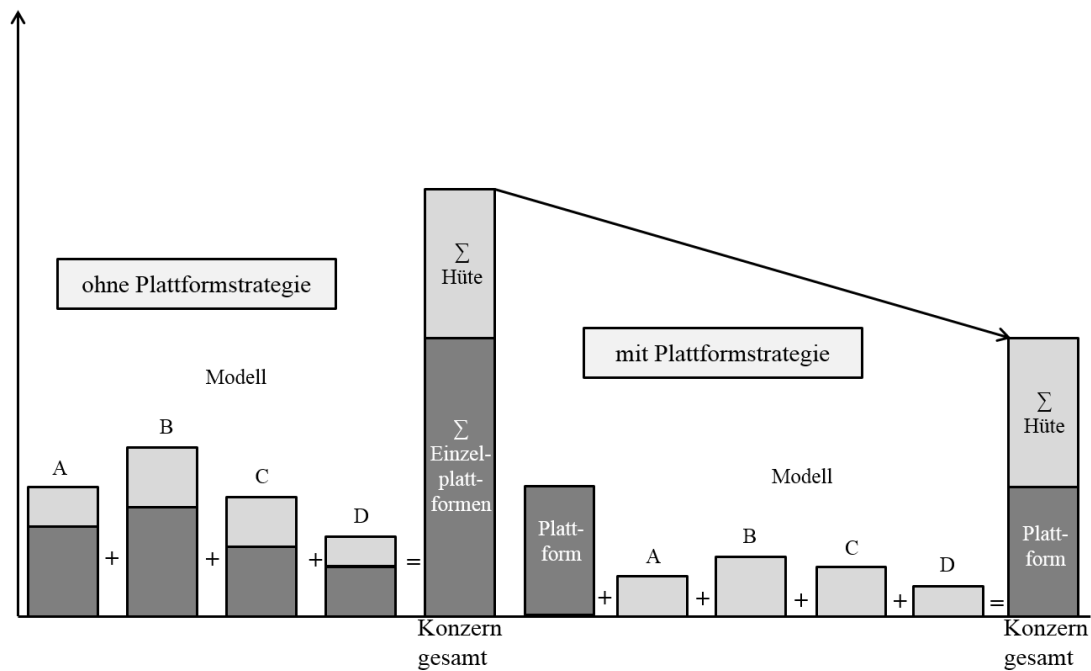


Abb. 3.18: Einsparpotenziale der Plattformstrategie (nach [MBK13], S. 1332)

Die hohen Stückzahlen pro Plattform ermöglichen zudem günstige Einkaufspreise für Kaufteile und Baugruppen. Vor allem aber kann durch das Konzept eine hohe Produktvarianz auf der Marktseite unter optimaler Nutzung von Skaleneffekten über die gesamte Wertschöpfungskette realisiert werden ([Sch05b], S. 133). Als weiteren strategischen Erfolgsfaktor nennt *Boutellier* die Möglichkeit, auf der Basis von Plattformen schneller neue Produkte zu verwirklichen, da in diesem Fall lediglich einzelne Komponenten auf einer Plattform erneuert oder ausgetauscht werden ([Bou97], S. 58).

Die Achillesferse der Plattformstrategie stellt jedoch die unbewusste Erzeugung von Doppelgänger-Produkten dar. Gerade bei technisch weitgehend identischen Derivaten werden preissensible Käufer zur günstigeren Variante tendieren ([Alb07], S. 673). Bei einem breitgefächerten Produktsortiment sind darüber hinaus mehrere Plattformen notwendig, um die verschiedenen Fahrzeugsegmente von Kleinwagen über Offroad-Modelle bis hin zu Oberklasselimosinen abzudecken ([HB08], S. 133).

3.7 Komplexitätsbeherrschung durch Industrie 4.0

Durch technologische Entwicklungstendenzen, die auf eine neuartige Form der Produktionsautomatisierung zielen und die in der deutschen ingenieurwissenschaftlichen und innovationspolitischen Debatte seit längerem unter dem prominenten Label „Industrie 4.0“ thematisiert werden, wird versucht, die steigende Komplexität, welche sich durch verkürzte Produktlebenszyklen, erhöhte Variantenvielfalt und weltweite Lieferströme manifestiert, zu beherrschen [Hir14]. Der Begriff Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution, eine neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Zentrales Merkmal der vierten industriellen Revolution ist die Vernetzung der virtuellen Computerwelt mit der physischen Welt der Dinge durch den Einsatz von cyber-physischen Systemen (CPS).

Produktionssysteme sollen in der Lage sein sich je nach externen Anforderungen weitgehend eigenständig und autonom zu steuern, zu optimieren und zu konfigurieren. Dafür ist es notwendig, auch alle zugehörigen Planungs- und Steuerungssysteme zu berücksichtigen, welche innerhalb genau definierter Grenzen eigenständig Informationen austauschen und selbstständig, also dezentral Entscheidungen treffen sollen. Die Integration der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) der CPS in Produktionssysteme führt zur Entstehung sogenannter cyber-physischer Produktionssysteme im Sinne einer intelligenten Fabrik. Es wird das Ziel verfolgt, Flexibilität und Effizienz nachhaltig zu steigern und eine kundenindividuelle, reaktionsschnelle Produktion trotz dynamischer Rahmenbedingungen zu realisieren [DWH⁺15]. Eine zentrale Eigenschaft von selbstoptimierenden Produktionssystemen ist somit die Fähigkeit, autonom auf komplexe, d. h. sich schnell und häufig ändernde Umweltbedingungen, Benutzereingriffe oder Systemwirkungen reagieren zu können [TE11]. Die oft intransparenten und unvorhersehbaren Effekte erfordern somit ebenso wenig planbares und nicht regelbares hochflexibles Handeln [Hir14].

Die Logistik und das Internet der Dinge gelten als herausragende Anwendungsdomäne der vierten industriellen Revolution [HH14], denn durch die Vernetzung und Datenverfügbarkeit in Echtzeit entsteht die Fähigkeit, zu jedem Zeitpunkt einen optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Konkret würde dies beispielsweise bedeuten, dass Pakete, Paletten und Behälter ebenso wie die Datenpakete im Internet allein ihren Weg von der Produktion bis zum Kunden – und wieder zurück zum Recycling finden [HF08].

Dafür muss aber die Planung und Steuerung von Produktions- bzw. Logistiksystemen grundlegend geändert werden. Das bisher vorherrschende Muster der Produktionsautomatisierung waren sequenzielle und ex ante optimierte Abläufe. Durch Industrie 4.0 erfolgen nun eine laufende Selbstoptimierung intelligenter dezentraler Systemkomponenten und deren autonome Anpassungsfähigkeit an dynamisch sich wandelnde externe Bedingungen in Echtzeit [Hir14]. Insofern wird durch die vierte industrielle Revolution auch ein Wandel von einem deterministischen zu einem stochastischen System vollzogen. Es wird anerkannt, dass es unmöglich ist, die Zukunft vorherzusagen, stattdessen wird auf die dezentralen Entscheidungen der CPS vertraut [HH14].

Zentrale Herausforderung für eine erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 Ansätzen ist die Vernetzung der intelligenten Komponenten und Teilsysteme durch die flächendeckende Verfügbarkeit einer informationstechnischen Infrastruktur in Form von industriell einsetzbaren Internetverbindungen. Außerdem birgt die Filterung der großen Datenmengen eine gewisse Problematik, und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Abläufe autonomer Planungsbereiche aufgrund ihrer Komplexität weitgehend intransparent bleiben [Hir14]. Darüber hinaus ist die Akzeptanz von Industrie 4.0 ein wesentliches Kriterium für eine flächendeckende Umsetzung. Diese steht in einem engen Zusammenhang mit der Sicherheit der Daten, dem Umgang mit der Privatsphäre des Einzelnen und der Technikaufgeschlossenheit [Kag14].

3.8 Zwischenfazit

Angelehnt an die theoretischen Vorüberlegungen dieses Kapitels und die Arbeit von *Rao und Kant* erscheint es sinnvoll, die Komplexität eines Montagewerks in die drei Dimensionen Netzwerk-, Struktur- und Produktkomplexität einzuteilen [Kan94]. Diese Klassifizierung orientiert

sich außerdem stark an der Einteilung von *Maurer* in Markt-, Produkt-, Prozess- und Organisationskomplexität.

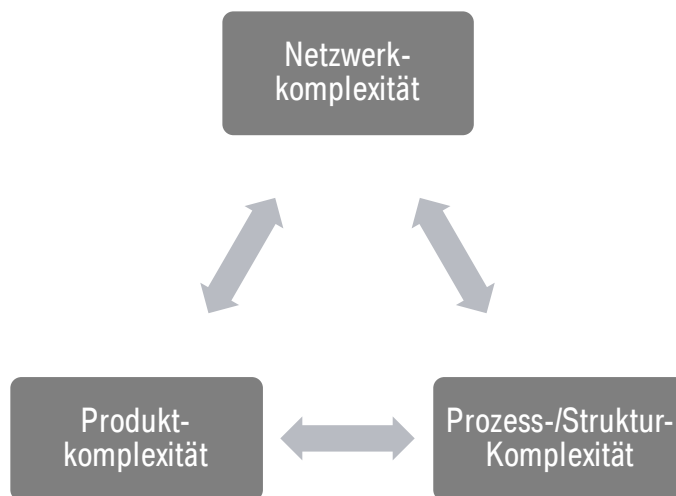


Abb. 3.19: Drei Komplexitätsdimensionen

Als Produktkomplexität wird dabei jene Komplexität bezeichnet, welche sich aus der „(...) Summe von Produkteigenschaften mit jeweils unterschiedlichen Attributen und Abhängigkeiten“ bildet ([Hau05], S. 86). Im Rahmen des Managements von Produktkomplexität kann an drei verschiedenen Ursachenschwerpunkten angegriffen werden ([Sch05b], S. 148). Diese sind das Produktprogramm, die Produktstruktur sowie der Produktlebenszyklus. Das Produktprogramm legt das Leistungsangebot fest, welches auf dem Markt zur Verfügung stehen soll. Es wird intern durch die Produktstruktur mit Teilefamilien und Sachnummern abgebildet ([Sch05b], S. 148). „(Die Produktstruktur) ist Ausgangspunkt und bedeutende Eingangsgröße für alle weiteren Prozessgestaltungsüberlegungen eines Unternehmens und determiniert eine Vielzahl von Logistikleistungen und Logistikkosten. Die Kombination der Einzelteile und Baugruppen bestimmt die Komplexität des Produktes und setzt den produktionslogistischen Aufwand fest (...)“ ([Plü03], S. 178f). Produktkomplexität entsteht somit aufgrund unternehmensinterner Faktoren und kann vom Unternehmen selbst beeinflusst werden, sie wird aber ebenso von externen Treibern über den Absatzmarkt getrieben [Mar07]. Die Auswirkungen der Produktkomplexität entfalten sich außerdem in einer Veränderung der Beschaffungskomplexität. So wirkt sich beispielsweise eine Ausweitung des Produktprogramms auch auf das Lieferantennetzwerk aus und führt zu einem Mehraufwand bei der Güterabwicklung im Werk. Die Produktkomplexität hat weiterhin einen internen Einfluss auf die Strukturkomplexität, denn durch Änderungen im Produktprogramm müssen auch immer strukturelle Anpassungen vorgenommen werden.

Netzwerkkomplexität beschreibt im Rahmen dieser Arbeit die Komplexität des Beschaffungsmarkts wie auch die Materialversorgungskomplexität auf dem Werksgelände bis an das Montageband. In erster Linie ist die Logistikkomplexität des Lieferantennetzwerkes gemeint, die durch Markt, Wettbewerb und Kunden beeinflusst wird und den Transport vom Zulieferer zum Wareneingang des OEM fokussiert. Da diese Faktoren sich primär auf den Beschaffungs- und Absatzmarkt auswirken, wird dieser Teil der Netzwerkkomplexität in Abb. 3.20 der externen Komplexität zugeordnet (Beschaffungsmarktkomplexität), welche alle lieferantenbezogenen Ei-

genschaften beinhaltet. Da die Netzwerkkomplexität im Rahmen dieser Arbeit auch die Materialbereitstellungskomplexität mit Blick auf die Versorgung des Montagebandes betrachtet, werden hier unternehmensinterne Faktoren ebenfalls berücksichtigt (Beschaffungsprozesskomplexität). In der Literatur zählt *Kirchhof* die Komplexität des Netzwerks mit den markt- und wettbewerbsbezogenen Treibern zur externen Komplexität [KS03]. Der Autor bezieht sich hierbei auf die komplexen Prozesse, die für die Unternehmensversorgung mit Rohstoffen und Ressourcen notwendig sind. Andere Autoren ordnen der Beschaffungskomplexität auch unternehmensinterne Ursachen zu [WBA06], [Mey07].

Bei der Struktur-/Prozesskomplexität handelt es sich um jene Unternehmenskomplexität, welche die physischen Werksstrukturen beinhaltet und sich in den internen Prozessen widerspiegelt. Sie befasst sich außerdem mit der Gebäudestruktur eines Montagewerks und wird entsprechend der Treiberklassifikation des vorangegangenen Kapitels von unternehmensinternen Faktoren angetrieben. In Abb. 3.20 werden diese Zusammenhänge der Struktur-, Produkt- und Netzwerkkomplexität dargestellt. Diese Kategorien dienen als Orientierungsrahmen für das zu entwickelnde Komplexitätsmodell.

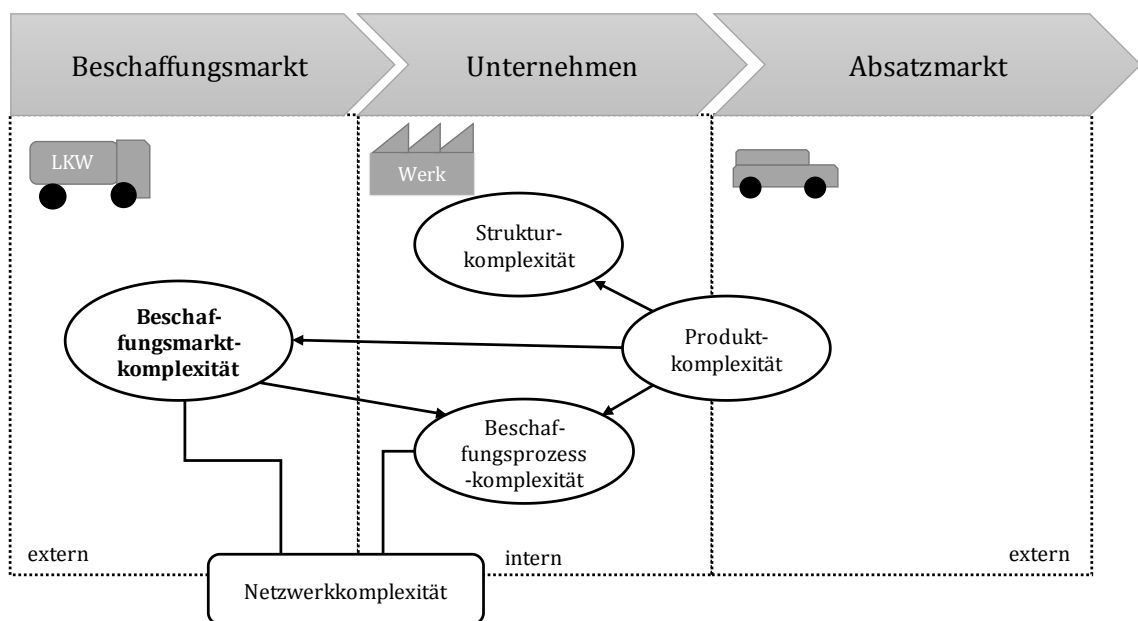


Abb. 3.20: Unternehmenskomplexität in Anlehnung an [Gie10]

4 Stand der Forschung zur Operationalisierung von Komplexität

Als Grundlage für die Entwicklung einer Methodik zur Komplexitätsbewertung in der Logistik von Montagewerken dienen bereits vorhandene Vorgehensweisen aus der Literatur. Die umfassende Literaturanalyse zeigt jedoch, dass kein einheitliches Maß zur Messung von Komplexität existiert, die verschiedenen Ansätze sind vielmehr auf spezifische Probleme angewendet (vgl. [SL15], S. 2; [Mas10], S. 261). Daher werden im folgenden Kapitel bereits existierende Ansätze zur Operationalisierung von Komplexität diskutiert.

Die ersten Anstrengungen, Komplexität quantitativ zu ergreifen, gelangen *Kolmogorov* und *Chaitin* im Jahr 1965. Beide kamen zu dem Ergebnis, dass „die Komplexität eines Systems von Zeichen mit der Länge des kürzesten Programms verknüpft ist, das dieses System reproduziert“ ([EFS98], S. 25). Diese Idee kann am Beispiel einer binären Ziffernfolge p mit der Länge $l(p)$ erläutert werden:

$p = 0000101010000101010111 \dots$

Diese Folge wird von einem Programm q mit Hilfe eines Algorithmus, einer rekursiven Funktion F oder Sprache generiert ($p = F(q)$). Die algorithmische Komplexität einer Folge p ($K_F(p)$) definiert Kolmogorov dementsprechend als die minimal benötigte Länge des Programms q ([EFS98], S. 25):

$$K_F(p) = \min l(q)$$

Mit $F(q) = p$

Hieraus kann die Komplexität einer Folge beschrieben werden als:

- gering, falls die Folge periodisch ist (z. B. 1001001001001...), da sie mit einem einfachen Programm generiert werden kann.
- geht hoch, falls die Folge unregelmäßig ist (z. B. 1010001100110...), da kein Programm geschrieben werden kann, das kürzer ist als die Länge der Folge ([EFS98], S. 26).

Die algorithmische Komplexitätsdefinition birgt jedoch aus mathematischer Sicht einige Probleme. Eines davon ist die Tatsache, dass es keinen Algorithmus gibt, um die algorithmische Komplexität berechnen zu können. Außerdem ist die Definition problematisch in Bezug auf die natürliche Intuition, welche es nicht erlaubt, dass eine zufällig generierte Folge eine maximale Komplexität aufweist ([EFS98], S. 26). *Sinha* stellt in seiner Forschungsarbeit einen mathematischen Ansatz zur Quantifizierung struktureller Komplexität auf. Hierin werden Systemkomponenten

und -schnittstellen verwendet, welche durch ihre Anzahl, Reife und Art sowie durch die Systemstruktur charakterisiert sind [Sin14]. Fast alle Versuche, Systemkomplexität zu quantifizieren, hängen jedoch stark von den spezifischen Problemen ab.

Die meisten bereits existierenden Ansätze zur Quantifizierung des Komplexitätsgrades lassen sich den Kategorien Entropie, Vektormodell und Graphentheorie zuordnen ([SL15], S. 2f.), welche im Folgenden analysiert werden.

4.1 Entropie

Die Ursprünge der Entropie stammen aus dem Bereich der Physik. *Rudolf Clausius* führte den Begriff erstmals 1850 zur Charakterisierung thermodynamischer Prozesse ein. Im Verlauf des Forschungsfortschritts erweiterte sich die Bedeutung des Begriffs jedoch, sodass er heute insgesamt den folgenden drei Bereichen zugeordnet werden kann:

- Thermodynamik,
- Statistische Mechanik und
- Informationstheorie [Bli00], [EFS98].

Der Entropiebegriff in seiner aktuellsten Form der Informationstheorie ist auf Shannons Theorie der „Entropie der Information“ zurückzuführen. Durch diese fand die Entropie ihre Bedeutung auch in der modernen Forschung der Kommunikation und Information ([Sha48]; [KR92], S. 924f.). Entropie wird in der Informationstheorie beschrieben als die Menge an Informationen, die zur Beschreibung des Zustandes eines Systems benötigt wird ([SEC⁺06], S. 210). Sie gilt demnach als Maß für den Informationsgehalt und kann zur Berechnung des Unsicherheitsgrades eines stochastischen Prozesses oder Systems herangezogen werden ([KR92], S. 924f.). Mit zunehmender Unsicherheit und Unordnung innerhalb eines Systems erhöht sich dessen Komplexität. Zur Zustandsbeschreibung von hoch komplexen Systemen werden daher deutlich mehr Informationen benötigt als für weniger komplexe Gefüge, was wiederum bedeutet, dass komplexere Systeme eine höhere Entropie haben als weniger komplexe ([SEC⁺06], S. 210). Für Unternehmen als komplexe Systeme ist neben internen Beziehungen vor allem auch das Verhältnis zu ihrem Umfeld von wirtschaftlicher Bedeutung. Bei der Ausweitung des Entropiebegriffs auf Komplexitätseigenschaften sollte deshalb zwischen isolierten und offenen Systemen unterschieden werden ([Bli00], S. 106).

Die Unsicherheit in einem System mit einer endlichen Anzahl an Zuständen/Ereignissen i ($i = 1, \dots, n$) und Eintrittswahrscheinlichkeiten p_i ($p_i \geq 0$), für welches gilt

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \text{ und } \log_2 0 = 0, \quad (4.1)$$

wird durch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen p_i über die Ereignisse erfasst ([SEC⁺06], S. 210). Die Grundform des Konzepts zur Berechnung der Entropie H in einem System S wird durch folgende Gleichung dargestellt ([SEC⁺06], S. 210; [Sha48], S. 11):

$$H(S) = - \sum_{i=1}^n p_i * \log_2 p_i \quad (4.2)$$

Diese Funktion wird charakterisiert durch folgende Eigenschaften ([SEC⁺06], S. 210f; [KR92], S. 925; [EFS98], S. 88):

- H erreicht seinen Maximalwert $\log_2 n$, falls $p_i = \frac{1}{n} \forall i = 1, \dots, n$.
- Wenn $p_i = \frac{1}{n} \forall i = 1, \dots, n$, dann gilt: H ist monoton steigend in n.
- $H = 0$ bei vollständiger Sicherheit, d. h. $p_i = 1 \forall i = 1, \dots, n$.
- $0 \leq H \leq \ln(n)$.
- Die Funktion H ist für beliebige $r \in \mathbb{N}$ bezüglich der Gesamtheit ihrer Argumente p_1, \dots, p_r stetig, d. h. eine infinitesimale Variation der Argumente zieht stets eine infinitesimale Änderung der Funktion H nach sich.
- Die Basis für den Logarithmus ist 2, da hierdurch Bits als Messeinheit erzeugt werden, wobei ein Bit die Menge an Informationen darstellt, die für eine binäre Entscheidung benötigt wird.
- Jede A-priori-Kenntnis über ein Ereignis oder über die bedingten Wahrscheinlichkeiten von Folgeereignissen reduziert H und folglich Unsicherheit.

Ausgehend von dieser Formel können mit entsprechenden Anpassungen individuelle Systeme bewertet werden. Wang *et al.* beispielsweise erweitern die Funktion in dergestalt, dass die Entropie über mehrere Systeme gleichzeitig gemessen wird mit dem Ziel, die Komplexität der Produktvielfalt von verschiedenen Prozessen zu bewerten [WZW⁺11].

$$H_i = H(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iL_i}) = -c \sum_{j=1}^{L_i} p_{ij} * \log p_{ij} \quad (4.3)$$

Hierbei bezeichnet L_i die Anzahl der Zustände in einem zufälligen Prozess i, p_{ij} mit $j = 1, \dots, L_i$ die Eintrittswahrscheinlichkeit von Zustand j in Prozess i und c eine Konstante, welche durch die Basis der Logarithmusfunktion bestimmt wird. Wang *et al.* verwenden \log_2 für die Entropiefunktion, da in diesem Fall $c = 1$ und die Einheit für Komplexität Bit ist.

In ihrer Forschung wird Komplexität auf Stations- und Systemebene hergeleitet, und neben Komplexitätszahlen für das gesamte Produktionssystem kann eine relative Systemkomplexität (RC) aus der tatsächlichen (C) und der maximalen Komplexität (C_{max}) errechnet werden:

$$RC = \frac{C}{C_{max}} \quad (4.4)$$

Frizelle et al. wenden den Entropiebegriff auch im Zusammenhang mit dem Produktionsprozess an [FW95]. Die Entropie repräsentiert hier einen Prozess mit einer bestimmten Anzahl an Zuständen. Diese steigt, wenn sich der Prozess seiner Kapazitätsgrenze nähert. Folglich haben ausgelastete Systeme eine hohe Entropie und damit auch eine große Komplexität.

4.2 Vektorbasierte Komplexitätsmessung

Nach dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Komplexitätsverständnis bildet sich Komplexität aus dem Zusammenspiel vieler Dimensionen. Zur vollständigen Bewertung von Komplexität liegt es deshalb nahe, Komplexität als mehrdimensionale Größe zu betrachten, da eine adäquate Quantifizierung der Komplexität nicht durch eine einzelne Messgröße zu realisieren ist ([SPB⁺06], S. 3). Bereits *Ashby* hat die Möglichkeit aufgezeigt, ein komplexes Netzwerk durch einen Vektor darzustellen. Der Gedanke ist hier, den Gesamtzustand eines Systems über eine Zusammenfassung der Einzelzustände seiner Elemente in Form von Komponenten eines Vektors zu beschreiben ([Ash56], S. 54f.).

Von dieser Möglichkeit macht die Methode der vektorbasierten Bewertung, wie sie von *Windt et al.* vorgeschlagen wird, Gebrauch [WPB08]. Hierbei wird ein konkreter Komplexitätsvektor zur Erfassung der Dimensionen der Komplexität ausgearbeitet. Der Grundgedanke für die Vektordarstellung ist die Vergleichbarkeit verschiedener Systeme und Systemzustände innerhalb eines Systems. Die Differenz zwischen zwei Vektoren repräsentiert den Komplexitätsunterschied $\Delta\mu$ des jeweiligen Systems oder Zustandes anhand einer Ordinalskala [DGE⁺12]. Messwerte einer Ordinalskala können Ausprägungen ordnen, jedoch Abstände nicht interpretieren.

Ebenso wie Komplexität auf verschiedenste Weisen definiert werden kann, besteht auch für die Dimensionen eines Komplexitätsvektors eine Vielzahl an Möglichkeiten. *Kersten et al.* definieren den Vektorraum für die Komplexitätsvektoren als Makro- und Mikro-Ebenen. Hierdurch werden auf der einen Seite jene Treiber abgebildet, welche die Systemkomplexität direkt beeinflussen, und auf der anderen Seite auch solche Treiber, die keinen konkreten Systemelementen zugeordnet werden können, aber ebenfalls die Komplexität beeinflussen. Je nachdem, in welchem dieser beiden Bereiche sich der Vektor schließlich befindet, können Handlungsempfehlungen für spezifische Strukturelemente oder für übergreifende Systemproblematiken ausgearbeitet werden. Der Vektorraum von *Windt et al.* hat anders als der von *Kersten et al.* nicht nur zwei, sondern insgesamt drei Dimensionen und misst die Komplexität eines Produktionssystems. Neben der organisationalen und zeitbezogenen Komplexität wird ebenfalls die Systemkomplexität berücksichtigt, sodass sich aus den drei Ebenen ein Komplexitätswürfel bildet. Jede dieser drei Dimensionen wird durch einen Komplexitätsvektor repräsentiert, was in Abb. 4.1 ersichtlich wird.

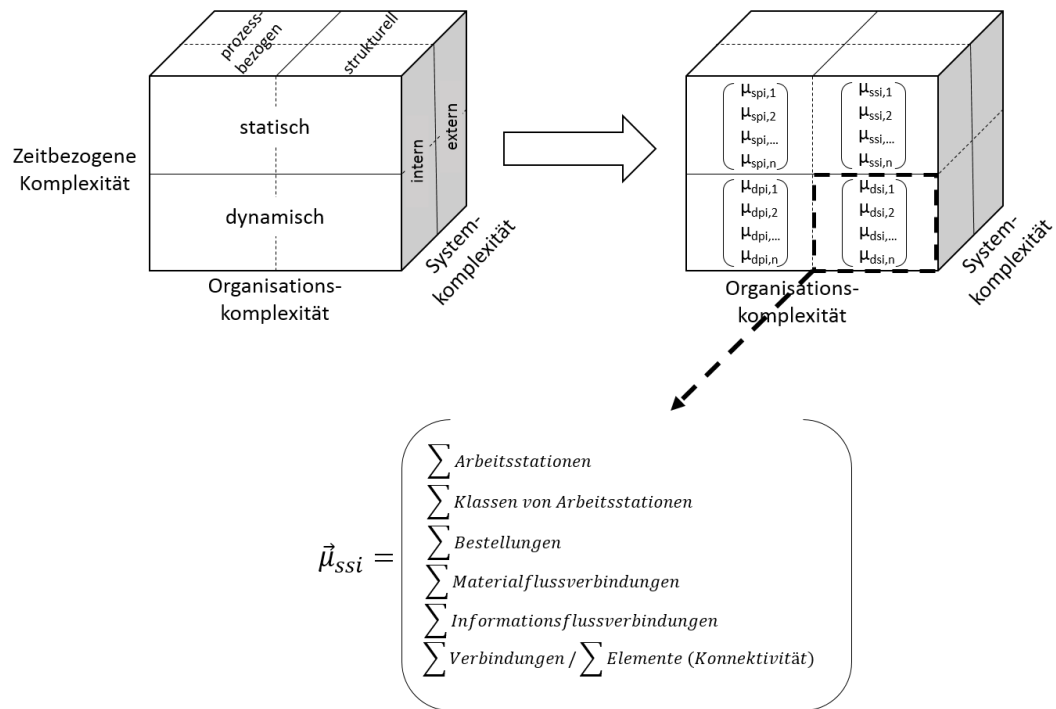


Abb. 4.1: Komplexitätswürfel, nach [WPB08]

Die organisationale Komponente besteht aus prozessorientierter (z. B. Anzahl und Verschiedenheit der Prozessabläufe) und struktureller (z. B. Beziehungen und Bestandteile der Systemelemente) Komplexität. Die zeitbezogene Komplexität teilt sich auf in eine statische (bezieht sich auf fixen Systemzustand zu einem konkreten Zeitpunkt/Zeitperiode) und eine dynamische (charakterisiert Veränderungen bzgl. Anzahl, Verschiedenheit von Prozessabläufen und Systemelementen) Komponente. Die systemische Komplexität wird bestimmt durch die Systemgrenzen und kann in interne und externe Komplexität gegliedert werden. Unter Anwendung dieser Kategorisierung wäre ein Beispiel für interne statische strukturelle Komplexität die Anzahl an Arbeitsplätzen und für externe dynamische prozessbezogene Komplexität die Anzahl an Änderungsanforderungen durch Kunden.

Drei Ebenen definieren auch *Adam* und *Wildemann* für Produkt- und Prozesskomplexität [Ada98]; [Wil08a]. Sie unterscheiden in ihren Forschungsarbeiten zwischen Zielkomplexität, Kundenkomplexität und Variantenkomplexität [Ada98]. Je nach Auftreten der Komplexität kann weiter untergliedert werden in interne und externe Treiber.

Der Ansatz von *Windt et al.* zur Komplexitätsbewertung von Produktionssystemen wird von *Gerschberger et al.* weiterentwickelt und für Lieferantennetzwerke angewendet. Ziel des Papers ist die Operationalisierung von Parametern, die die Komplexität von Lieferantennetzwerken bestimmen und die Identifizierung jener Lieferanten, welche für die Logistikperformance am wichtigsten sind [DGE⁺12]. Unter der Annahme eines konvergierenden Materialflusses wird jede Kunden-/Lieferantenbeziehung durch einen Komplexitätsvektor repräsentiert, welcher im beschriebenen Anwendungsfall aus fünf Komplexitätsparametern besteht. Dem Umstand, dass für verschiedene Unternehmen keine einheitliche Priorisierung der Parameter vorgenommen werden

kann, wird ein Gewichtungsvektor gerechnet. Durch Vektormultiplikation kann dann jenes Netzwerksegment ermittelt werden, auf welches das größte Augenmerk hinsichtlich der Managementaktivitäten gelegt werden sollte.

Scholz-Reiter et al. verwendet den Ansatz eines Komplexitätsvektors im Bereich des Produktionsmanagements, indem er Komplexität durch mehrere, voneinander unabhängige Faktoren operationalisiert. Hier stellen die Vektorelemente messbare Kennzahlen eines Produktionssystems dar. Voraussetzung dafür, dass sich der Komplexitätsvektor für verschiedene Produktionssysteme anwenden lässt, ist die Messbarkeit aller Größen [SPB⁺06]. Messgrößen für strukturelle Komplexität können beispielsweise die Anzahl der Arbeitsstationen, die Anzahl an Materialflussverbindungen oder Montageprozesse sein. Jede Vektorkoordinate spiegelt dann einen Komplexitätsparameter wider, wie beispielhaft in Abb. 4.2 dargestellt ist.

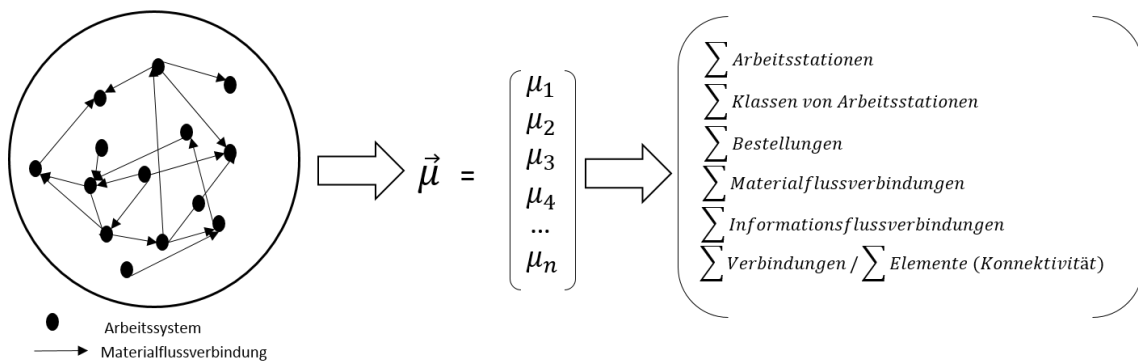


Abb. 4.2: Struktureller Komplexitätsvektor für Produktionssysteme (nach [SPB⁺06])

4.3 Graphentheorie

Graphen spielen in sehr vielen Wissenschaftsbereichen eine wichtige Rolle. Sie dienen unter anderem zur Modellierung von Netzen, wie etwa Computernetzen, Verkehrsnetzen, Telekommunikationsnetzen etc. Die allgemeine Darstellung eines Netzwerkes kann mithilfe von Graphen erfolgen. Elemente werden als Knoten modelliert. Bei den Relationen wird zwischen ungerichteten Verbindungen, wie beispielweise der Topologie, und gerichteten Beziehungen, wie z. B. dem Materialfluss, unterschieden ([Pat82], S. 57 ff.). Parallel dazu ist die Annahme der Graphentheorie in der Forschungsarbeit von *Tarride*, dass ein System bzw. ein Netzwerk, welches aus mehreren Komponenten besteht, folglich eine große Anzahl an Relationen hat und komplexer ist als ein System mit weniger Knoten und Beziehungen [Tar13]. Diese Art der Komplexitätsdarstellung ergibt ein stark vereinfachtes, intuitives und subjektives Bild. Es betrachtet jedoch nicht die Intensität und Gewichtung der Relationen. Da Unternehmensnetzwerke als Anordnung von Knoten (Unternehmen) und Kanten (ökonomische Austauschbeziehungen) aufgefasst werden können, kann eine Analogie zu den strategischen Liefernetzen auf Basis der Graphentheorie hergestellt werden [May00]. Dies ist besonders dann der Fall, wenn nicht nur einzelne Lieferanten zu betrachten sind, sondern komplexe Liefernetze, die sich aus einer großen Anzahl von Unternehmen zusammensetzen.

Becker et al. verwenden ebenfalls die Graphentheorie als Grundlage für ihre Untersuchung eines Produktionssystems und konstruieren einen Messmechanismus für dieses komplexe Netzwerk. Ein Produktionssystem wird in dieser Forschungsarbeit als Graph $G=(V, E)$ definiert, welcher aus Knoten V (Arbeitsplatz) und Kanten E (Materialfluss) besteht. Neben der Gewichtung der Kanten zur Darstellung der Auslastung werden graphentheoretische Kennzahlen wie der Grad, die Betweenness Centrality und der Clusterkoeffizient berücksichtigt. Aber auch klassische Kennwerte für logistische Leistungsfähigkeit wie beispielsweise die Durchlaufzeit, Verspätung und WIP⁷ werden in dem komplexen Netzwerkmodell aufgenommen ([BMW14]).

Meepetchdee und Shah beschäftigen sich in ihrer Arbeit mit den Begriffen Komplexität, Robustheit und Effizienz eines logistischen Netzwerks ([MS07], S. 204 ff.). Sie entwickeln ein mathematisches Modell zur Supply-Chain-Optimierung, mit dem die optimale Standortplanung von Lagern sowie die ökonomischste Belieferung von Kunden berechnet werden kann. Dazu wird eine gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (Mixed-Integer Linear Programming = MILP) verwendet. Als Vorüberlegung zum MILP wird ein logistisches Netzwerk mithilfe von Ansätzen aus der Graphentheorie beschrieben. Alle Bestandteile eines Logistiknetzwerks wie Fabriken, Lager oder Kunden stellen dabei die Knoten oder Ecken des Netzwerks dar. Diese werden durch Kanten miteinander verbunden. Je mehr Kanten ein Netzwerk hat, das heißt je stärker die Knoten untereinander verbunden sind, desto komplexer ist es. Die Komplexität C des Netzwerks berechnet sich durch die Formel

$$C = \frac{E_n}{E_{MST}^*} \quad (4.5)$$

mit E_n Anzahl aller Kanten eines Netzwerks
 E_{MST}^* Minimaler Spannbaum des Netzwerks, d. h. minimale Anzahl an Kanten, die notwendig ist, um alle Knoten miteinander zu verbinden

Ein Beispiel dazu wird in Abb. 4.3 dargestellt. Hier besteht das Netzwerk aus fünf Knoten mit unterschiedlich starken Vernetzungen. Darstellung 1 zeigt den minimalen Spannbaum $E_{MST}^* = 4$. Im Falle der Vernetzung 2 werden die Knoten durch insgesamt $E_n = 8$ Kanten verbunden, woraus sich eine Komplexität von $C = E_n/E_{MST}^* = 8/4 = 2$ berechnen lässt. Analog dazu ergibt sich bei Darstellung 3 mit insgesamt zehn Kanten eine Komplexität von $C = 10/4 = 2,5$. Dieses Beispiel bestätigt die These, dass stärker vernetzte Netzwerke eine höhere Komplexität haben.

⁷ Als Work in Progress (WIP) bezeichnet man alle Halbfertigfabrikate, die sich in einem Produktionsprozess befinden und bereits Rohmaterialien, Arbeitszeit oder sonstige Kosten verbraucht oder verursacht haben.

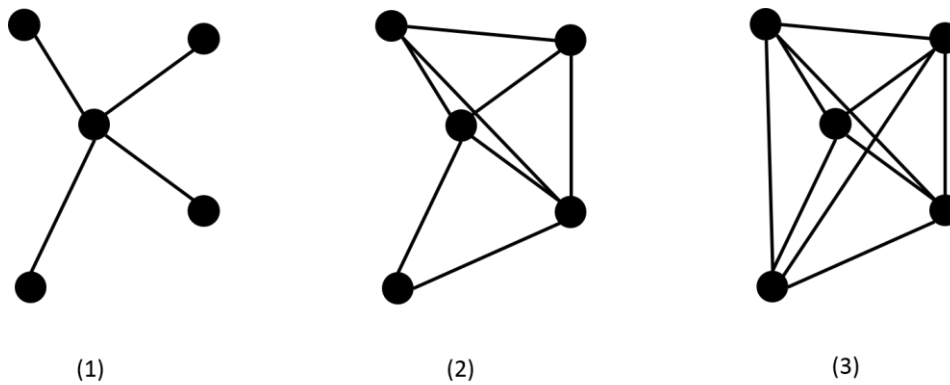


Abb. 4.3: Netzwerkverbindungen

Diese Definition der Komplexität kann auch auf Kosten übertragen werden, woraus sich schließen lässt, dass ein stark vernetztes System höhere Kosten aufweist als ein weniger vernetztes. Unter dieser Annahme wird ein MILP aufgestellt, welches unter dem Ziel der Kostenminimierung die Anzahl und Standorte von Lägern sowie die Zuordnung von Lägern zu Kunden und damit die Komplexität des Netzwerks optimiert [MS07].

4.4 Baumhierarchie

Balzert entwickelt ein Maß zur Bewertung der Komplexität von Softwaresystemen. Zum einen soll ein absolutes Komplexitätsmaß den Umfang der Systemstruktur darstellen, zum anderen ermöglicht ein relatives Komplexitätsmaß Vergleiche zwischen verschiedenen Systemen. Innerhalb eines Systems bestimmt sich Komplexität durch Intersystem- und Intrasystemwechselwirkungen. Die Intersystemwechselwirkungen bezeichnen dabei Relationen zwischen verschiedenen Systemkomponenten. Intrasystemwechselwirkungen hingegen treten innerhalb der jeweiligen Systemelemente selbst auf. Beide Formen der Wechselwirkungen bestimmen die Struktur eines Systems. Eine wesentliche Anforderung an Softwareprodukte ist die Einfachheit, die auch als Mangel an Komplexität bezeichnet werden kann. Ein System ist dann als einfach einzustufen, wenn eine gute Struktur vorliegt. Aus der Systemstruktur können daher Rückschlüsse auf die Komplexität des Systems gezogen werden [Bal81].

Eine Systemstruktur kann als Hierarchie, beispielsweise als Baumhierarchie dargestellt werden. In Abb. 4.4 wird ein Beispiel für eine Baumhierarchie mit Systemkomponenten, welche an den Baumknoten eingehängt werden, dargestellt.

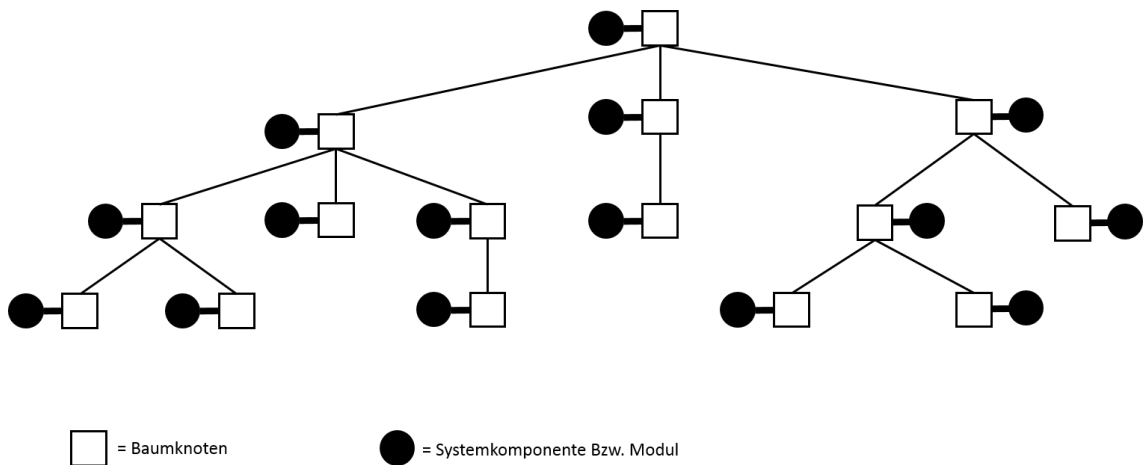


Abb. 4.4: Baumdiagramm mit Systemkomponenten (nach [Bal81])

Zur Quantifizierung der Systemkomplexität definiert *Balzert* die Spanne eines Knotens als Anzahl der direkten Untersysteme (Kinder) sowie sein Spannenmaß.

$$\text{Spannenmaß} = \sum \text{Spannen}^2 \quad (4.6)$$

Daraus werden folgende Thesen abgeleitet:

- Eine kleine Spanne eines Knotens weist auf eine geringe Komplexität bzw. hohe Einfachheit des Systemabschnitts hin. Damit können die Spannen aller Knoten als Komplexitätsmaß interpretiert werden.
- Je mehr Knoten ein System hat, desto komplexer ist es.
- Je höher das Spannenmaß eines Systems ist, desto komplexer ist es.

Aus diesen Thesen entwickelt *Balzert* verschiedene Berechnungsformeln für die Komplexität eines Systems im Bereich der Softwareentwicklung.

4.5 Mathematisch-produktorientierte Ansätze

In der betriebswirtschaftlichen Literatur sind neben den bereits beschriebenen Ansätzen auch Vorgehensweisen zur Quantifizierung von Komplexität vorhanden, die einen mathematisch-produktorientierten Ansatz verfolgen. Dabei liegt der Betrachtungsfokus auf Baugruppen und technischen Varianten, also der Produktstruktur ([WV11], S. 107).

Nach *Marti* wird die interne Komplexität durch die physikalische Komplexität der Komponenten bestimmt, welche den externen Komplexitätsanforderungen in Form von Produktfunktionalitäten gegenübergestellt werden kann. Die physikalische Komplexität kann anhand von vier Dimensionen quantifiziert werden. Der hinterlegte Berechnungsalgorithmus berücksichtigt die Bauteileanzahl, Variantenanzahl, Schnittstellenanzahl sowie die Schnittstellenvarianten [Mar07]. Auch *Lübke* quantifiziert die Komplexität im Produktprogramm anhand von drei mathematischen Kenngrößen [Lüb07]. Der „Gemeinsamkeitsindex“ setzt die Stücklistenpositionen einer Produkt-

familie mit den zu ihrer Produktion benötigten Teilen ins Verhältnis. Der „Differenzierungsindex“ beschreibt, basierend auf Prozessdurchlaufzeiten, das Verhältnis zwischen dem prozessbezogenen Aufwand einer Produktfamilie und deren wirtschaftlichem Erfolg am Markt. Durch den „Änderungsindex“ wird der Betrachtungsumfang noch um eine Aussage bezüglich des Rüstkostenanteils der einzelnen Prozessschritte erweitert. Somit können einzelne Produktfamilien im Rahmen einer prozessorientierten Kosten-Nutzen-Betrachtung bewertet werden ([WV11], S. 108).

Auch *Kota et al.* verfolgen einen ähnlichen Ansatz, indem sie den Standardisierungsgrad innerhalb einer Produktfamilie quantifizieren [KSM00]. Basis dafür ist die Unterteilung der Funktionen einer Produktfamilie in Grundfunktionen (alle Varianten einer Produktgruppe) und Zusatzfunktionen (dies sind variantenspezifische Mehrwerte, die vom Kunden auch als solche wahrgenommen werden). Im Rahmen des Verfahrens wird zunächst das gesamte Variantenspektrum einer Produktfamilie hinsichtlich der Grund- und Zusatzfunktionen analysiert, und dann werden Standardisierungsstrategien für die Grundfunktionen erarbeitet. Die Gesamtkomplexität der Produktgruppe wird im Anschluss durch den Product-Line-Commonality-Index bewertet, dieser gibt Aufschluss über die Wiederholteilerate innerhalb einer Produktfamilie. Die Methodik hat somit die Bauteilkomplexität im Betrachtungsfokus sowie die Komplexität der direkten Montageprozesse [WV11].

Lechner untersucht die Auswirkungen der Produktvielfalt auf Logistikkosten und -leistung und entwickelt einen Bewertungsansatz, um Kosten der Produktvielfalt verursachergerecht unter Verwendung einer Prozesskostenrechnung zu erfassen. Außerdem werden Auswirkungen von zusätzlichen Varianten auf die Logistikleistung quantifiziert und in das Kennzahlensystem integriert. Mit Hilfe der vielfaltsinduzierten Prozesskostenrechnung werden „vielfaltsspezifische Ressourcenbedarfe ermittelt und somit Basis- und Komplexitätsanteile der anfallenden Logistikkosten und Logistikleistung in Abhängigkeit von der Variantenanzahl aufgezeigt“ ([Lec12], S. I). Produktkomplexität in der Beschaffungslogistik kann somit erstmals anhand der beanspruchten Ressourcen, Prozesse und Strukturen quantifiziert werden und beruht nicht mehr auf reinen Schätzungen. Ziel der Arbeit ist es, bereits im Produktentstehungsprozess Entscheidungsunterstützung für ein effizientes Variantenmanagement für die Logistik zu liefern [Lec12].

4.6 Bisherige Arbeiten zur Untersuchung kausaler Zusammenhänge von Komplexität und Erfolgsfaktoren

Da im Rahmen dieser Arbeit neben der Entwicklung einer Quantifizierungsmethodik für Logistikkomplexität auch die Frage untersucht werden soll, ob kausale Zusammenhänge zwischen Komplexität und dem Logistikerfolg bestehen, muss auch der Stand der Technik zu dieser Fragestellung beleuchtet werden. Darüber hinaus ist Transparenz über Ursache-Wirkungs-Beziehungen Voraussetzung für ein zielgerichtetes Komplexitätsmanagement [GL10a]. Eine erste Literaturuntersuchung hat ergeben, dass sich insbesondere die Strukturgleichungsanalyse (SGA) zur Überprüfung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen eignet, daher soll auf existierende Anwendungsfälle in der Logistik der Methodik in der folgenden Analyse ein besonderes Augenmerk gelegt werden.

Gießmann und *Lasch* analysieren den Einfluss der Beschaffungskomplexität auf den kosten- und leistungsbasierten Logistikerfolg und erbringen im Rahmen einer Befragungsstudie mit einer Stichprobengröße von 236 einen empirischen Nachweis, dass hier ein negativer Zusammenhang besteht. Insbesondere werden erhöhte Kosten durch Qualitätsverschlechterungen, verminderte Flexibilität und Zeitverzögerungen im Produktionsablauf als Komplexitätsauswirkungen genannt. Das Ergebnis des Strukturgleichungsmodells (SGM) zeigt, dass die Lieferantenzahl, die Dynamik des Beschaffungsmarktes sowie Unsicherheiten bezüglich Lieferzeit und Lieferqualität besonders komplexitätstreibend wirken [GL10a].

Dehler untersucht die Auswirkungen der Flussorientierung auf den Logistikerfolg sowie die Bedeutung des Logistikerfolgs für den Unternehmenserfolg. Aufbauend auf einer qualitativen Voruntersuchung wird ein Fragebogen konzipiert, um die formulierten Hypothesen anhand einer SGA zu prüfen. Er stellt unter anderem die Hypothese auf, dass die interne Dynamik als ein Aspekt von Komplexität den Grad der Flussorientierung eines Unternehmens positiv beeinflusst, da die grundlegende Zielsetzung der Flussorientierung ist, Leistungsprozesse eines Unternehmens so flexibel wie möglich zu gestalten, um hohe Veränderungsraten innerhalb eines Unternehmens bewältigen zu können. Es wurde festgestellt, dass flussorientierte Unternehmensstrukturen vor allem bei Unternehmen auftreten, die häufig internen Veränderungen ausgesetzt sind. Da die Flussorientierung eines Unternehmens einen durchgehenden Material- und Informationsfluss gestaltet, hat sie damit einen Einfluss auf den Logistikerfolg [Deh01].

Der Beitrag von *Wallenburg* und *Weber* hat zwar nicht die Auswirkungen von Komplexität im Fokus, beschreibt aber die grundsätzliche Bedeutung der SGA im Zusammenhang mit Theorieentwicklung in der Logistik. Die Methode findet zwar in vielen Wissenschaftsdisziplinen Zuspriechung, ihr wird aber im Bereich der Logistik noch wenig Beachtung geschenkt. Zur Veranschaulichung der Funktionsweise einer SGA wird beispielhaft der Einfluss der Logistik auf den Unternehmenserfolg untersucht. Basierend auf einer Stichprobengröße von 245 deutschen Unternehmen gelangen sie zu der Erkenntnis, dass logistische Service-Levels einen größeren Einfluss auf den Unternehmenserfolg haben als Logistikkosten [WW05].

Bozarth et al. testen den Einfluss von Supply-Chain-Komplexität auf die Werksperformance unter Verwendung von Daten aus 209 Werken in sieben Ländern. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl vorgelagerte Supply-Chain-Komplexität als auch interne Produktionskomplexität und nachgelagerte Komplexität in der Supply Chain einen negativen Effekt auf die Werksperformance haben. Dabei wird die Werksperformance anhand von Produktionskosten und dem Einhalten von Produktionsplänen gemessen. Die Indikatoren für Supply-Chain-Komplexität wurden im Rahmen einer Literaturanalyse bestimmt. Durch die Auswertung der Befragung anhand einer multiplen Regressionsanalyse können die Hypothesen, dass sowohl vorgelagerte als auch nachgelagerte Komplexität in der Supply Chain negative Effekte auf Produktionskosten und die Einhaltung von Produktionsplänen haben, bestätigt werden [BWF⁺09].

Zur Untersuchung eines kausalen Zusammenhangs bzw. zur Hypothesenformulierung zwischen flexibilitätsrelevanten Effekten der Selbststeuerung und dem Unternehmenswert verwendet *Wycisk* ein Strukturgleichungsmodell. Die Ergebnisse der Strukturgleichungsmodellierung werden dann für die Entwicklung eines Bewertungsmodells verwendet, welches den kausalen Zusammenhang zwischen Selbststeuerung, Flexibilität und Unternehmenswert ökonomisch auszudrücken vermag. Es ist jedoch zu beachten, dass lediglich die Struktur- und Messmodelle inkl.

Hypothesenformulierung spezifiziert wurden und keine Überprüfung der Modelle anhand empirischer Daten durchgeführt wird [Wyc09].

Das Komplexitätsindex-Tool von *Wildemann* ermöglicht es kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), die eigene Komplexitätssituation darzustellen und zu quantifizieren. Dafür werden individuelle interne und externe Komplexitätstreiber zu je einem Komplexitätsindex aggregiert. Außerdem besteht die Möglichkeit eines interaktiven Benchmarks mit Vergleichsgruppen auf Basis eines Komplexitätsindexportfolios und der Ableitung von Methodenempfehlungen zur Reduzierung, Beherrschung und Vermeidung der Komplexität. Um eine hohe Praxistauglichkeit zu gewährleisten werden qualitative Expertengespräche und Workshops durchgeführt. Die unternehmensspezifischen Wirkungen von Komplexität werden dann anhand einer Struktur- und Wirkungsanalyse im Rahmen von quantitativen Fragebögen untersucht. Darüber hinaus wird ein Gewichtungsfaktorenmodell implementiert, sodass dem Umstand der Subjektivität Rechnung getragen wird. Insgesamt beinhaltet das Modell 10 externe und 20 interne Komplexitätstreiber. Durch die Implementierung in einem IT-Tool haben KMU die Möglichkeit, die unternehmensspezifische Komplexitätssituation zu bewerten und mit frei wählbaren Peergruppen zu vergleichen [WV11].

4.7 Bewertung des Stands der Forschung und Ableitung des Forschungsbedarfs

Die Untersuchung des Stands der Forschung zu aktuellen Bewertungsansätzen für Komplexität zeigt zwar, dass bereits viele Herangehensweisen aus den verschiedensten Wissenschaftsdisziplinen existieren, aber die existierenden Kennzahlen in der Automobilindustrie reichen nicht aus, um Logistikkomplexität zu quantifizieren. Auffallend ist auch, dass speziell Methoden zur Bewertung von Logistikkomplexität selten aufzufinden sind, sodass auf allgemeine Ansätze zur Komplexitätsbewertung zurückgegriffen werden muss, welche hinsichtlich der vorliegenden Problemstellung Grenzen aufweisen.

Die Baumhierarchie berücksichtigt etwa nicht, dass einem Kinderknoten auch mehrere Elternknoten vorausgehen können. Dies ist beispielweise der Fall, wenn eine Teilenummer mehreren Fahrzeugmodellen zugewiesen werden kann. Alle anderen untersuchten Ansätze betrachten die einzelnen Systemelemente als gleichermaßen komplex. Die tatsächliche Stärke des Einflusses einzelner Systemelemente auf die Gesamtkomplexität wird jedoch außer Acht gelassen. Lediglich der von *Gerschberger et al.* weiterentwickelte Vektoransatz bietet die Möglichkeit zur Integration eines Gewichtungsvektors. Jedoch erfolgt hier die Bewertung anhand subjektiver unternehmensinterner Einschätzungen, ohne die Effektstärken der jeweiligen Komplexitätsauswirkungen zu quantifizieren. Auch die Entropie und Graphentheorie erlaubt lediglich einen Vergleich von ähnlichen Systemen, da keine Gewichtung der Komplexitätstreiber vorgesehen ist. Außerdem besteht im Rahmen der Graphentheorie keine Möglichkeit zur Quantifizierung von Parametern, welche sich nicht als Graph modellieren lassen. Mathematisch-produktorientierte Ansätze fokussieren sich sehr stark auf die Einflüsse von Varianten auf Logistikkosten und bieten hier bereits ausgereifte Berechnungslogiken, um diese zu prognostizieren. Allerdings erfordert die vorliegende Problemstellung die Integration vielfältiger Faktoren, welche über die reine Produktbetrachtung hinausgehen.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass es an Methoden zur Quantifizierung von Komplexität mangelt, die die Grundlage für eine effiziente Produkt- und Prozessgestaltung bilden [WV11]. Außerdem sind bisher keine adäquaten Kennzahlen verfügbar, anhand welcher Komplexität quantifizierbar wäre [SEC⁺06]. In der Literatur wird der negative Einfluss der Komplexität auf den Unternehmenserfolg zwar hinreichend oft betont, aber bisher fehlt es an detaillierten und quantifizierbaren Kenntnissen über die Stärke der Beeinflussung und bestehende Zusammenhänge [GL10a]. Diese Diskrepanz bezüglich des dokumentierten Stands der Wissenschaft und der vorliegenden Problemstellung liefert die Motivation für die Untersuchung kausaler Zusammenhänge zwischen Komplexität und Logistikerfolg in Kapitel 7 und für die Entwicklung einer Bewertungsmethodik in Kapitel 8.

5 Kombination von Forschungsmethoden: Mixed Methods Ansatz

Dieses Kapitel dient der Vorstellung der verwendeten Forschungsmethoden. Dabei wird der Mixed-Methods-Ansatz verfolgt, welcher eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Forschungsmethoden vorsieht. Eine Studie wird dafür aus unterschiedlichen (qualitativen und quantitativen) Teilprojekten aufgebaut, in denen die Datenerhebung und Datenauswertung konsequent mit nur jeweils einem der beiden methodischen Ansätze durchgeführt wird. Mixed Methods bedeutet in diesem Fall, dass die Ergebnisse dieser Teilstudien systematisch aufeinander bezogen werden ([Kel14], S.160). Qualitative Vorstudien dienen zur explorativen Generierung von Hypothesen, welche in darauf folgenden quantitativen Hauptuntersuchungen geprüft werden sollen. Diese Vorgehensweise beschreibt ein sequenzielles qualitativ-quantitatives Design ([Kel14], S.161).

5.1 Qualitative Forschung

In diesem Abschnitt werden zunächst die Merkmale der qualitativen Forschung im Vergleich zu quantitativen Ansätzen aufgezeigt, um darauf aufbauend die Bedeutung von Experteninterviews im Kontext dieser Arbeit darzustellen.

5.1.1 Merkmale der qualitativen im Vergleich zur quantitativen Forschung

Als ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der quantitativen und qualitativen Forschung sei an erster Stelle die Art des verwendeten Datenmaterials genannt. Daten wissenschaftlicher Analysen können in verschiedensten Ausprägungen vorliegen. Daher ist es wichtig, die zu untersuchenden Variablen entsprechend ihren Messwerten vordefinierten Skalenniveaus zuzuordnen. Aus dieser Zuordnung wird ersichtlich, welche Art der Forschung und Datenauswertung für den gegebenen Fall geeignet ist. Tab. 5.1 gibt einen Überblick über diese möglichen Skalenniveaus. Während Analysen der quantitativen Forschung zumeist auf metrischen Daten von intervall- und ratioskalierten Merkmalswerten oder auf Daten aus ordinalskalierten Messungen basieren, enthält der qualitative Ansatz verbale Daten aus mündlicher Beschreibung einer Situation sowie nominalskalierte Daten ([May10], S. 18). Die nicht-numerischen Datenerhebungen der qualitativen Forschung können beispielsweise Beobachtungsprotokolle, Interviewtexte, Briefe oder Protokolle sein, aber auch Fotografien, Zeichnungen oder Filme ([BD02], S. 296).

Ebenfalls lassen sich die beiden Forschungsansätze in Hinblick auf das Wissenschaftsverständnis unterscheiden ([BD02], S. 295). Bei einer qualitativen Befragung sind besonders Inhalt und Details der Aussagen für die Analyse von Bedeutung. Den Interviewteilnehmern werden Möglichkeiten zur Diskussion über das Thema gegeben, wodurch auch Aspekte angesprochen werden können, die der Interviewer nicht bedacht oder gekannt hat. Deshalb bieten sich qualitative Forschungsmethoden sehr gut für bislang unerforschte und neue Themengebiete an ([Gil00], S. 11). Des Weiteren ermöglichen qualitative Herangehensweisen die Analyse von aufeinander abgestimmten Argumentationsketten eines Interviewteilnehmers ([MLP⁺11], S. 143).

Tab. 5.1: Skalenniveaus der Untersuchungsvariablen, in Anlehnung an ([FKP*03], S. 15)

| Skalenniveau | Beschreibung |
|--------------------------------------|--|
| Nominal | Ausprägungen sind Namen, keine Ordnung möglich |
| Ordinal | Ausprägungen können geordnet, aber Abstände nicht interpretiert werden |
| Intervall (metrisch) | Ausprägungen sind Zahlen, Interpretation der Abstände möglich |
| Verhältnis-/Ratioskaliert (metrisch) | Ausprägungen besitzen sinnvollen absoluten Nullpunkt |

5.1.2 Datenerhebung

Die Methoden der qualitativen Forschung können untergliedert werden in reaktive und nicht-reaktive Verfahren. Der wesentliche Unterschied dieser beiden Verfahren liegt in der Beeinflussbarkeit des Untersuchungsgegenstandes. Menschen verhalten sich in Untersuchungs- oder Beobachtungssituationen anders als in natürlichen oder gewohnten Situationen. Verfahren, bei denen die Möglichkeit eines veränderten Verhaltens besteht, werden daher als reaktiv bezeichnet. Dahingegen beeinflusst die Situation bei nicht-reaktiven Verfahren den Gegenstand nicht. Beispielsweise ist ein Film, ein Zeitungsartikel oder ein sonstiges Schriftstück bei seiner Untersuchung unverändert zu seinem jeweiligen Erscheinen in anderen Situationen ([MLP*11], S. 59).

Als reaktive Verfahren kommen nach *Meyen et al.* generell fünf Möglichkeiten in Frage. Tab. 5.2 zeigt hierzu eine Übersicht mit einer Beschreibung der jeweiligen Merkmale. Besonders hervorzuheben ist die Unterscheidung von Leitfaden- und Experteninterviews, da auch in Experteninterviews Leitfäden zur Unterstützung verwendet werden können. Ein Experteninterview lässt sich dem Begriff nach als Interview mit Angehörigen spezieller Eliten deuten, die ihr besonderes Wissen aus ihrer beruflichen Position erlangten. Der Begriff ist jedoch weitläufiger, sodass auch solche Menschen über besonderes Expertenwissen verfügen, die aufgrund ihrer Hobbies und persönlichen Interessen einen wertvollen Wissensschatz erlangt haben und damit Träger exklusiven Wissens sind ([GL10b], S. 11f.; [Bog09], S. 11ff). *Schäfer* definiert Experteninterview als „(...) ein offenes, leitfadenorientiertes Interview mit einer Person, die bezüglich einer speziellen Fragestellung Experte ist oder diese Rolle vom Forscher zugeschrieben bekommt“ [Sch95a]. Leitfadeninterviews werden dagegen geführt, wenn es nicht auf das explizite Wissen einer Person oder Personengruppe ankommt, sondern verallgemeinerbare Aussagen über eine Grundgesamtheit gefunden werden sollen ([MLP*11], S. 61). Eine Gruppendiskussion wird angewendet, wenn sich mehrere Personen strukturiert über ein definiertes Thema austauschen sollen und in ihrem Vorgehen evtl. sogar durch einen Moderator angeleitet werden ([BD02], S. 319). Aus Tagebüchern können Handlungsabläufe und Gründe für Handlungen erkannt werden. Diese Methode ist nützlich für Personenzielgruppen, die Erlebnisse und Gedanken gerne verschriftlichen ([MLP*11],

S. 60). Dadurch, dass Ereignisse meist zeitnah in Tagebüchern erfasst werden, sind die Forschungsergebnisse unbeeinflusst von Interviewsituation und Erinnerungsvermögen der Teilnehmer ([MLP⁺11], S. 62). Möchte oder muss sich der Forscher ein eigenes Bild von einer konkreten Situation einholen, da er beispielsweise nicht auf die Aussagen der Zielgruppe vertrauen kann oder diese keine Aussagen machen können, so ist eine Beobachtung die Methode der Wahl. Die Ergebnisse dieser qualitativen Forschungsmethode sind im Vergleich zu Interviews meist unbeeinflusst von einer möglichen Subjektivität der Teilnehmer. Jedoch gilt zu beachten, dass mittels Beobachtungen keine Analysen der Vergangenheit möglich sind. Es kann nicht jede Forschungsfrage mit dieser Methode beantwortet werden. Beobachtungen sind im Vergleich zu den anderen aufgezeigten Methoden außerdem sehr zeitaufwendig, da Handlungen in ihrer Ausführung länger dauern als wenn über sie erzählt oder berichtet wird ([MLP⁺11], S. 60ff).

Tab. 5.2: Merkmale reaktiver Verfahren, in Anlehnung an ([MLP⁺11], S. 60)

| Qualitative Methode | Ziel | Teilnehmer | Beispiele |
|---------------------------|--|--|---|
| Gruppendiskussion | Sinn im Meinungsklima: konkrete Gegenstände | Menschen mit hohem Themeninteresse, Zeit und geringer Schwellenangst | <i>Bild</i> -Leser, Cineasten |
| Tagebuch | Sinn und Handlungsabläufe | Menschen, die gern schreiben | Medienroutinen, Handeln in bestimmten Situationen |
| Beobachtung | Handlungen und Strukturen in der Gegenwart | Menschen, die Nähe zulassen | Redaktionsarbeit, Internetnutzung |
| Leitfadeninterview | Sinn im Kontext: Biografie, Alltag, Familie, Job | Menschen, die bereit und fähig sind, über das Thema zu reden | Berufsverständnis, Medien im Alltag |
| Experteninterview | Exklusives Wissen | Träger von Wissen | Politikberatung, neue Medien |

In dieser Arbeit werden Experteninterviews angewendet, um dem Forschungsziel der Identifikation von Haupttreibern für Logistikkomplexität näher zu kommen. Aus diesem Grund liegt der Fokus der nachfolgenden Erläuterungen auf der qualitativen Forschungsmethode Interview. Ein Interview hat die folgenden Vorteile gegenüber den genannten anderen qualitativen Methoden sowie gegenüber quantitativer Forschung (vgl. [BD02]):

- die Interviewteilnehmer können ihre persönliche Meinung äußern und müssen ihre Antwort nicht in ein vorgegebenes Antwortraster drücken, in welchem ihre tatsächliche Meinung eventuell nicht hervorkommt,

- das Interview kann am Arbeitsplatz des Interviewteilnehmers stattfinden und ermöglicht daher einen höheren Grad an Authentizität und
- der Interviewer hat im Nachhinein Interpretationsmöglichkeiten aufgrund der Interviewsituation und des Verhaltens des Teilnehmers.

Ein wesentlicher Kritikpunkt an der qualitativen Forschung, welcher hier ebenfalls erwähnt werden sollte, ist die Subjektivität in der Interpretation des Forschers [BB14]. Mit dem Bewusstsein darüber und einem besonderen Maß an Vorsicht sowohl in der Vorbereitung als auch in der Durchführung und Auswertung der Interviews kann dieser Faktor jedoch abgeschwächt werden. Interviews können grundlegend nach dem Grad der Standardisierung unterschieden werden in

- vollstandardisierte Interviews,
- halbstandardisierte Interviews und
- nichtstandardisierte Interviews ([GL10b], S. 41).

Vollstandardisierte Interviews, in denen Fragewortlaut und -reihenfolge sowie Antwortmöglichkeiten vorgegeben sind, finden ihre Verwendung in der quantitativen Forschung. In der qualitativen Forschung werden nichtstandardisierte Interviews eingesetzt, bei welchen weder Frage noch Antwortmöglichkeiten vorgegeben werden, sondern lediglich das Thema. Hierdurch ist es möglich, neue Erkenntnisse zu einem Themengebiet zu erlangen, die in vorformulierten Antworten gegebenenfalls nicht berücksichtigt würden. Halbstandardisierten Interviews wird in der Forschung weniger Bedeutung zugeschrieben und stattdessen werden teilstandardisierte Interviews verwendet. Teilstandardisierte Interviews bezeichnen nichtstandardisierte Interviewformen mit festgelegten Vorgaben für den Interviewer ([GL10b], S. 41). Als nichtstandardisierte Interviews bieten sich Leitfadeninterviews, offene Interviews und narrative Interviews als Möglichkeiten an. Während in einem Leitfadeninterview vorbereitete Fragen durchgegangen werden, stellt das offene Interview eine natürliche Gesprächssituation dar, die der Interviewer durch frei formulierte Fragen steuern kann. Das narrative Interview wird vom Interviewer durch eine komplexe und ausführliche Fragestellung eingeleitet, auf die der Interviewteilnehmer mit einer detaillierten Erzählung eingehen soll ([GL10b], S. 41f.; [Hoh00]; [Kai14], S. 3).

Schäfer unterscheidet die Erhebungsverfahren nichtstandardisierter Interviews weiter in Biographisches Interview, Ethnographisches Interview, Fokussiertes Interview, Problemzentriertes Interview und Struktur-Dilemma-Interview [Sch95a]. Da diese Interviewarten mit den bereits genannten sehr ähnlich sind und die Unterscheidung auf dem Detailgrad in der Literatur umstritten ist, wird an dieser Stelle nicht näher auf die einzelnen Merkmale eingegangen.

Die bisherigen Erläuterungen zeigen, dass die Anzahl an Möglichkeiten für eine Befragung sehr groß ist. Somit fällt die Entscheidung für die anwendungsspezifische optimale Methode nicht leicht. Als Hilfestellung für die Auswahl einer geeigneten qualitativen Interviewtechnik haben *Meyen et al.* vier Hauptkriterien bestimmt, welche zur Entscheidungsfindung bei der Befragungsart herangezogen werden sollten ([MLP⁺11], S. 86):

1. *Erkenntnisinteresse*: Was will ich wissen?
2. *Zielgruppe*: Wen möchte ich befragen?
3. *Ressourcen*: Welche Mittel und welche Zeit stehen zur Verfügung?
4. *Persönliche Vorlieben*: Welche Befragungsart liegt mir am besten?

Neben diesen vier Kriterien empfehlen *Bortz und Döring* dem Forscher, sich vor einer Entscheidung für eine Methode Antworten zu den folgenden Fragen zu überlegen ([BD02], S. 308f.):

- Ist der abzufragende Sachverhalt vom Interviewteilnehmer aus Erinnerungen und Erlebnissen beschreibbar?
- Sind Zeitaufwand, Kontext des Interviews und Rollenstruktur für den Interviewteilnehmer vertretbar?
- Welche Art der Dokumentation und Datenauswertung soll verwendet werden?

5.1.3 Leitfadenorientierte Experteninterviews zur Datenerhebung exklusiven Wissens

In dieser Arbeit wurden zur Datenerhebung Experteninterviews unter Zuhilfenahme eines Leitfadens durchgeführt. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle die Grundlagen der Erstellung eines Leitfadens und der Durchführung von Interviews erläutert. Für Experteninterviews mit Leitfaden wie auch für Leitfadeninterviews definiert *Helfferrich* drei wesentliche Anforderungen an den Leitfaden. Ihnen nach gilt zuallererst Offenheit als Priorität, d. h. eine Einschränkung der Äußerungsmöglichkeit des Interviewteilnehmers muss mit dem Forschungsziel begründbar und so gering wie möglich sein. Außerdem sollte ein Leitfaden übersichtlich sein. Struktur und Reihenfolge der Fragen müssen nachvollziehbar und nur so viele Fragen wie nötig im Leitfaden enthalten sein [Hel14]. Auch für *Meyen et al.* spielt die Reihenfolge der Fragen eine entscheidende Rolle für den Erfolg eines Interviews. Sie empfehlen, mit allgemeinen Themen wie z. B. Fragen zur Biographie, Karriere oder zum Alltag zu beginnen und erst im Anschluss daran Fragen zum spezifischen Thema zu stellen ([MLP⁺11], S. 97). Offene Fragen zu Beginn ermöglichen dem Interviewteilnehmer einen leichten Einstieg in das Gespräch, da er frei antworten und erzählen kann. In diesen Einstiegsfragen können nach *Helfferrich* bereits für die Forschung relevante Aspekte und Ideen aufgegriffen werden. Anschließend folgen jene Fragen, auf welche in der Literatur keine Antworten gefunden werden konnten und deren Beantwortung zur Bearbeitung der Forschungsaufgabe wesentlich ist. Meinungsfragen sollten nach Sach- und Problemfragen gestellt werden ([MLP⁺11], S. 97). Als weitere Anforderung nennt *Helfferrich* das Anschmiegen an den Erzählfluss. Abrupte Themensprünge gilt es zu vermeiden und auch Gegenfragen des Interviewteilnehmers sollten nicht übergangen werden, um den Erzählfluss nicht zu hindern. Als Richt- und Erfahrungswert für den Umfang eines Leitfadens geben *Meyen et al.* 15 Hauptfragen an. Diese Hauptfragen können mit Unter- und Stützfragen, aber auch mit weiteren Informationen zur Themenstellung ergänzt werden, damit das Gespräch nicht unnötig unterbrochen wird. Ein offenes Ende des Interviews, in dem der Befragte die Möglichkeit erhält, nicht geklärte Themen zu besprechen und eigene Fragen zu stellen, wird ebenfalls empfohlen ([MLP⁺11], S. 97). Als typische

Reihenfolge für den Aufbau eines Interviews nennen *Bortz und Döring* die folgenden Punkte ([BD02], S. 309 f.):

1. inhaltliche Vorbereitung,
2. organisatorische Vorbereitung,
3. Gesprächsbeginn,
4. Durchführung und Aufzeichnung des Interviews,
5. Gesprächsende,
6. Verabschiedung und
7. Gesprächsnotizen.

In diesem Zusammenhang definieren *Meyen et al.* vier Gütekriterien, welche bei *guten* Untersuchungen erfüllt sind. Als erstes Kriterium wird die Gültigkeit der Studie genannt. Fragestellung, Theorie, Methode und Ergebnisse müssen stimmig sein ([MLP⁺11], S. 47). Auch *Mayring* sieht diese Validität als Kriterium ([May15], S. 123f.). Das Untersuchungsziel sollte mit der verwendeten Methode tatsächlich erreicht werden. Ebenso müssen die Ergebnisse auf ähnliche Situationen oder Forschungsfragen übertragbar sein. Das Kriterium der Generalisierbarkeit spielt also eine weitere große Rolle für „gute“ Studien. Daneben ist die Zuverlässigkeit, d. h. eine Nachvollziehbarkeit der Untersuchungsmethoden, Datenerhebungs- und Auswertungsverfahren, ein weiteres Kriterium, das von *Meyen et al.* aufgelistet wird ([MLP⁺11], S. 47). Analysen und Auswertungen sollen frei von normativer Beurteilung stattfinden, um die Unabhängigkeit von persönlichen Werturteilen zu gewährleisten.

5.1.4 Datenauswertung

Die aus den qualitativen Erhebungsmethoden gewonnenen Datenmaterialien sind Texte in den zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Ausprägungen/Formen. Diese Rohdaten sind im Gegensatz zu quantitativen Ergebnissen mit Ungenauigkeiten versehen, welche in der Auswertung berücksichtigt werden müssen. Das bedeutet, dass zunächst nicht eindeutig ist, ob und welche Informationen im Text für die Forschungsfrage bedeutsam sind. Zur Auswertung gibt es daher verschiedene Möglichkeiten. *Gläser und Laudel* unterscheiden die Methoden in

- freie Interpretation,
- sequenzanalytische Methoden,
- Kodieren und
- qualitative Inhaltsanalyse [GL10b].

Während bei den letzten drei Methoden definierte Kriterien und Regeln die Auswertung vorgeben, ist dem Forscher bei einer freien Interpretation absoluter Auswertungsfreiraum gegeben. Die Interpretation des Forschers lässt sich schwer nachvollziehen, weshalb diese Möglichkeit oftmals nicht als wissenschaftliche Auswertungsmethode bezeichnet wird. Bei der sequenzanalytischen

Methode werden zeitliche und thematische Zusammenhänge in den Interviewantworten gefunden, beim Kodieren werden thematisch gleiche Textpassagen mit einem Kode versehen ([GL10b], S. 43ff). Diese Codes sind zu Beginn der Datenauswertung nahe am Text und werden im weiteren Verlauf der Analyse in zunehmend abstrakter Form ausgedrückt ([DB13], S. 80). Aus den entstandenen Kategorien können je Kategorie Vergleiche in den Antworten gezogen und die Forschungsfrage beantwortet werden. In der qualitativen Inhaltsanalyse werden dem Text alle wichtigen und bedeutungsvollen Informationen entnommen und vom Ursprungstext extrahiert analysiert. Das Kategoriensystem für die Informationsextraktion wird hier im Gegensatz zu den anderen Auswertungsmethoden bereits vor der Textanalyse erstellt ([GL10b], S. 43ff).

5.2 Quantitative Forschung

Wie bereits erwähnt liegen die grundlegenden Unterschiede der beiden Forschungsansätze in den verwendeten Methoden zur Datenerhebung und Datenauswertung ([May10], S. 18). In der quantitativen Forschung wird grundlegend zwischen univariater, bivariater und multivariater Statistik unterschieden. Bei einer univariaten statistischen Analyse wird nur eine Variable untersucht, wohingegen bei bivariaten Verfahren zwei und bei multivariater Statistik mehrere Variablen betrachtet werden ([Dul13], S. 9).

5.2.1 Datenerhebung

Der Grundbaustein jeder Datenerhebung sind die Variablen. Unter Variablen werden in der Statistik die Merkmale eines Objektes bezeichnet. In einer Studie über Absolventen beispielsweise wurden für das Objekt Studienabgänger die Merkmale Geschlecht, Studienschwerpunkt, Durchschnittsnote im Diplom und weitere Variablen erfasst ([FKP⁺03], S. 15). In diesem Zusammenhang gilt es, an dieser Stelle für ein Grundverständnis ebenfalls weitere statistisch relevante Begriffe zu definieren. Die Träger der Merkmale, d. h. die Objekte, an welchen Untersuchungen vorgenommen werden sollen, sind unter dem Begriff statistische Einheit bekannt. Die Grundgesamtheit der Untersuchung bildet sich aus der Summe aller für die Forschung bedeutsamen statistischen Einheiten. In einer Analyse ist es meistens nicht möglich, alle statistischen Einheiten der Grundgesamtheit zu erheben und/oder auszuwerten. Die Teilmenge der Grundgesamtheit, welche daher für die Forschungsaufgabe herangezogen wird, nennt sich Stichprobe ([FKP⁺03], S. 15). Tab. 5.3 zeigt eine Übersicht der Begriffe und ihrer Beschreibungen.

Tab. 5.3: Statistische Grundbegriffe, in Anlehnung an ([FKP⁺03], S 15; [Cle15], S. 19)

| Begriff | Beschreibung |
|----------------------|---|
| Statistische Einheit | Objekte bzw. Merkmalsträger, an denen interessierende Größen erfasst werden (Bsp.: Studienabgänger) |
| Grundgesamtheit | Menge aller für die Fragestellung relevanten statistischen Einheiten |

| | |
|--------------------|--|
| Stichprobe | Tatsächlich untersuchte Teilmenge der Grundgesamtheit |
| Merkmal | Interessierende Größe, Variable (Bsp.: Geschlecht) |
| Merkmalsausprägung | Konkreter Wert des Merkmals für eine bestimmte statistische Einheit (Bsp.: weiblich) |

Sollen zur Beantwortung der Forschungsfragen mehrere Variablen zu einem Zeitpunkt erhoben und analysiert werden, so wird von einer Querschnittsstudie gesprochen. Wird hingegen die gleiche Variable zu mehreren Zeitpunkten beobachtet, so nennt sich die Studie Zeitreihe. Eine Längsschnittstudie beinhaltet die Kombination dieser beiden Betrachtungsschwerpunkte, indem mehrere Variablen zu mehreren Zeitpunkten erfasst werden, wobei zu jedem Zeitpunkt die gleichen Variablen und für alle Variablen die gleichen Messzeitpunkte verwendet werden ([FKP⁺03], S. 28).

Des Weiteren gilt es vor der Datenerhebung zu klären, ob es sich bei den zu untersuchenden Objekten um beobachtbare, d. h. manifeste, oder nicht beobachtbare, d. h. latente Variablen handelt. Beispiele für latente Variablen sind die Intelligenz und der Charakter eines Menschen. Beide können nicht unmittelbar gemessen werden, sondern werden vielmehr durch eine Kombination manifester Eigenschaften gebildet ([GBC92], S. 57; [ECH⁺10], S. 25). Als Möglichkeiten für die Datenerhebung der quantitativen Forschung bieten sich je nach Verfügbarkeit und Forschungsthematik die folgenden an ([Cle15], S. 15 ff.; [BD02], S. 237, 262, 278):

- Daten im Unternehmen (Herausforderung, die benötigten Daten von den entsprechenden Mitarbeitern zu erhalten),
- öffentlich zugängliche Datenbanken von privaten Dienstleistungsunternehmen, Forschungsinstituten, statistischen Landes- und Bundesämtern, etc.,
- mündliche/schriftliche Befragung (Informationen von Einzelpersonen bzw. Einzelunternehmen),
- Beobachtung und
- Messung.

5.2.2 Datenauswertung

Im Anschluss an die Datenerhebung können die Daten schließlich ausgewertet und analysiert werden. Hierzu bieten sich in der Statistik drei grundlegende Methodenbereiche an ([Dul13], S. 9):

- deskriptive Datenanalyse,
- induktive Datenanalyse und
- explorative Datenanalyse.

Die Möglichkeiten der deskriptiven (= beschreibenden) Datenanalyse werden zumeist zu Beginn der Datenanalyse verwendet, um einen ersten Überblick über die erhobenen Daten zu erlangen und fehlende sowie ausreißende Werte zu entdecken. Darauf aufbauend kann entschieden werden, ob ein weiteres Vorgehen der Datenanalyse notwendig und/oder hilfreich ist und wie dieses im Detail aussieht. Die Daten werden in der deskriptiven Statistik mittels graphischer Darstellung und Tabellen interpretiert und anhand von statistischen Kennzahlen beschrieben ([Dul13], S. 9). Interessierende Parameter sind in diesem Zusammenhang der Modus, das arithmetische Mittel und der Median, welche aufgrund ihrer verteilungsangehenden Eigenschaften als Lageparameter bezeichnet werden. Während mit dem Modus der in einer Verteilung am häufigsten auftretende Wert identifiziert wird, gibt das arithmetische Mittel den Durchschnitt aus den analysierten Daten an ([Cle15], S. 36 f). Der arithmetische Mittelwert \bar{x} berechnet sich mit folgender Formel:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

mit n = Anzahl Beobachtungen der Variable x ,
 x_i = i -ter Beobachtungswert (Merkmalsausprägung) der Variable x .

Der Mittelwert als repräsentative Interpretationsgröße der Lage einer Verteilung ist jedoch nicht in allen Fällen geeignet. Wenn beispielsweise niedrige und hohe Werte sehr häufig in der Verteilung vorkommen, so errechnet sich für den Mittelwert aus diesen Daten weder eine der hohen, noch eine der niedrigen Zahlen, sondern ein Wert dazwischen. Die tatsächliche Verteilung der Daten wird in diesem Fall mit dem arithmetischen Mittel nicht am besten ausgedrückt. Eine genauere Möglichkeit bildet an dieser Stelle der Median. Zunächst wird der Datensatz der Größe nach sortiert und anschließend der Wert gewählt, welcher in der Mitte liegt. Somit sind 50 Prozent der Daten kleiner und 50 Prozent größer als der Wert des Medians ([Cle15], S. 47). Für eine ungerade Anzahl an Beobachtungen n berechnet sich der Median \tilde{x} aus einer geordneten Datenliste als

$$\tilde{x} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \quad (5.2)$$

und für gerade Zahlen als

$$\tilde{x} = \frac{1}{2}(x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}) \quad (5.3)$$

mit x_i = i -ter Beobachtungswert (Merkmalsausprägung) der Variable x .

Neben Mittelwert und Median werden Quantile zur Analyse der Verteilung der Daten untersucht. Das p -Quantil gibt an, dass p Prozent der Daten kleiner oder gleich und $1 - p$ Prozent der Daten größer oder gleich dem Wert x_p sind. Beispielsweise gibt ein 10%-Quantil an, dass 10 Prozent

der Daten kleiner/gleich dem Wert $x_{0,1}$ und 90 Prozent der Daten größer/gleich $x_{0,1}$ sind. Der Median entspricht dem 50%-Quantil, d. h. $x_{0,5}$. Als Quartile werden das 25%-Quantil (unteres Quartil, $x_{0,25}$) und das 75%-Quantil (oberes Quartil, $x_{0,75}$) bezeichnet. Die Werte für x_p können aus einer Grafik der kumulierten Verteilungsfunktion der Daten abgelesen werden [FKP⁺03].

Boxplots werden zur graphischen Veranschaulichung dieser Kennzahlen herangezogen. In ihnen sind kleinster und größter Beobachtungswert, Quartile, Median sowie Ausreißer dargestellt. Der Betrachter eines Boxplots erhält mit einem Blick Aufschluss über die Verteilung der Daten ([Cle15], S. 52ff). Abb. 5.1 stellt ein Beispiel für einen Boxplot dar.

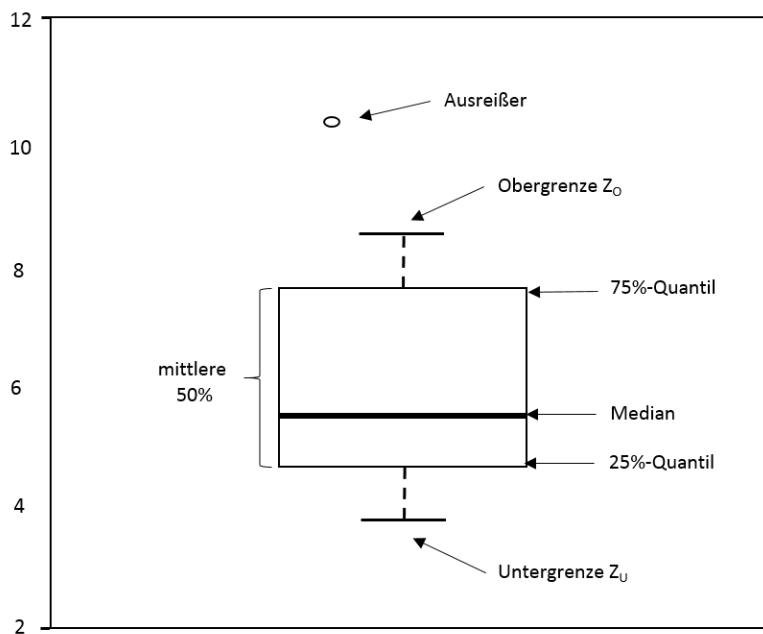


Abb. 5.1: Beispiel für einen Boxplot, in Anlehnung an [Kel16]

Zumeist sind die erhobenen Daten für eine Analyse unvollständig. Dies kann bei einer Datensammlung im Unternehmen beispielsweise daran liegen, dass Daten nicht durchgängig dokumentiert oder für den Forscher unzugänglich sind. Bei einer Datenerhebung mittels Fragebögen entstehen fehlende Werte dadurch, dass Fragen nicht beantwortet bzw. ausgelassen wurden. Sofern jedoch keine Systematik hinter dem Fehlen der Werte liegt, können diese ersetzt werden ([Cle15], S. 25). Für die Ersetzung gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten: Regression, Expectation-Maximization-(EM-)Algorithmus und Ersatz durch den Mittelwert der Reihe. Während Regression und EM-Algorithmus ähnlich gute Werte liefern, sind die Ergebnisse der Mittelwerttechnik in den meisten Fällen nicht befriedigend. Einerseits sind die Schätzwerte der Standardabweichung zu gering, zum anderen werden der tatsächliche Effekt und die Aussagekraft durch den Einsatz der Mittelwerte verringert. Für einen größeren Anteil an fehlenden Werten liefert der EM-Algorithmus bessere Werte als die Regression ([ECH⁺10], S. 262f.; [Hai14], S. 263).

Im Anschluss an die deskriptiven Untersuchungen finden die Methoden der induktiven (= schließenden) Datenanalyse Verwendung. Hierin können die Ergebnisse der deskriptiven Analysen mit Hilfe von Signifikanztests als statistisch signifikant bewiesen werden. Es ist mit den Methoden außerdem möglich, anhand der repräsentativen Stichprobe Rückschlüsse auf die interes-

sierende Grundgesamtheit zu ziehen. Die erhaltenen Schlussfolgerungen über die Grundgesamtheit sind stets mit Unsicherheiten behaftet. Jedoch können diese Unsicherheiten unter Verwendung von Signifikanzniveaus genau abgeschätzt werden ([Dul13], S. 9).

Zur Feststellung von Zusammenhängen zwischen Variablen werden Korrelationen und Kausalitäten analysiert. Zwei Variablen werden als korrelierend bezeichnet, wenn eine Veränderung der einen Variablen eine Veränderung in der anderen Variable hervorruft. Gibt es für eine berechnete Korrelation keine inhaltliche Rechtfertigung, so wird die Korrelation als Scheinkorrelation bezeichnet. Verdeckte Korrelationen treten auf, falls die Berechnungen keine Korrelation aufdecken, da eine für den Zusammenhang relevante Variable unberücksichtigt blieb ([Dul13], S. 132 f). Bestehen Zusammenhänge zwischen den Werten zweier Zeitreihen, so wird von einer Kreuzkorrelation gesprochen. Dies betrifft sowohl Korrelationen zwischen zwei Werten eines jeweils gleichen Zeitpunkts als auch verzögerte Korrelationen von verschiedenen Zeitpunkten ([BZ02], S. 260). Weisen die zwei untersuchten Zeitreihen beide einen Trend auf, entsteht die Korrelation dieser zumeist aus der Tatsache, dass sich die jeweiligen Werte in vergleichbarer Weise von Zeitpunkt zu Zeitpunkt verändern. In diesem Fall führt eine ermittelte signifikante Korrelation zwischen den Zeitreihen zu Fehlinterpretationen ([BZ02], S. 264).

Für die Ermittlung der Korrelation zweier Variablen existieren auf deren Skalenniveaus abgestimmte und normierte Messgrößen. Für nominal vorliegende Daten sind Phi und Cramer's V die geläufigsten Korrelationsmessgrößen. Hingegen wird für ordinale Skalenniveaus der Variablen die Spearman-Rank-Korrelation berechnet. Mit dem Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient kann die Stärke der Korrelation zwischen metrischen Variablen bestimmt werden. Der in dieser Arbeit verwendete Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient r_{x_1, x_2} berechnet sich unter Verwendung der Kovarianz (im Zähler) und Standardabweichungen (im Nenner) der untersuchten Variablen x_1 und x_2 ([WM14a], S. 14):

$$r_{x_1, x_2} = \frac{cov(x_1, x_2)}{\sqrt{Var(x_1)Var(x_2)}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2)(\sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2)}} \quad (5.4)$$

mit x_{i1} = i-ter Beobachtungswert (Merkmalsausprägung) der Variable x_1
 \bar{x}_1 = Mittelwert der Ausprägungen von Variable x_1 über alle Objekte
 x_{i2} = i-ter Beobachtungswert (Merkmalsausprägung) der Variable x_2
 \bar{x}_2 = Mittelwert der Ausprägungen von Variable x_2 über alle Objekte

Tab. 5.4 gibt einen Überblick über die Bewertung der Korrelationsintensitäten je nach Größe des Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizienten r . Aufgrund der Normierung liegt r im Intervall $[0;1]$ bzw. $[-1;0]$. Perfekte positive Korrelation liegt vor, wenn $r = 1$, perfekte negative Korrelation bei $r = -1$. Die Intensitäten in der Tabelle werden gleichermaßen für negative Korrelationskoeffizienten von 0 bis -1 verwendet und können ferner je nach Forschungsdisziplin variieren (vgl. [WM14a], S. 14).

Tab. 5.4: Korrelationsintensität, in Anlehnung an ([WM14a], S. 15)

| Korrelationskoeffizient r | Intensität der Korrelation |
|-----------------------------|----------------------------|
| $r = 0$ | Statistisch unabhängig |
| $0,0 < r \leq 0,2$ | Sehr geringe Korrelation |
| $0,2 < r \leq 0,5$ | Geringe Korrelation |
| $0,5 < r \leq 0,7$ | Mittlere Korrelation |
| $0,7 < r \leq 0,9$ | Hohe Korrelation |
| $0,9 < r \leq 1,0$ | Sehr hohe Korrelation |

Eine statistische Korrelation gibt keinen Aufschluss über die Richtung der Beziehung der Variablen, d. h. welche der Variablen die Ursache und welche die Wirkung ist. Die Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Variablen stellt einen kausalen Zusammenhang (Kausalität) dar, welcher in der Regel nicht durch Berechnungen, sondern durch Sachkompetenz des Forschers festgestellt wird ([Dul13], S. 132f). Ist sich der Forscher über die Ursache-Wirkungs-Richtung bewusst, so kann diese Vermutung mit Hilfe von Regressionsanalysen bewiesen werden. Diese Verfahren untersuchen rechnerisch den Einfluss von einer oder mehreren Variablen (unabhängige Variablen) auf eine definierte Zielvariable (abhängige Variable). So vielfältig wie die Forschungsziele und Datenerhebungsmöglichkeiten sind, so unterschiedlich und umfangreich sind auch die Analysemöglichkeiten mittels Regression. Der einfachste Fall der Regressionsanalyse beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen einer unabhängigen Variablen x und einer abhängigen Variablen y , deren beider Skalenniveaus metrisch sind. Die allgemeine lineare Regressionsfunktion mit Stör-/Fehlertermen e_i sieht dann für Beobachtungen $x_1 \dots x_n$ und $y_1 \dots y_n$ wie folgt aus ([Dul13], S. 243; [FKP*03], S. 554):

$$y_i = a + bx_i + e_i \quad (5.5)$$

In dieser Gleichung wird der Parameter a als Regressionskonstante bezeichnet, da er den Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der y -Achse angibt. Der Regressionskoeffizient b ist der Steigungsparameter der Geraden. Er zeigt an, wie sich y_i verändert, wenn sich x_i um eine Einheit erhöht. Die Störgröße e_i beinhaltet alle Zufallseinflüsse, die auf die Beziehung zwischen x_i und y_i wirken. Die Störgröße kann als Zusammenfassung aller im Modell nicht berücksichtigten Variablen interpretiert werden und ist aus diesem Grund nicht messbar. Da y_i durch diese Störterme nicht fehlerfrei bestimmt werden kann, ist für die abhängige Variable lediglich eine Schätzung y'_i möglich ([Fro12], S. 84f):

$$y'_i = a + bx_i \quad (5.6)$$

Die Abweichung der jeweiligen Beobachtungswerte y_i von den Werten der Regressionsgerade setzt sich zusammen aus dem Schätzwert y'_i und dem Residuum e_i :

$$y_i = y'_i + e_i \text{ bzw. } y_i = y'_i - e_i \quad (5.7)$$

Mit der Methode der kleinsten Quadrate wird die Regressionsgleichung so bestimmt, dass die quadrierten Abstände der Messwerte zur Regressionsgerade insgesamt minimiert werden ([Fro12], S. 85). Abb. 5.2 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen Beobachtungswerten y_i , Schätzwerten y'_i und Mittelwert \bar{y} . Der Abstand eines Schätzwertes zum Mittelwert wird als erklärte Streuung bezeichnet. Die nicht erklärte Streuung ergibt sich jeweils aus der Differenz von Beobachtungswert und Schätzwert ([Fro12], S. 86).

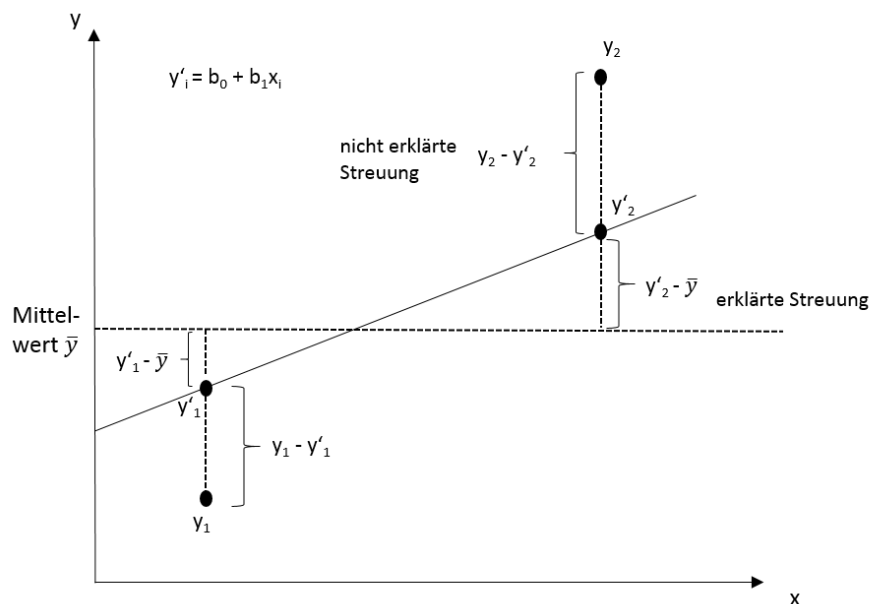


Abb. 5.2: Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade ([Fro12], S. 86)

Für die Gültigkeit der Ergebnisse einer multiplen linearen Regression ist die Erfüllung der folgenden Punkte Voraussetzung ([BEP⁺16], S. 97ff):

- Das Modell ist nicht fehlspezifiziert, d. h. es fehlen keine relevanten Variablen,
- Linearität: Beziehung zwischen unabhängiger und abhängiger Variable ist linear,
- Normalverteilung der Residuen,
- Homoskedastizität (Varianzhomogenität der Residuen),
- keine Autokorrelation der Residuen und
- keine Multikollinearität der unabhängigen Variablen.

Als Bindeglied zwischen deskriptiver und induktiver Statistik etablierte sich die explorative Datenanalyse. Bevor die induktiven Methoden zur Analyse von Zusammenhängen und Unterschie-

den eingesetzt werden, finden im Rahmen der explorativen Statistik Überlegungen zu interessierenden Fragestellungen und vermuteten Hypothesen statt. Darauf aufbauend können schließlich die konkreten Hypothesen mit den Methoden der induktiven Datenanalyse geprüft werden ([Dul13], S. 9).

5.3 Kausalanalyse zur Untersuchung komplexer Konstrukte

Die Möglichkeiten der Regressionsanalyse zur Untersuchung von Zusammenhängen sind zwar vielfältig, aufgrund ihrer Annahmen sowie in Bezug auf die Art der Variablenkonstrukte jedoch beschränkt. Mit einer Regression können lediglich messbare Variablen berücksichtigt werden, für nicht direkt beobachtbare Variablen finden sich keine Analysemöglichkeiten [HKP08]. Für solche Untersuchungssituationen werden daher andere Methoden der multivariaten Datenanalyse benötigt. In der Betriebswirtschaftslehre setzte sich in den letzten Jahren der Ansatz der Kausalanalyse⁸ durch, welcher es ermöglicht, strengere Tests zu Theorien über Beziehungen und Zusammenhänge durchzuführen [HH98]. „Der zentrale Vorteil der Kausalanalyse (...) besteht in der expliziten Berücksichtigung von Messfehlern in den erhobenen Variablen. Diese wird durch eine Unterscheidung zwischen latenten (unbeobachteten) Variablen und (beobachtbaren) Indikatorvariablen ermöglicht.“ [HD98]. In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Kausalanalyse erläutert, um dem Leser ein Verständnis für die durchgeführten Analysen über die Zusammenhänge von Komplexität mit logistischen Erfolgsgrößen zu geben.

5.3.1 Grundbegriffe und Bestandteile eines Strukturgleichungsmodells

Zur Analyse der kausalen Zusammenhänge zwischen nicht unmittelbar messbaren, latenten Variablen (LV), welche in der Regel über messbare, manifeste Variablen (Indikatorvariablen, MV) operationalisiert werden, finden Strukturgleichungsmodelle (SGM) Anwendung. Die Verfahren der Strukturgleichungsanalyse (SGA) gehören zur Gruppe der strukturprüfenden multivariaten Analysemethoden ([BW07], S. 524 ff.) und sind in allen Wissenschaftsdisziplinen von größter Bedeutung, da sie das Standardinstrument zur empirischen Prüfung von Hypothesensystemen darstellen. Dies geschieht zunächst durch eine mathematische Beschreibung der Relationen und anschließend mit Hilfe statistischer Analysen. Da die Wahrscheinlichkeit, mit einem SGM ein Hypothesensystem empirisch zu bestätigen oder zu falsifizieren durch die Sorgfalt und sachlogische Fundierung bestimmt wird, sind für die Beurteilung der Ergebnisse der SGA nicht allein statistische Kriterien maßgeblich, sondern auch Theorie und Sachlogik von großer Bedeutung ([WM14a], S. XIII).

Neben kausalen Relationen zwischen verschiedenen LV werden in einem SGM ebenfalls die Zusammenhänge zwischen MV und LV dargestellt. Die graphische Darstellung der Variablen und der Relationen zwischen ihnen wird als Pfadmodell bezeichnet ([Bli05], S. 50). Eine zusammenfassende Übersicht der in einem Pfadmodell enthaltenen Strukturen und Elemente zeigt das

⁸ Die Bezeichnung des behandelten Analyseinstruments als „Kausalanalyse“ ist ungenau, da bei dieser Methode lediglich Kovarianz- bzw. Varianzstrukturen analysiert werden und nicht Kausalitäten. Die Bezeichnung Kovarianz- bzw. Varianzstrukturanalyse wäre daher treffender, hat sich in der Literatur jedoch nicht durchgesetzt.

Beispiel in Abb. 5.3. Eine latente Variable, welche lediglich als unabhängige Variable fungiert, wird als exogen bezeichnet. Ist eine latente Variable abhängige oder abhängige und unabhängige Variable zugleich, so gilt sie als endogen.

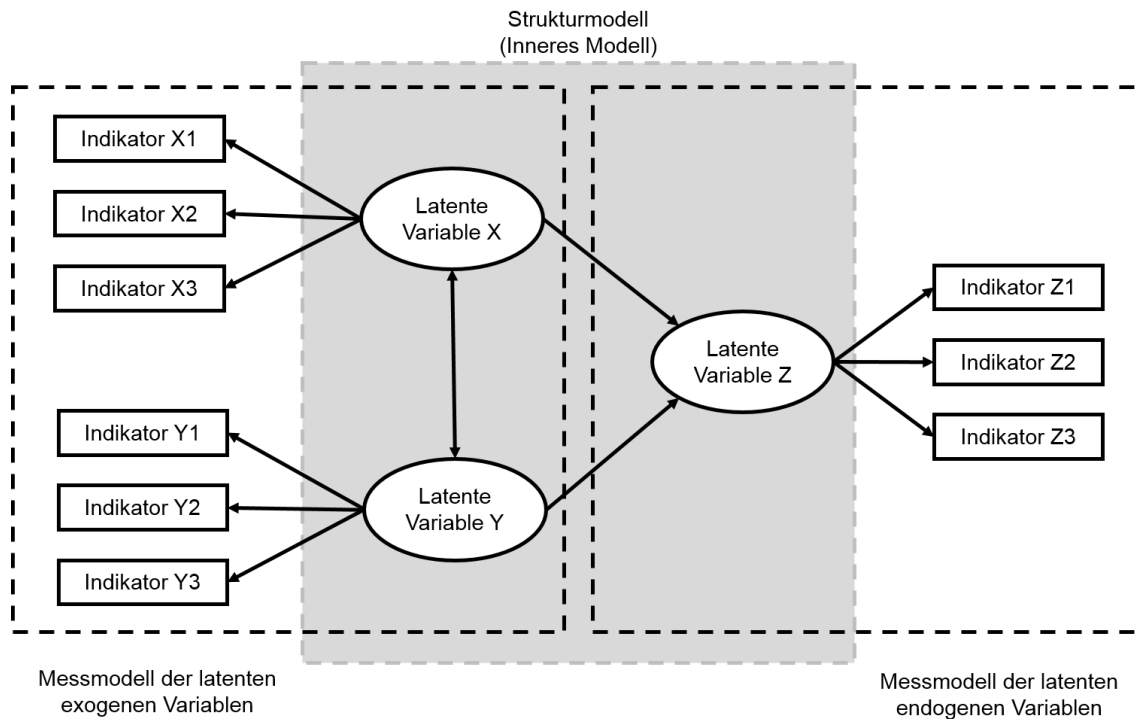


Abb. 5.3: Beispiel für ein Pfadmodell, in Anlehnung an ([GL04], S. 716)

Das Ziel der Strukturgleichungsanalyse ist es, „die a-priori formulierten Wirkungszusammenhänge in einem linearen Gleichungssystem abzubilden und die Modellparameter so zu schätzen, dass die zu den Variablen erhobenen Ausgangsdaten möglichst gut reproduziert werden (...)“ [WM14b]. Neben der Schätzung von Richtung und Stärke der Wirkungskoeffizienten zwischen den betrachteten Variablen dienen SGM ebenso der Abschätzung von Messfehlern. Da die empirischen Messungen von Variablen zumeist mit Fehlern behaftet sind, ist es ein weiteres zentrales Merkmal von SGM, dass sie in der Lage sind, gleichzeitig mit der Schätzung des Strukturmodells auch Messfehler „herauszufiltern“ bzw. herauszurechnen. ([WM14a], S. 7). Diese Fehlervariable spiegelt die durch die unabhängigen Variablen nicht erklärte Varianz wider. Sie beinhaltet dabei zum einen Messungenauigkeiten und umfasst zum anderen alle Einflussgrößen auf die abhängige Variable, die nicht durch die betrachteten unabhängigen Variablen kontrolliert werden können. ([WM14a], S. 10 f.).

Ein SGM besteht aus zwei Teilmodellen, welche die Struktur- und Messgleichungen des Gesamtkonstrukts wiedergeben ([Bli05], S. 50):

- Strukturmodell/Strukturgleichungssystem (SGS): Zusammenhang zwischen LV (ξ_1 bzw. η_1) und LV (η_1 bzw. η_2) als regressionsanalytisches Modell und
- Messmodell/Messgleichungssystem (MGS): Zusammenhang zwischen LV (ξ_1 bzw. η_1 bzw. η_2) und MVs (x_1, x_2 bzw. y_1, y_2 bzw. y_3, y_4) als faktoren- oder regressionsanalytisches Modell.

Um das SGM vollständig zu beschreiben, gilt es, die Parameter der beiden Gleichungssysteme anhand von empirischen Daten zu bestimmen und die Ergebnisse vor dem Hintergrund der fachwissenschaftlichen Disziplin zu interpretieren ([Bli05], S. 50). Hierfür bieten sich zwei grundlegende Verfahren der Kausalanalyse an: die Kovarianzstrukturgleichungsanalyse (KSG) und die Varianzstrukturgleichungsanalyse (VSG). Abb. 5.4 veranschaulicht die hierarchische Einordnung der genannten Methoden der Strukturgleichungsanalyse im Vergleich zur Regressionsanalyse.

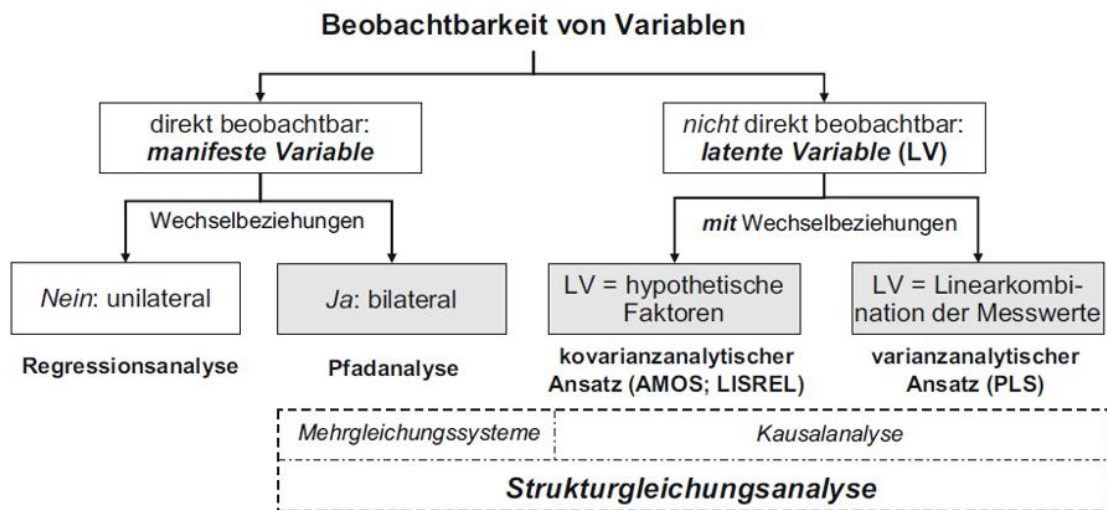


Abb. 5.4: Methoden der Strukturgleichungsanalyse [WM14b]

Im folgenden Abschnitt werden die beiden Verfahren der SGM genauer beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung für die vorliegende Problemstellung untersucht.

5.3.2 Kovarianz- und varianzbasierte Strukturgleichungsmodelle

Basierend auf den Daten der Varianz-Kovarianz-Matrix bzw. Korrelationsmatrix werden beim kovarianzanalytischen Ansatz alle Parameter gleichzeitig geschätzt [WM14b]. Dies geschieht, indem der Abstand zwischen theoretischer Kovarianzmatrix und geschätzter Kovarianzmatrix minimiert wird ([HRS11], S. 139, [CG09]). Dieser Ansatz benötigt kein Detailwissen über die LV, jedoch sind im Besonderen für die Modellbewertung Kenntnisse über die Verteilungseigenschaften der verwendeten Variablen notwendig ([Bli05], S. 50). Die Stärke der kausalen Zusammenhänge kann mit der kovarianzbasierten Analyse ebensowenig ermittelt werden wie Prognosedaten. Vielmehr dient dieser Ansatz der Überprüfung und Bestätigung sowie dem Vergleich von Modellannahmen und Theorien ([HRS11], S. 144; [CG09]). Die Varianzstrukturgleichungsanalyse (VSG) verfolgt im Gegensatz dazu das Ziel, Strukturen und Zusammenhänge aufzudecken sowie Einflussgrößen zu identifizieren ([GBC92], S. 57). Das Vorgehen des varianzbasierten Ansatzes ist zweistufig. Zunächst erfolgt die Ermittlung der Schätzwerte für die LV. Anschließend können mit diesen die Parameter der Gleichungssysteme bestimmt werden. Anders als bei der Kovarianzstrukturgleichungsanalyse (KSG) sind hier die Anforderungen an die Verteilung der Variablen sehr gering ([Bli05], S. 50). Darüber hinaus eignet sich die VSG auch für kleine Stichprobenumfänge, während für die KSG große Stichproben benötigt werden. Ein detaillierter, tabellarischer Vergleich der beiden Analyseverfahren ist in Abb. 5.5 dargestellt:

| Kriterium | Kovarianzanalytischer Ansatz | Varianzanalytischer Ansatz |
|---------------------|--|---|
| Zielsetzung | Bestmögliche Reproduktion der empirischen Varianz-Kovarianz-Matrix | Bestmögliche Vorhersage der Datenmatrix bzgl. der Zielvariablen |
| Theoriebezug | Theorie-testender Ansatz (hard modeling) | daten- und prognoseorientierter Ansatz (soft modeling) |
| Zielfunktion | Minimierung der Differenz zwischen empirischen und modelltheoretischen Kovarianzen: $(S - \hat{\Sigma}) \rightarrow \text{Min!}$ | Minimierung der Differenz zwischen beobachteten und geschätzten Falldaten |
| Methodik | faktoranalytischer Ansatz mit simultaner Schätzung aller Parameter des Kausalmodells | regressionsanalytischer Ansatz bei zweistufiger Schätzung von Messmodellen und Strukturmodell |
| Datenbasis | Varianz-Kovarianz-Matrix | Ausgangsdatenmatrix |
| Latente Variable | Faktoren im Sinne der Faktorenanalyse und Isolierung der Fehlervarianz der Messvariablen bei der Schätzung des Strukturmodells | Dimensionen im Sinne der Hauptkomponentenanalyse und Konfundierung von Faktor- und Fehlervarianz bei der Schätzung der Konstruktwerte |
| Strukturmodell | rekursive und nicht-rekursive Modelle | nur rekursive Modelle |
| Messmodelle | primär reflektiv | formative und reflektive Messmodelle |
| Verteilungsannahmen | Multinormalverteilung | keine |
| Gütebeurteilung | globale und lokale inferenzstatistische Gütemaße | partielle Gütekriterien bzgl. Vorhersage der Datenmatrix |
| Stichprobenumfang | große Stichproben | kleine Stichproben ausreichend |
| Modellvergleiche | möglich | nur eingeschränkt möglich |
| Programmpakete | LISREL; EQS; AMOS | LVPLS; PLS Graph; SmartPLS |

Abb. 5.5: Zentrale Unterschiede zwischen dem kovarianzanalytischen und dem varianzanalytischen Ansatz zur Kausalanalyse (nach [WM14a], S. 74; [Gie10], S. 170).

Abschließend lässt sich festhalten, dass der Kovarianz- und der Varianzansatz für unterschiedliche Zielsetzungen der Kausalanalyse geeignet sind und damit nicht substitutiv betrachtet werden sollten. Der kovarianzanalytische Ansatz weist zur „echten“ Theorieprüfung die wesentlich höhere Eignung auf und sollte hier die erste Wahl darstellen. Im vorliegenden Anwendungsfall liegen die von *Chin* definierten Kriterien für eine Anwendung des varianzanalytischen Ansatzes vor [Chi98]. Demnach sollte dieses Verfahren bevorzugt werden, wenn:

- die zu erforschenden Phänomene noch relativ neuartig sind und keine fundierten Mess- und Konstrukt-Theorien vorliegen;
- Modelle eine hohe Anzahl von Messvariablen aufweisen und komplex sind;
- das Treffen von Vorhersagen im Vordergrund steht;
- nur relativ kleine Stichproben vorhanden sind.

Eine ausführliche Begründung für die Anwendung des varianzanalytischen Ansatzes wird in Kapitel 7 deutlich, wenn das Modell und die Datenbasis spezifiziert werden.

5.3.3 Vergleich reflexiver und formativer Messmodelle

Ein wesentliches Merkmal von SGM ist die Operationalisierung von latenten Konstrukten. Dies geschieht über die Zuordnung von Indikatorvariablen zu latenten Variablen in den sog. Messmodellen. Im Zuge der SGM müssen somit Messmodelle für alle latenten Variablen erarbeitet und in das Gesamtmodell aufgenommen werden. Ein Messmodell beschreibt mit konkreten Anweisungen, aus welchen beobachtbaren Sachverhalten und entsprechenden Zahlenwerten eine latente

Variable besteht. Dieser Schritt wird auch als Operationalisierung der Konstrukte bezeichnet, da hierdurch die Messbarkeit der latenten Variablen (Konstrukte) ermöglicht wird [WM14b].

Es gibt zwei Arten von Messmodellen, zwischen denen unterschieden werden muss: das formative Messmodell und das reflektive Messmodell. Während einem formativen Messmodell die Ansätze der Regressionsanalyse zugrunde liegen, wobei die LV als abhängige, jedoch nicht messbare Variable betrachtet wird, basieren reflektive Messmodelle auf einem faktoranalytischen Ansatz, bei welchem angenommen wird, dass die manifesten Variablen untereinander korrelieren [WM14b]. Somit gelten die manifesten Variablen eines formativen Messmodells als Verursacher der latenten Variablen, dies wird am folgenden Beispiel deutlich:

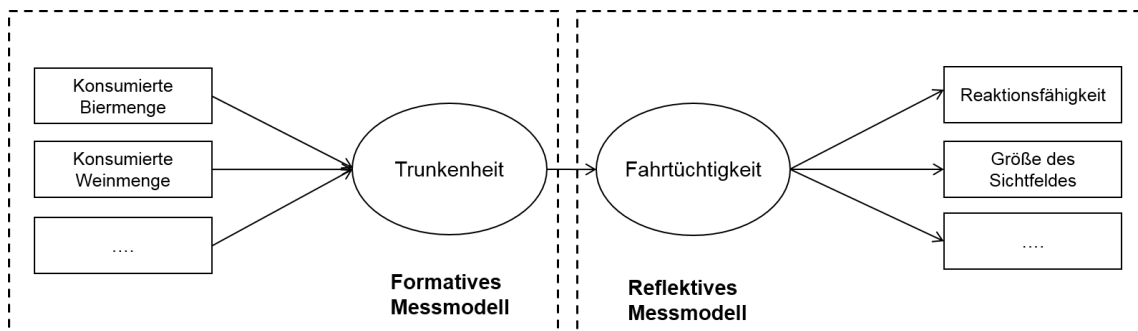


Abb. 5.6: Vergleich von formativem und reflektivem Messmodell an einem Beispiel, in Anlehnung an [RBW⁺06].

Das Zusammenspiel der manifesten Variablen bestimmt die latente Variable, was bedeutet, dass sich die Gültigkeit einer latenten Variable durch das Wegfallen einer ihrer definierenden manifesten Variable verändern bzw. nichtig werden kann. Bei reflektiven Modellen ist dagegen die latente Variable die verursachende Größe der manifesten Variable, jede manifeste Variable ist somit für sich allein eine Repräsentation der latenten Variable [WM14b]. Eine Übersicht, wann welches der beiden Messmodelle besser geeignet ist, wird in Tab. 5.5 dargestellt.

Tab. 5.5: Entscheidungskriterien zur Identifikation von reflektiven und formativen Messmodellen, in Anlehnung an ([JMP], S. 203).

| Kriterium | Reflektives Messmodell | Formatives Messmodell |
|--|---|--|
| Kausalitätsrichtung | Vom Konstrukt zu den manifesten Variablen | Von den manifesten Variablen zum Konstrukt |
| Sind die Indikatoren definierende Charakteristika oder Manifestationen der latenten Variablen? | Manifestationen | Definierende Charakteristika |
| Würden Änderungen in der Ausprägung der Indikatoren eine Veränderung der latenten Variablen verursachen? | Nein | Ja |

| | | |
|--|------|--------------------|
| Würden Änderungen in der Ausprägung der latenten Variablen eine Veränderung der Indikatoren verursachen? | Ja | Nein |
| Haben die Indikatoren den gleichen bzw. einen ähnlichen Inhalt oder beziehen sie sich auf ein gemeinsames Thema? | Ja | Nicht erforderlich |
| Würde die Elimination eines Indikators den konzeptionellen Inhalt der latenten Variablen verändern? | Nein | Möglich |
| Sind Veränderungen in der Ausprägung eines Indikators verbunden mit gleichgerichteten Veränderungen der übrigen Indikatoren? | Ja | Nicht erforderlich |
| Haben die Indikatoren dieselben Antezedenzen und Konsequenzen? | Ja | Nicht erforderlich |

Der systematische Prozess der Partial-Least-Squares-Strukturgleichungsmodellierung wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.3.4 Ablauf der Modellierung

Da in der Literatur häufiger von Partial-Least-Squares-Strukturgleichungsmodellierung (PLS-SGM) synonym für Varianzstrukturgleichungsanalyse die Rede ist, wird im Nachfolgenden ebenfalls PLS an Stelle von VSG verwendet ([WM14b], S. XIV; [Bli05], S. 50). Der von *Wold* entwickelte Ansatz versucht, mit Hilfe der Kleinste-Quadrate-Schätzung (auf Englisch: Partial Least Squares Analysis) die Werte der Ausgangsdatenmatrix möglichst exakt vorherzusagen.

Im ersten Schritt der PLS-SGM müssen Hypothesen über die vermuteten Beziehungen zwischen den latenten Variablen aufgestellt werden. Diese werden anschließend durch die Darstellung in einem Strukturmodell spezifiziert. In Schritt 3 gilt es, Messmodelle für alle latenten Variablen zu erarbeiten und in das Gesamtmodell aufzunehmen. Sind sowohl Struktur- als auch Messmodelle spezifiziert, folgt in Schritt 4 die Datenerhebung für alle im SGM enthaltenen Variablen. Mit Hilfe von Programmen wie Smart PLS, PLS Graph und anderen kann im Anschluss mit der Schätzung des PLS-Pfadmodells begonnen werden ([Hai14], S. 25). An dieser Stelle wird auf eine detaillierte Beschreibung des Schätzalgorithmus verzichtet. Dieser kann im Anhang dieser Arbeit nachgelesen werden oder anhand von weiterführender Literatur wie in *Bliemel* ([Bli05], S. 60f) oder *Esposito Vinzi* ([ECH⁺10], S. 49f) genauer nachvollzogen werden. Jedoch geben die

folgenden Erläuterungen ein grundlegendes Verständnis für die Vorgehensweise zur Schätzung des Pfadmodells:

Zunächst ermittelt der PLS-SGM-Algorithmus aus den vorhandenen Daten Werte für die Konstrukte der latenten Variablen. Mit diesen Werten werden im nächsten Schritt die Gewichte und Ladungen der Messmodelle sowie die Pfadkoeffizienten des Strukturmodells errechnet. Hierbei werden für formative Messmodelle partielle multiple Regressionen und für reflektive Messmodelle einfache Regressionen durchgeführt. Die Pfadkoeffizienten des Strukturmodells entstehen ebenfalls aus einer partiellen Regression, wobei jeweils eine endogene latente Variable als abhängige Variable berücksichtigt wird ([Hai14], S. 77).

Bei der Auswertung der Ergebnisse werden zunächst die Messmodelle anhand von Gütekriterien beurteilt. Hierbei wird mit den Ergebnissen der reflektiven Messmodelle begonnen, anschließend folgen die formativen Messmodelle. Die erhaltenen Koeffizienten zwischen manifesten Variablen und latenten Variablen im reflektiven Modell werden als Ladungen bezeichnet, die Koeffizienten eines formativen Modells als Gewichte ([Hai14], S. 76). Sind die Ergebnisse der reflektiven Messmodelle valide und reliabel, so kann das Strukturmodell analysiert und beurteilt werden. Die Koeffizienten zwischen zwei latenten Variablen werden hierbei als Pfadkoeffizienten benannt und sind standardisiert auf das Intervall $[0; 1]$ bzw. $[-1; 0]$, wobei 0 keinen Einfluss und 1 bzw. -1 einen absoluten Einfluss darstellen. Sie können als Regressionskoeffizienten interpretiert werden, welche aus der Kleinste-Quadrate-Schätzung resultieren. Der p-Wert einer Beziehung, errechnet aus den t-Werten des Bootstrappings, gibt Auskunft darüber, ob die Beziehung statistisch signifikant ist. In Schritt 8, der erweiterten PLS-SGM-Analyse, können im Nachgang beispielsweise Effekte untersucht werden, welche die ermittelten Zusammenhänge potenziell beeinflussen ([Hai14], S. 25). Ein mediierender Effekt liegt beispielsweise vor, wenn der Effekt einer exogenen Variable auf eine endogene Variable ganz oder teilweise durch einen Mediator vermittelt wird. Von einem moderierenden Effekt wird dagegen gesprochen, wenn die Richtung oder Stärke der Beziehung zwischen diesen beiden Variablen durch eine dritte Größe beeinflusst wird ([Bli05], S. 103). Das folgende Beispiel zeigt die Wirkung der Moderatorvariablen „Ausbildung“ auf den Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variablen „Berufserfahrung“ und der abhängigen Variablen „Individueller Jahresumsatz“:

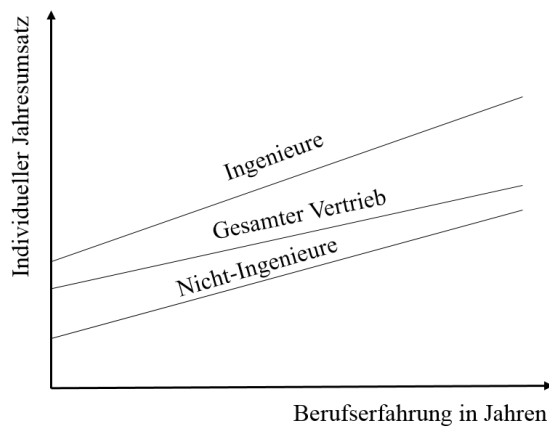


Abb. 5.7: Darstellung einer Moderatorbeziehung. Unterschiedliche Niveaus und Steigungen für verschiedene Gruppen, in Anlehnung an ([Mül07], S. 246).

Zuletzt ist es wichtig, alle Ergebnisse im gemeinsamen Kontext zu interpretieren und die erhaltenen Schlussfolgerungen zu formulieren ([Hai14], S. 25). Abb. 5.8 zeigt die genannten Prozessschritte der PLS-Strukturgleichungsmodellierung in ihrer Durchführungsreihenfolge.



Abb. 5.8: Systematischer Prozess der PLS-Strukturgleichungsmodellierung, in Anlehnung an ([Hai14], S. 25)

6 Komplexitätstreiber als Einflussfaktoren auf das Komplexitätsniveau

Da kein einheitliches Maß zur Komplexitätsbewertung existiert, soll zunächst der Stand der Wissenschaft bezüglich bereits dokumentierter Bewertungskriterien analysiert werden. Hierzu wird eine Literaturrecherche zur Identifikation von Komplexitätstreibern mit Logistikbezug durchgeführt, da diese als Indikatoren der Systemeigenschaft Komplexität gelten ([Lam12], S. 32). Grundsätzlich wird als Treiber ein Phänomen oder eine Gegebenheit bezeichnet, die als Konsequenz ihres eigenen Vorkommens nachfolgende Gegebenheiten oder Entscheidungen nach sich zieht. Aus systemtheoretischer Sicht können Treiber als Systemelemente verstanden werden, die einen kritischen Einfluss auf benachbarte Systemelemente oder sogar das gesamte System aufweisen ([Lam12], S. 33). Als Komplexitätstreiber werden folglich all jene Einflussfaktoren bezeichnet, welche das Komplexitätsniveau eines Sachverhalts im Vergleich zu einer Ausgangssituation erhöhen ([Mey07], S. 26). Sie sind aber lediglich Indikatoren für Komplexität und beschreiben nie alle Eigenschaften dieses Phänomens ([Lam12], S. 31). Die Beschränkung auf logistikspezifische Aspekte erscheint dabei als notwendig, um die Aussagekraft der Literaturanalyse für die vorliegende Problemstellung sicherzustellen. Im Anschluss werden die identifizierten Komplexitätstreiber hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit in einer qualitativen Untersuchung analysiert und um weitere Treiber ergänzt.

6.1 Literaturübersicht

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, existieren verschiedene Ansätze zur Kategorisierung von Komplexität, welche sich auch für Komplexitätstreiber, als Ursache der Komplexität, anwenden lassen. Bereits *Rao* und *Kant* haben den Forschungsbedarf zur weiteren Identifikation von Treibern für Produkt-, Netzwerk- und Prozesskomplexität aufgezeigt ([Kan94], S. 19), daher wird auch in der vorliegenden Arbeit diese Kategorisierung aufgegriffen. Darüber hinaus werden zur übersichtlicheren Darstellung Komplexitätstreiber in interne und externe Treiber eingeteilt. Die internen Komplexitätstreiber lassen sich in Produkt-, Netzwerk- und Struktur- bzw. Prozesskomplexitätstreiber einteilen. In diesem Zusammenhang werden die Teile- bzw. Variantenvielfalt oder die Anzahl an Lieferanten am häufigsten genannt. Unter den externen Komplexitätstreibern findet sich hauptsächlich die Einteilung in Marktkomplexität und Kundenkomplexität. Als Beispiele hierfür nennt *Wildemann* individuelle Kundenanforderungen, Anzahl der Kunden, Wettbewerbsdynamik, Marktdynamik, gesetzliche Rahmenbedingungen und die Globalisierung der Märkte [WV11]. Die vorliegende Literaturanalyse erhebt nicht den Anspruch, sämtliche Arbeiten zu Komplexitätsursachen zu berücksichtigen, denn je nach Fokus und Betrachtungsweise lässt sich die Menge der komplexitätstreibenden Größen beliebig erweitern ([Gie10], S. 36). Da der Fokus dieser Arbeit auf der Logistikkomplexität in Montagewerken liegt, wird auch nur jene Literatur berücksichtigt, welche Schnittstellen mit dieser Thematik aufweist.

Zunächst gilt es festzuhalten, dass im Rahmen der durchgeführten Literaturrecherche keine Quelle identifiziert werden kann, deren Untersuchungsfokus auf der Komplexität der Montagelogistik liegt. Vielmehr werden je nach Betrachtungsbereich verschiedene Komplexitätstreiber identifiziert, welche in Teilen der Logistikkomplexität zugeordnet werden können. In Bezug auf die vorliegende Problemstellung bestätigt sich demnach die von *Meyer* für einen umfassenderen Betrachtungsbereich formulierte Erkenntnis, wonach in der wissenschaftlichen Literatur Ergänzungsbedarf bezüglich autonomer, logistikspezifischer Einflussfaktoren auf die Komplexität von Systemen besteht ([Mey07], S. 81). Daher muss die Komplexitätstreiberliste im Rahmen einer empirischen Untersuchung um weitere praxisrelevante Größen mit dem Fokus auf Logistik ergänzt werden. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit Handlungsempfehlungen für das Komplexitätsmanagement in der Montagelogistik abgeleitet werden sollen, erfolgt eine Einschränkung auf interne Komplexitätstreiber. Denn nur diese können auch aktiv durch ein Komplexitätsmanagement beeinflusst werden.

6.2 Qualitative Vorgehensweise zur Identifikation der Komplexitätstreiber und Hypothesengenerierung

Um die in der Literatur genannten Treiber zu validieren und ihre Bedeutung in der Praxis zu bestimmen, wurden ausgehend von den Ergebnissen der Literaturrecherche Experteninterviews durchgeführt. Die folgenden Abschnitte beinhalten eine Beschreibung der Vorgehensweise zur Datenerhebung und -auswertung sowie die Darstellung der Ergebnisse der Experteninterviews. In einer abschließenden Diskussion werden die Ergebnisse interpretiert und die wichtigsten Treiber für Logistikkomplexität definiert, welche dann als Grundlage für die kausalanalytische Untersuchung dienen.

6.2.1 Zusammensetzung des Samples

Für die Ermittlung der praxisrelevanten Komplexitätstreiber mit Logistikbezug ist eine Einschätzung von Experten in diesem Themengebiet zielführend. Durch die Datenerhebung sollen außerdem weitere, bisher nicht berücksichtigte Treiber ermittelt werden und Zusammenhänge zwischen Treibern und Kennzahlen der Logistik festgestellt werden, um bereits mögliche Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu identifizieren. Mit einer qualitativen, nicht-standardisierten Studie in Form von leitfadenorientierten Experteninterviews können die drei Ziele Validierung, Ermittlung neuer Erkenntnisse und Darstellung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen am besten erreicht werden (siehe Kapitel 5.1). Tab. 6.1 zeigt die Kriterien, welche unterstützend für diese Entscheidung herangezogen wurden. In der rechten Spalte sind jeweils die Antworten auf die Fragen der Kriterien zusammengefasst.

Tab. 6.1: Kriterien zur Bestimmung der Befragungsart mit jeweiliger Ausprägung in Bezug auf die Forschungsfragen dieser Arbeit, in Anlehnung an ([MLP⁺11], S. 86)

| Kriterium | Antwort |
|---|--|
| 1. Erkenntnisinteresse: Was will ich wissen? | <ul style="list-style-type: none"> - Validierung der in der Literatur identifizierten Komplexitätstreiber in der Werkslogistik - Ermittlung weiterer Treiber und Erkenntnisse bzgl. Auswirkungen von Komplexität - Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Treibern und Kennzahlen der Logistik |
| 2. Zielgruppe: Wen möchte ich befragen? | Experten im Bereich der Logistik- und Bereitstellplanung in der Automobilindustrie |
| 3. Ressourcen: Welche Mittel und welche Zeit stehen zur Verfügung? | <p>Beschränkte Mittel: Zur Verfügung stehende Experten und finanzielles Budget</p> <p>Beschränkte Zeit: 60 Minuten (aufgrund Zeitmangel der Experten)</p> |
| 4. Persönliche Vorlieben: Welche Befragungsart liegt mir am besten? | Hier nicht relevant |

Die Zusammenhänge zwischen Komplexitätstreibern und ihren Auswirkungen können aus den Erfahrungen der Experten erläutert werden, da sie mit der Thematik der Logistikkomplexität in ihrem Arbeitsalltag in sehr enger Beziehung stehen. Außerdem können durch die offene Befragung weitere Komplexitätstreiber oder logistische Erfolgsgrößen aufgedeckt werden. Ein weiteres Ziel der Befragung war es, Messgrößen für die jeweiligen Treiber zu bestimmen, mit welchen die quantitative Analyse durchgeführt werden kann.

Als Experten für die Interviews wurden Mitarbeiter, Gruppenleiter und Abteilungsleiter aus der Logistik- und Bereitstellplanung eines großen deutschen Premiumautomobilherstellers gewählt. Aufgrund ihrer Position und/oder langjährigen Unternehmenserfahrung besitzen sie einen großen Wissensschatz in Bezug auf das Thema Logistikkomplexität, sodass ihre Antworten von hoher praktischer Relevanz sind. Insgesamt wurden im Zeitraum von September 2015 bis März 2016 neun Interviews mit Experten aus vier verschiedenen Werken in Deutschland geführt. Um die Experten nicht zu überfordern und den Zeitbedarf im Rahmen zu halten, wurde der Fokus auf entweder Produkt-, Netzwerk- oder Strukturkomplexität gelegt. Die Konzentration auf inländische Werke erfolgte aus Zeit- und Kostengründen. Die Wahl von Logistikexperten in verschiedenen Werken ermöglicht einen werksübergreifenden Vergleich der Aussagen. Bei ähnlichen oder gleichen Ansichten der Experten ist es dadurch möglich, allgemeine und valide Schlussfolgerungen zu ziehen.

Tab. 6.2: Übersicht der Experteninterviews

| Nummer | Zeitraum | Dauer | Experte | Themenfokus |
|--------|----------------|------------|----------------------------------|---------------------|
| 1 | September 2015 | 55 Minuten | Logistikplaner | Produktkomplexität |
| 2 | September 2015 | 53 Minuten | Gruppenleiter Logistikplanung | Produktkomplexität |
| 3 | Oktober 2015 | 48 Minuten | Gruppenleiter Logistikplanung | Produktkomplexität |
| 4 | Januar 2016 | 59 Minuten | Gruppenleiter Logistikplanung | Netzwerkkomplexität |
| 5 | Januar 2016 | 49 Minuten | Abteilungsleiter Logistikplanung | Netzwerkkomplexität |
| 6 | Februar 2016 | 53 Minuten | Logistikplaner | Netzwerkkomplexität |
| 7 | September 2015 | 62 Minuten | Logistikplaner | Strukturkomplexität |
| 8 | Februar 2016 | 58 Minuten | Gruppenleiter Logistikplanung | Strukturkomplexität |
| 9 | März 2016 | 50 Minuten | Gruppenleiter Logistikplanung | Strukturkomplexität |

6.2.2 Ablauf der Interviews

Die Expertengespräche wurden als semistrukturierte Interviews geführt, für die je ein Leitfaden pro Komplexitätskategorie mit offenen Fragen entwickelt wurde (siehe Anhang A). Im Gegensatz zum vollstrukturierten Interview kann das Themenfeld dadurch umfassender erforscht werden, da dem Gesprächspartner die Möglichkeit gegeben wird, den Gesprächsverlauf aktiv mitzugestalten. Die Inhalte der Leitfaden wurden an die in Abschnitt 5.1.3 diskutierten Vorgehensweisen und Kriterien angelehnt. Die Leitfäden sind in die folgenden drei Hauptkategorien gegliedert:

- A Einleitung
- B Interviewfragen
- C Verabschiedung

Die Einleitung beinhaltet die Vorstellung des Interviewers, eine Beschreibung des Forschungsvorhabens und dessen Ziele, der Ziele der Befragung sowie eine Begriffsdefinition von „Komplexität“. Letzteres, die Begriffsdefinition, ist unumgänglich, da hiermit ein einheitliches Verständnis zum Sinn der verwendeten Begriffe unter allen Beteiligten geschaffen wird [Ste14].

Für den Aufbau der Interviewfragen in Teil B wurde ein dreistufiger Prozess gewählt. Um den Einstieg in das Interview zu erleichtern, wurde zunächst mit der Vorstellung des Interviewers gestartet. Im Anschluss daran folgten Fragen zum persönlichen Komplexitätsbezug des Experten in seinem Arbeitsumfeld. Diese erste, indirekte Befragung bzgl. Treiber der Logistikkomplexität diente dazu, ohne Beeinflussung durch Vorwegnahmen wichtige Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Logistik zu erfahren. Ebenfalls wurde dem Befragten die Möglichkeit gegeben, sich frei in die Thematik einzureden. Im Anschluss daran folgte eine Diskussion zu den bereits aus der Literatur identifizierten Treibern. In dieser direkten Befragung sollten die Treiber von den Experten qualifiziert bestätigt bzw. abgelehnt werden ([Kai14], S. 65). Die ermittelten Komplexitätstreiber wurden hierfür der Reihe nach angesprochen, gegebenenfalls erläutert und die Auffassung der Experten bzgl. Ursachen und Wirkungen des jeweiligen Treibers diskutiert. Im letzten Teil des Interviews wurde die Aussagekraft der Experten zum Thema Komplexität in der Logistik anhand von Fragen zu Persönlichkeit und beruflicher Erfahrung geprüft.

In Teil C des Interviews war den Experten die Möglichkeit gegeben, eigene Fragen zu stellen und Punkte zu ergänzen, welche bis dahin nicht angesprochen wurden, die aber relevant für die Forschungsfrage sein könnten. Das Ziel hierbei ist, bisher nicht beachtete Inhalte oder Aspekte aufzudecken und den Abschluss des Interviews einzuleiten. Den Abschluss des Interviews bildeten die Danksagung und Verabschiedung des Teilnehmers.

Die Fragen für die Experteninterviews im Rahmen dieser Arbeit wurden nach den genannten Kriterien in Abschnitt 5.1 für gute qualitative Studien formuliert. Da die Interviews einem Leitfaden folgten, war der Zeitaufwand abschätzbar und die Rollenstruktur für den Teilnehmer vorab eindeutig bestimmbar. Es wurden keine persönlichen, für den Kontext irrelevanten Fragen gestellt. Die Interviews fanden am Arbeitsplatz der Interviewteilnehmer entweder als persönliches Gespräch oder als Online-Konferenz mit Hilfe von Skype statt. Die Dokumentation erfolgte während des Interviews mit einem Audio-Aufnahmegerät. Für diese Aufnahmen war das Einverständnis der Teilnehmer notwendig, welches zu Beginn der Interviews erbeten wurde. Alle Teilnehmer stimmten den Aufnahmen zu. Ein Interview dauerte im Schnitt 54 Minuten. Das entstandene Audiomaterial wurde im Anschluss an die Interviews transkribiert und interpretiert, was in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

6.2.3 Datenanalyse

Bevor mit der eigentlichen Datenauswertung begonnen werden kann, müssen die Audiodateien der Interviews transkribiert werden. Unter Transkription versteht sich in der empirischen Sozialforschung das Verschriftlichen verbaler und ggf. auch nonverbaler Kommunikation ([Kuc10], S. 33). Der Detailgrad der Transkription wird je nach Untersuchungszweck und Forschungsfragen bestimmt, da manchmal nur eine grobe Zusammenfassung der Aussagen benötigt wird, in anderen Fällen jedoch auch Mimik und Gestik des Interviewteilnehmers sehr relevant sind ([Kuc08], S. 27). Einheitliche Transkriptionsstandards gibt es daher keine, jedoch können aus den bestehenden Transkriptionsregeln die jeweils für das Forschungsziel passenden Regeln gewählt werden.

Das Ziel der im Rahmen dieser Arbeit geführten Experteninterviews war es, die Treiber der Forschungsbasis für Logistikkomplexität zu validieren oder abzulehnen. Für die Transkription der Interviews wurden die Regeln nach *Kuckartz* [Kuc08] angewendet, da diese einen ausreichenden Detaillierungsgrad für die Ergebnisermittlung aufweisen. Während der ersten Transkription ergaben sich zusätzlich drei weitere Regeln, um die Verschriftlichung zu erleichtern.

- Es wird wörtlich transkribiert, also nicht lautsprachlich oder zusammenfassend. Vorhandene Dialekte werden nicht mit transkribiert.
- Die Sprache und Interpunktion wird leicht geglättet, d. h. an das Schriftdeutsch angenähert. Aus „Er hatte noch so'n Buch genannt“ wird bspw. „Er hatte noch so ein Buch genannt“.
- Alle Angaben, die einen Rückschluss auf eine befragte Person erlauben, werden anonymisiert.
- Deutliche, längere Pausen werden durch Auslassungspunkte (...) markiert.
- Besonders betonte Begriffe werden durch Unterstreichungen gekennzeichnet.
- Zustimmungende bzw. bestätigende Lautäußerungen der Interviewer (Mhm, Aha etc.) werden nicht mit transkribiert, sofern sie den Redefluss der befragten Person nicht unterbrechen.
- Einwürfe der jeweils anderen Person werden in Klammern gesetzt.
- Lautäußerungen der befragten Person, die die Aussage unterstützen oder verdeutlichen (etwa Lachen oder Seufzen), werden in Klammern notiert.
- Absätze der interviewenden Person werden durch ein „I“, die der befragten Person(en) durch ein eindeutiges Kürzel, z. B. „B4“, gekennzeichnet.
- Jeder Sprecherwechsel wird durch zweimaliges Drücken der Enter-Taste, also eine Leerzeile zwischen den Sprechern deutlich gemacht, um die Lesbarkeit zu erhöhen.
- Zusätzlich werden Zeichen für paraverbale Äußerungen benutzt ([Kuc08], S. 27; [Kuc10], S. 44f.).

Zusätzlich:

- Für das Interview irrelevante Fragen oder Äußerungen wie z. B. die Frage nach möglichen Ansprechpartnern ebenso wie die Einleitung in das Gespräch werden nicht transkribiert.
- Kurze und längere Pausen nach einem Sprecherwechsel werden nicht durch Auslassungspunkte gekennzeichnet, sondern als Hinweis in Gedankenstrichen gefasst.
- Die Beschreibung einer Handlung, wie z. B. das Aufzeigen einer Liste, wird durch kursive Schrift hervorgehoben.

Die Transkription der Audio-Dateien wurde mit Hilfe der Freeware Express Scribe und der Software F4 durchgeführt. Für die Datenauswertung wurde die qualitative Inhaltsanalyse nach *Kaiser* angewendet, da sie eine gute Alternative zu den ursprünglichen, von *Mayring* [May10] entwickelten, inhaltsanalytischen Verfahren darstellt. Eine Analyse der Wirkungsweise oder Entstehung des Textes außerhalb der Interviewsituation, wie von *Mayring* vorgeschlagen, ist für die

Ergebnisse der Experteninterviews in dieser Arbeit nicht relevant ([Kai14], S. 90). Mit der Methode nach *Kaiser* [Kai14] können daher in weniger Phasen Ergebnisse von ähnlicher Qualität erzielt werden. Im Anschluss an die Transkription des Audiomaterials wurden alle Interviews bezüglich ihrer inhaltlichen Qualität zur Beantwortung der Untersuchungsfragen geprüft und durch eine kategoriale Kodierung logisch strukturiert. Der analytische Begriff *Kategorie* beschreibt hierbei ein zu untersuchendes Merkmal ([MLP⁺11], S. 36). Kodierung wird in der qualitativen Sozialforschung als Zuordnung von Erklärungsvariablen zu spezifischen Ausprägungen bezeichnet (zum Beispiel: vorhanden / teilweise vorhanden / nicht vorhanden) ([Kai14], S. 100). Hier wird unter Kodierung jedoch die Zuordnung von Textpassagen zu konzeptionellen Kategorien verstanden. Als Analysedimension wurden aneinanderreihende Sätze bzw. Absätze gewählt, um Zusammenhänge korrekt zu kodieren. Die Kategorien für die Kodierung wurden im Vorfeld der Interviews auf Grundlage der Fragestellungen im Leitfaden erstellt. Weitere Kategorien entstanden während der Kodierung der Interviews. Solch ein Kategoriensystem ermöglicht die Nachvollziehbarkeit der Studie für Außenstehende ([MLP⁺11], S. 36).

Tab. 6.3: Entstandene Kategorien der qualitativen Inhaltsanalyse

| Nr. | Kategorie | Interviewabschnitt |
|-------|--|--------------------|
| K1.1 | Komplexitätsbezug der Experten im Arbeitsumfeld | B1 |
| K1.2 | Verständnis des Begriffs Logistikkomplexität | B1 |
| K1.3 | Wahrnehmung einer Veränderung von Logistikkomplexität über die letzten Jahre | B1 |
| K1.4 | Haupttreiber für Logistikkomplexität aus Sicht der Experten | B1 |
| K2.1 | Bereits identifizierte Produkttreiber anhand Literaturrecherche | B2 |
| K2.2 | Bereits identifizierte Netzwerktreiber anhand Literaturrecherche | B2 |
| K2.3 | Bereits identifizierte Strukturtreiber anhand Literaturrecherche | B2 |
| K.2.4 | Weitere, bisher nicht berücksichtigte Treiber | B2 |

| | | |
|------|---|----|
| K2.5 | Stärkster Treiber | B2 |
| K2.6 | Schwächster Treiber | B2 |
| K2.7 | Zusammenhänge mit anderen Faktoren | B2 |
| K2.8 | Möglichkeiten zur quantitativen Erhebung der Treiber im Unternehmen | B2 |

Die Analyse der Textpassagen fand tabellarisch in *Microsoft Excel* statt. Hierzu wurden die entsprechenden Interviewstellen aus der Transkriptions-Datei extrahiert und der entsprechenden Kategorie in der Excel-Tabelle zugeordnet. In Tab. 6.3 sind alle entstandenen Kategorien aufgezeigt.

Um eine spätere Rückverfolgbarkeit im Originaltext zu gewähren, war ebenfalls eine Dokumentation der entsprechenden Zeilennummern eines Textausschnitts erforderlich. Durch diese Selektion wurden die Inhalte in manchen Fällen aus ihrem chronologischen Kontext entfernt. Dies hat jedoch für die Auswertung und Ergebnisinterpretation der Interviews in dieser Arbeit keine Relevanz. Im nächsten Schritt wurden je Kategorie und Interview die Kernaussagen aus den Textpassagen herausgefiltert. Dies ermöglichte eine ganzheitliche Schlussfolgerung und Interpretation der Ergebnisse je Kategorie. Abb. 6.2 zeigt einen Ausschnitt aus der qualitativen Inhaltsanalyse in Excel.

| Kategorie | Relevante Textpassage | Quelle | | Kernaussage |
|--|---|------------------|-------------------|--|
| | | Interview | Zeilen | |
| 1.2. Einschätzung: Ist-Situation der Logistikkomplexität | <p>B1: Weil natürlich wir mit unseren Fahrzeugen immer besser werden und immer mehr Funktionen anbieten. Und das hat zur Folge, dass auch die Netzwerkkomplexität steigt. (31 - 32)</p> <p>Aber da Produkt und Struktur auch komplexer geworden sind, ist natürlich die Netzwerkkomplexität auch größer geworden. Also ich denke das ist ein direkter Zusammenhang und man muss halt jetzt sich mit extrem vielen Abteilungen abstimmen, also dass es auch die Werksplanung auch betrifft. (36 - 39)</p> | Interview Werk A | 31-32 36-39 | <p>Netzwerkkomplexität steigt. Netzwerkkomplexität steht in direkten Zusammenhang mit Produkt- und Strukturkomplexität. Früher weniger Low Cost country sourcing, Anteil wächst. --> Anzahl Overseas Lieferanten/Lieferwerke bestätigt das.</p> <p>Anzahl Lieferanten muss organisiert werden, auch in verschiedenen Werken. Relevant hier auch die Kommunikation, dass alles funktioniert, werksintern, werksübergreifend oder zum Lieferanten hin.</p> <p>wenn Sachnummern werksübergreifend geändert werden: interne Komplexitätssteigerung; Behälterumstellung externe Komplexitätssteigerung: Lieferantenvergabe</p> |
| | <p>B2: (1) Produktkomplexität ist natürlich Haupttreiber für die Logistik, das ist ganz klar. Komplexitäten, die unseren Materialfluss beeinflussen sind zum Beispiel, dass wir die Lieferanten mehr derivatsbezogen einkaufen, damit gehen die Lieferanten weiter weg, es entstehen also längere Wege und erhöht die Komplexität.</p> <p>B3: Wir haben viele Best Cost Countries, dann haben wir das Thema mit der Komplexität, dass wir praktisch mehrere Werke mit einem Lieferanten bedienen, da würde auch das Thema Behälter raufkommen, also wo stehen die Behälter, ist alles sauber ausgeplant...</p> <p>B4: Komplexitätssteigerung stark bemerkbar: 3 Produktlinien auf einer Montagelinie, Lieferantentfernung nimmt zu, europaweit und weltweit verteilt. (2) Das ist eine weitere Schnittstelle und da ist eine Komplexitätssteigerung, dass man einen Teil der Logistik fremdvergift an einen Logistikdienstleister.</p> | Interview Werk B | 35 + 36; 44-46 | <p>Produktkomplexität ist Haupttreiber für die Logistik. Mehrere Produktlinien auf einer Montagelinie. Lieferanten gehen weiter weg, lange Wege erhöhen die Komplexität. Viel Low cost country sourcing, Lieferantentfernung nimmt zu. Teilweise auch ein Lieferant beliefert mehrere Werke, wenn da Lieferprobleme auftauchen, betrifft das direkt mehrere Werke. Lieferantperformance dann schlecht, weil erst befähigt werden müssen. Konkurrenz bindet Lieferanten nah ans Werk.</p> <p>Mehrere JIS-Ströme werden realisiert. Hohe Anforderungen an den Behälter. IT Systemlandschaft ist unübersichtlich, nicht transparent genug. Dokumentenmanagement ist erforderlich.</p> |
| | <p>B5: Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Logistikkomplexität im Unternehmen gestiegen ist. Mehr Derivate, mehr Varianten in sich und die schneller Abfolge der Anläufe seien in den vergangenen Jahren hinzugekommen. Früher waren es nur zwei Anläufe pro Jahr, jetzt sind es mehr.</p> | Interview Werk C | 14 - 21 | Die Logistikkomplexität im Unternehmen ist gestiegen. Schnelle Abfolge Anläufe (Produktkomplexität) |
| | <p>B6: Logistikkomplexität ist auf jeden Fall enorm gestiegen in den letzten Jahren. Meiner Meinung nach auch durch das Ziel aus dem Einkauf viel einzusparen, was natürlich die Logistikprozesse in den Werken, oder vor allem auch im Unternehmen extrem aufgebläht hat. ... Also Komplexität immer mehr steigend und da müssen wir jetzt schauen, wie wir das jetzt handhaben können und vielleicht reduziert kriegen. (22 - 28)</p> | Interview Werk D | 22 - 28 | Logistikkomplexität ist stark gestiegen, Einkauf spart bei Lieferantenauswahl. |
| | | | | |

Abb. 6.2: Ausschnitt aus der qualitativen Inhaltsanalyse in Microsoft Excel

Die Ergebnisse der qualitativen Studie, insbesondere die identifizierten Komplexitätstreiber werden im Folgenden detailliert beschrieben. Sie dienen dann als Basis für die kausalanalytische Untersuchung zur Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen Komplexitätstreibern und Logistikkennzahlen.

6.3 Zwischenergebnis der Komplexitätstreiberbetrachtung

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und den Experteninterviews, können nun die Treiber unter Verwendung der Kategorisierung in Produkt-, Struktur/Prozess- und Netzwerkkomplexität bestimmt werden. Da die theoretische Basis bzgl. Komplexität oft abstrakt, heterogen und vage ist ([DGE⁺12], S. 1016), wurde daher in Kapitel 3 versucht, ein einheitliches systemtheoretisches Verständnis zu schaffen. Darauf aufbauend sollen nun auch aus der Perspektive der Systemtheorie die Treiber für Logistikkomplexität hinsichtlich der genannten Merkmale Varietät, Konnektivität, Dynamik, Unschärfe und Wechselwirkungen mit dem Umfeld analysiert werden.⁹ Eine genaue Beschreibung der jeweiligen Einflussgrößen in den Komplexitätskategorien Produkt, Struktur/Prozess und Netzwerk und deren systemtheoretische Einordnung folgt im Anschluss.

⁹ Für eine genaue Definition des Komplexitätsbegriffs anhand der Systemtheorie siehe Abschnitt 3.1.

6.3.1 Produkt

Komplexitätstreiber aus der Kategorie *Produkt* stehen in direktem Zusammenhang mit den spezifischen Produkt- bzw. Fahrzeugeigenschaften und ihren gegenseitigen Abhängigkeiten. Eine Definition des Begriffs Produktkomplexität, welche den weiteren Analysen zugrunde liegt, wurde bereits in Abschnitt 3.8 vorgenommen. Anhand der fünf systemtheoretischen Kriterien können die produktbezogenen Komplexitätstreiber folgendermaßen eingruppiert werden:

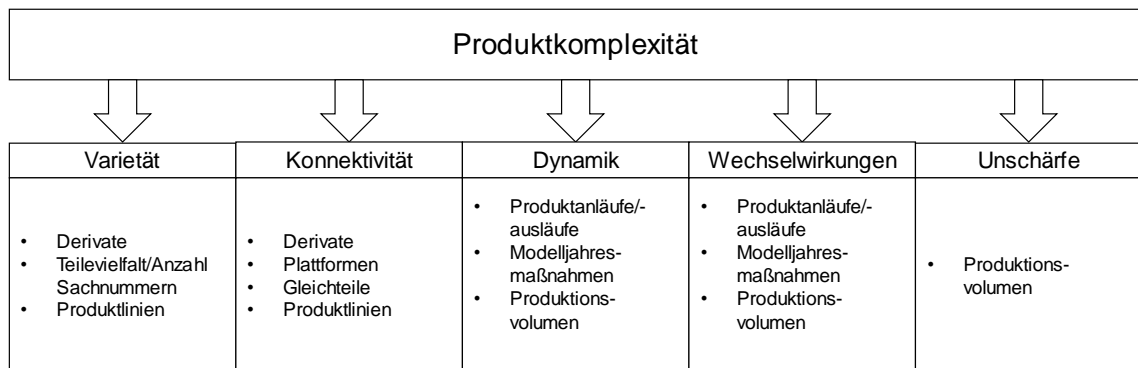


Abb. 6.3: Systemtheoretische Einordnung der Produktkomplexität (in Anlehnung an [GL10a], S. 162)

In der Systemtheorie finden sich Gleichteilstrategien oder Plattformkonzepte in der Konnektivität wieder, denn durch Bündelungsstrategien werden gegenseitige Abhängigkeiten in der Produktstruktur aktiv beeinflusst, um Synergieeffekte zu schaffen. Als Beispiel für die Beschreibungsdimension Varietät, also die Anzahl und Verschiedenartigkeit der Systemelemente, kann der Treiber Anzahl Derivate genannt werden. Die Vielzahl der Fahrzeugmodelle können aus Sicht der Systemtheorie als Elemente im System „Montagewerk“ aufgefasst werden. Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeiten von Produktmerkmalen zwischen den Derivaten wird der Treiber zusätzlich der Konnektivität zugeordnet.

Anzahl Derivate

Der in der Literatur am häufigsten genannte Treiber ist die Variantenanzahl, also die Anzahl verschiedener Fertigprodukte. Überträgt man diesen Begriff auf die Automobilindustrie, so ergibt sich für den Anwendungsfall dieser Arbeit der Treiber *Anzahl Derivate*. Dieser wurde auch von allen Experten eindeutig als komplexitätstreibend bestätigt. Die Einflüsse wurden folgendermaßen erläutert: Eine Erhöhung der Anzahl an Derivaten in einem Werk hat zur Folge, dass die Anzahl verschiedenartiger Teile im Werk ebenfalls steigen. Die daraus resultierende Mehrung benötigter Sachnummern im Werk führt wiederum zu einer höheren Verbaudichte am Montageband. Falls dadurch der verfügbare Platz auf den Bereitstellflächen am Band schließlich nicht mehr ausreichend ist, müssen Bauteile in Sequenzen angeliefert werden. Diese Sequenzen werden vorgelagert beispielsweise in Supermärkten erstellt. Wenn auch diese Flächen ab einer bestimmten Anzahl an Derivaten nicht mehr ausreichen, muss der Prozess der Sequenzierung von Bauteilen außerhalb des Werkes in sogenannten Versorgungszentren stattfinden.

Anzahl Sachnummern/Teilevielfalt

Der Treiber Anzahl Derivate hängt stark mit der Teilevielfalt zusammen, im Logistikumfeld wird auch oft von der Anzahl an Sachnummern in einem Werk gesprochen. Mit einer Nennhäufigkeit von 12 ist dieser Treiber in der Literatur häufig vertreten und wird ebenfalls von allen Experten als starker Beeinflusser der Produktkomplexität betrachtet. Es macht für die Logistik jedoch keinen Unterschied, ob es sich bei der Sachnummer um eine Sonderausstattung, eine Ländervariante oder ein Bauteil der Grundausstattung handelt, da die Prozesse und Aufgaben in allen Fällen gleich sind. Die Folgen einer Erhöhung dieses Treibers sind ähnlich denen einer Zunahme der Anzahl an Derivaten in einem Werk. Die Anzahl Sachnummern sowie die Anzahl Sequenzierungen steigen nach Aussagen der Experten.

Bündelungsstrategien

In der Literatur werden Strategien zur Reduzierung der produktinduzierten Komplexität unter Bündelungsstrategien zusammengefasst. Diese umfassen Gleichteile, Baukästen, Plattformen sowie Modularisierung. Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass häufig die untergeordneten Begriffe der Bündelungsstrategien als Komplexitätstreiber bzw. -minderer genannt werden, wie etwa die Anzahl an Plattformen oder die Heterogenität der Bauteile. Daher kann für Bündelungsstrategien keine eindeutige Nennhäufigkeit ermittelt werden, ihre einzelnen Komponenten finden sich aber bei einer Vielzahl an Autoren wieder.

In Bezug auf Gleichteilestrategien sind sich die Experten einig. Die Komplexität in der Logistik sinkt, wenn die Anzahl an Gleichteilen zwischen den Derivaten innerhalb eines Werkes steigt. Diesem Treiber wird daher ein negatives Verhältnis zur Produktkomplexität zugeschrieben. Die folgenden Zusammenhänge wurden aufgezeigt: Je mehr Gleichteile in einem Werk vorhanden sind, desto weniger Stellplätze werden in den Lägern benötigt und desto besser können die Stellflächen ausgenutzt werden. Ebenso verringert sich der Planungsaufwand, da sich das logistische Mengengerüst über die Derivate vereinfacht. Eine große Menge an Gleichteilen zwischen Derivaten aus unterschiedlichen Produktlinien verringert nach Aussagen der Experten Komplexität im Anlauf neuer Produktlinien. Eine Gleichteilestrategie kann den Austausch von Derivaten zwischen den Werken erleichtern und zusätzlich die Flexibilität der Werke fördern.

Auch Plattformstrategien werden als komplexitätssenkend empfunden. Jedoch wurde erwähnt, dass hierdurch auch zusätzliche Komplexität entstehen kann. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn eine Komponente ausgetauscht werden muss. Dies betrifft dann alle Derivate und Varianten innerhalb der Plattform und nicht nur das eine Modell. Ein Experte machte auch darauf aufmerksam, dass entsprechende IT-Systeme der Materialbereitstellung bei einer Gleichteilestrategie angepasst werden müssen. Gleichteile, die in unterschiedlichen Produktionsbereichen eingesetzt werden, müssen auch von den IT-Systemen abgebildet werden können. Bündelungsstrategien werden beim befragten Unternehmen durch hohe Kommunalitätsgrade innerhalb der verschiedenen Produktlinien praktisch umgesetzt. Sie wurden insgesamt als Hauptbeeinflusser der Komplexität in der Logistik bezeichnet, ihre Wirkung wurde jedoch als komplexitätsreduzierend aufgefasst.

Anzahl Produktionsanläufe und -ausläufe pro Jahr

Anläufe neuer Derivate werden von den Experten einstimmig als Treiber für Komplexität in der Logistik erachtet. Ein Anlauf beeinflusst Prozesse in der gesamten Produktionshalle. Dies kann die Flächenauslastung betreffen ebenso wie eine Anpassung von In-House-Gestellen, Routenplänen und den Einsatz von Mitarbeitern, falls beispielsweise Kapazitäten in der Materialbereitstellung überschritten werden.

Die Parallelphasen, in denen neue Derivate zeitgleich mit auslaufenden Derivaten über eine Produktionslinie laufen, werden als besonders herausfordernd empfunden. Wenn der Flächenbedarf durch neue Anläufe steigt, aber die vorhandenen Kapazitäten keine weiteren Flächen zulassen, muss die Anzahl sequenzierter Teile erhöht werden. Nur so kann eine bedarfsgerechte Bereitstellung am Band weiter gewährleistet werden. Aufgrund der großen Planungskomplexität in diesen Phasen ist es außerdem schwierig, stets optimale Prozesse darzustellen. Die Komplexitätserhöhung durch neue Modellanläufe wird von einem Experten jedoch als weniger schlimm bewertet als die durch Modelljahresmaßnahmen. In zweitem Fall können je nach Plattform- und Gleichteilekonzept mehrere Derivate gleichzeitig von der Änderung betroffen sein.

Auch der Auslauf von Modellen wird als komplexitätstreibend empfunden, da Bauteile obsolet werden und über geregelte Prozesse aus den Lägern und Bereitstellflächen entnommen und Strukturen und Prozesse dementsprechend angepasst werden müssen. Produktionsanläufe und -ausläufe erfordern immer einen zusätzlichen Planungs- und Steuerungsaufwand, welcher komplexitätserhöhend wirkt.

Produktionsvolumen

Die langfristige Planung des Produktionsvolumens beinhaltet auch eine Planung der Logistikkapazitäten in Form von Personal, Flächen und Strukturen. Je mehr Fahrzeuge pro Tag gebaut werden müssen, umso mehr Flächen und Personal werden benötigt. Auch müssen die Logistikstrukturen und -prozesse für ein größeres Versorgungsvolumen ausgelegt werden. Problematisch sind in diesem Zusammenhang auch Schwankungen im Produktionsprogramm. Denn die Anpassungen in Bereitstellungsprozessen und Flächenkapazitäten sind dann nur temporär, um Überkapazitäten zu vermeiden.

Modelljahresmaßnahmen (Life-Cycle-Impulse-(LCI-)Maßnahmen)

Bei den Modelljahresmaßnahmen wird besonders der Übergangsprozess, in dem alte Sachnummern (SNR) auslaufen und die neuen SNR eingeführt werden, als komplexitätssteigernd empfunden. Hinzukommende Produktumfänge werden hier nicht als Hauptproblem genannt, umständlicher ist das Auswechseln von Teilen. Außerdem ist neben dem systemseitigen Änderungsaufwand vor allem der physische Aufwand, den Änderungen von Materialnummern nach sich ziehen, von großer Relevanz. Als Beispiele für diese physischen Aufgaben wurden das Umbauen von Bereitstellregalen genannt sowie die Änderungen von Beschilderungen und Regelkreisen. Zusammenfassend entsteht die Komplexität durch die Änderung von mehreren hundert SNR pro Modelljahresmaßnahme. Alle Experten bestätigten, dass Modelljahresmaßnahmen Treiber der Produktkomplexität sind.

6.3.2 Prozess/Struktur

Die Prozess- oder auch Strukturkomplexität bezieht sich auf die organisatorische und interne Vernetzung des Unternehmens, das heißt sie wird durch interne Prozesse, aber für die Logistik vor allem auch durch physische Strukturen bestimmt. Dazu zählt die Gebäudestruktur des Montagewerkes ebenso wie die Taktzeit in der Montage. Je komplexer die Werksstruktur ist, desto höher ist der logistische Aufwand. Mögliche Auswirkungen einer komplexeren Struktur sind beispielsweise höhere Kosten oder eine geringere Versorgungssicherheit durch häufigere Störfälle [BWF⁺09].

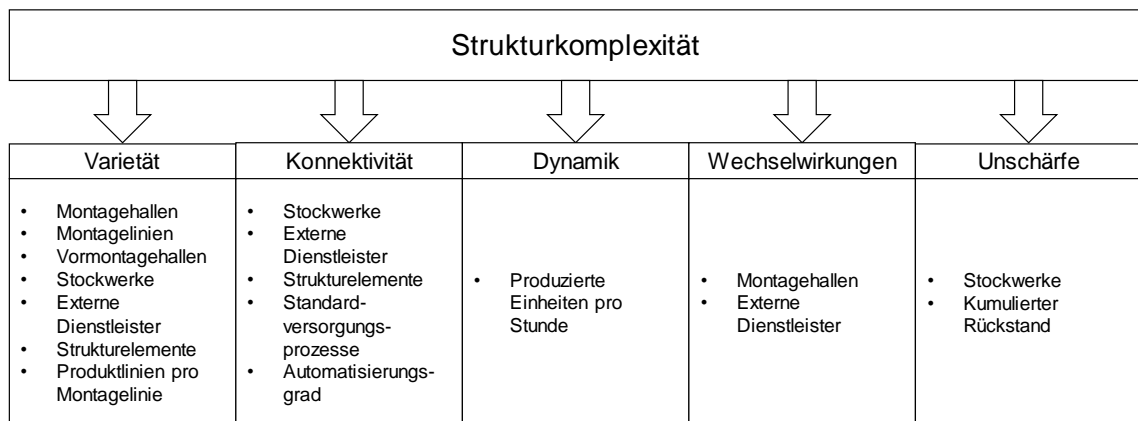


Abb. 6.4: Systemtheoretische Einordnung der strukturellen Komplexitätstreiber (in Anlehnung an [GL10a], S. 162)

Abb. 6.4 beschreibt die Einteilung der Strukturtreiber in die fünf Komplexitätsdimensionen. Die Varietät des Systems Montagewerk wird u. a. durch die Anzahl an Montage- und Vormontagehallen oder Montagelinien spezifiziert. Wechselwirkungen mit dem Umfeld entstehen durch externe Dienstleister, an die logistische Tätigkeiten ausgelagert werden. Strukturkomplexität besitzt wenig dynamische Aspekte, lediglich die Anzahl produzierter Einheiten pro Stunde weist eine Veränderung im Zeitverlauf auf. Die anderen Treiber werden nur innerhalb sehr großer Zeitspannen geändert. Unschärfe im System kann durch eine hohe Stockwerksanzahl entstehen, da sich das Montage- bzw. Logistiksystem über mehrere Ebenen erstreckt und nicht mehr mit bloßem Auge erfasst werden kann. Folgende strukturellen und prozessualen Treiber konnten anhand Literaturrecherche und Experteninterviews identifiziert werden:

Anzahl Montagehallen

Die strukturelle Logistikkomplexität wird durch die Anzahl der Montagehallen wesentlich beeinflusst. Hat ein Montagewerk mehrere Produktionshallen, müssen Teile an unterschiedlichsten Orten bereitgestellt werden. Bei gemeinsamer Nutzung von logistischen Strukturelementen, wie beispielsweise Lägern, erfordert außerdem die Entnahme und Bereitstellung an verschiedenen Verbauporten von Produktionsmaterial einen höheren Koordinationsaufwand. Je mehr Montagehallen von den gleichen logistischen Elementen versorgt werden müssen, desto höher wird die Komplexität im Materialfluss eingestuft.

Anzahl Montagelinien

Auch die Anzahl der Montagelinien in einem Werk bestimmt die Strukturkomplexität. Analog zur durch Montagehallen generierten Komplexität wird auch die Bereitstellung von Teilen am Montageband komplexer, je mehr Montagelinien versorgt werden müssen. Da Teile nicht mehr nur an einen Ort, sondern möglicherweise an verschiedene Linien transportiert werden müssen, sind unterschiedliche Prozesse und Abläufe notwendig. Werden für eine zweite Montagelinie beispielsweise andere Teilefamilien als auf der ersten Linie benötigt (da eine andere Produktlinie produziert wird), so führt eine Erhöhung der Anzahl der Teilefamilien ebenfalls zu einer Komplexitätserhöhung. In einer Teilefamilie werden dabei „häufig kombinierte Artikel, die auf benachbarten Lagerplätzen abgelegt werden“ [HH11] zusammengefasst. Material aus einer Teilefamilie wird daher meist gemeinsam kommissioniert. Zur Teilefamilie Außenspiegel werden beispielsweise Teile wie Spiegelfuß, Blinker oder Glasbaugruppe zugeordnet.

Anzahl Vormontagehallen

Auch die Anzahl der Vormontagehallen kann einen Einfluss auf die Komplexität eines Werkes haben, wenn vormontierte Teile von der Vormontagehalle in die Hauptmontagehalle befördert werden müssen. Im Freien existieren oftmals strengere Anforderungen an Flurförderzeuge, die beachtet werden müssen. Durch den Transport zwischen den beiden Hallen wird außerdem die Anzahl an Handlungsschritten höher, da ein Wechsel zwischen den Flurförderzeugen durchgeführt werden muss. Ein weiterer Faktor für die Erhöhung der Komplexität stellt das Zurücklegen größerer Entfernungen beim Materialtransport dar.

Anzahl Stockwerke

Ein Montagewerk besteht oft aus mehreren Ebenen, auf denen entweder die Montage selbst oder aber die Lagerung und das Handling von Produktionsteilen stattfinden. Besonders, wenn die Montage über verschiedene Etagen hinweg erfolgt, Material dementsprechend auf mehreren Stockwerken bereitgestellt werden muss, steigt der logistische Aufwand. Der Stockwerkwechsel muss durch Fördertechniken wie Heber oder Aufzüge realisiert werden. Hierfür müssen Prozesse implementiert werden, welche eine höhere Anzahl an Handlungsschritten nach sich ziehen. Des Weiteren können beim Transport mit Aufzügen oder Hebern Störungen auftreten, wofür Notfallstrategien vorzuhalten sind. Grundsätzlich sind Montagestrukturen über mehrere Stockwerke eher bei Brownfield Werken vorzufinden, da man dort keine Möglichkeit hat, das Werksgelände zu erweitern, sondern vertikal ausbauen muss.

Anzahl externer Dienstleister

Zur Optimierung von Logistiksystemen können verschiedene Logistikfunktionen an Logistikedienstleister vergeben werden. Diese übernehmen dann logistische Leistungen wie den Transport oder die Lagerung bis hin zur Kommissionierung ([HH11], S. 185). Der Einsatz von Logistikedienstleistern bringt einige Vorteile mit sich, wie die Reduzierung von Logistikkosten oder der effizienteren Einsatz von Personal und Flächen aufgrund eines spezialisierten Branchen-Know

-hows der Dienstleister. Somit kann sich das Unternehmen auf das eigene Kerngeschäft konzentrieren. Dennoch werden externe Dienstleister in den Expertengesprächen als komplexitätstreibend eingestuft. Als Grund dafür wird der hohe Koordinationsbedarf zwischen beauftragendem Unternehmen und Dienstleister genannt. Dieser entsteht etwa durch die Zunahme von Schnittstellen und Verantwortungsbereichen, welche oft unzureichend definiert sind.

Anzahl logistischer Strukturelemente

Die logistischen Strukturelemente eines Werkes umfassen den Wareneingang sowie alle Läger. Zu diesen zählen Blocklager (BL), automatisches Kleinteilelager (AKL), Hochregallager (HRL), Regallager (RL), Großmarkt (GROMA), Supermarkt (SUMA) und Direktanlieferungsflächen (DAL). Diese stellen die wesentlichen logistischen Systemelemente dar, wobei eine hohe Anzahl dieser Elemente mehr Koordinationsaufwand in der Produktion bedeutet [GL10a]. Je mehr logistische Strukturelemente zu koordinieren sind, desto komplexer werden die Logistikanforderungen, da Ein- und Auslagerungen an unterschiedlichsten Orten möglich sind. Je mehr unterschiedliche Strukturelemente vorhanden sind, desto mehr Versorgungsprozesse müssen auch implementiert werden.

Technologische Produktvielfalt pro Montagelinie

Ein weiterer Komplexitätstreiber, welcher im Rahmen der Experteninterviews identifiziert wurde, ist die Anzahl der Produktlinien welche gemeinsam auf einer Montagelinie produziert werden. Der Aufwand steigt umso mehr, je höher die Anzahl der Produktlinien pro Montagelinie ist. Besonders wenn in den Produktlinien unterschiedliche Teilefamilien verbaut werden, steigen die logistischen Anforderungen der richtigen Bereitstellung. Eine Komplexitätserhöhung kann außerdem durch die Umstellung der Mitarbeiter erfolgen, wenn verschiedene Produktlinien verschiedene Montagearbeiten erfordern. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang häufig die technologische Produktvielfalt bzw. Teilevielfalt, die auf einem Montageband dargestellt werden muss, genannt. Insgesamt werden durch die verschiedenen Abhängigkeiten und Prozesse die Anforderungen an die Logistik maßgeblich erhöht (vgl. [Gar12], S. 109).

Anzahl Standardversorgungsprozesse

Die Vielfalt von Prozessen, mögliche Schnittstellen sowie deren Vernetzungs- und Standardisierungsgrad haben ebenfalls Einfluss auf die Strukturkomplexität. Aus einer starken Vernetzung folgt ein hoher Grad an Komplexität, wohingegen Standardisierung zu einer Komplexitätsreduktion führen kann [Bli00]; [KS03]; [GL10a]; [Sch14]. Daher wird in der Automobilindustrie das Ziel angestrebt, möglichst viele Prozesse zu standardisieren, so auch die Bereitstellprozesse in der Logistik. Durch die Definition von Standardversorgungsprozessen der Materialbereitstellung vom Wareneingang bis ans Montageband wird eine Vereinheitlichung in der Versorgungslogistik erzielt. Diese Prozesse beschreiben die einzelnen Handlungsschritte inklusive der notwendigen Transporte zwischen logistischen Strukturelementen. Prozessvielfalt wird hier durch verschiedene Quellen der Varianten erzeugt, die nicht nur zu Prozesskosten, sondern auch zu erhöhten Koordinationskosten und Qualitätsproblemen führen können ([Wil08c], S. 28).

Produzierte Einheiten pro Stunde

Die Kapazität einer Montage wird üblicherweise in Einheiten pro Stunde bzw. dem Kehrwert, der Taktzeit gemessen. Je geringer die Taktzeit ist, desto anspruchsvoller wird die rechtzeitige Materialbereitstellung und damit die Produktion [BWF⁺09]; [Ren07]; [RK]. Dies ist darin begründet, dass die Bearbeitungszeit an den einzelnen Arbeitsstationen kürzer ist und dadurch auch der Platz für die Materialanstellung am Verbauort verringert ist. Insbesondere muss die Materialbereitstellung bei Teilen, welche aufgrund von Platzmangel an der Bereitstellfläche des Montagebands in sehr kurzen Zeitabständen nachgeliefert werden müssen, besonders gut koordiniert werden.

Kumulierter Rückstand

Der kumulierte Rückstand bezeichnet die Anzahl an Fahrzeugen, die vom Produktionsband ausgeschleust werden können, falls Fehler auftreten oder Teile fehlen. Folglich ergibt sich eine Abweichung zwischen der geplanten und der tatsächlichen Montagereihenfolge. Bereits sequenzierte Teile, die nicht mehr in der ursprünglich geplanten Sequenz verbaut werden können, müssen dann in separaten Behältnissen gelagert werden, bis das jeweilige Fahrzeug wieder eingesteuert wird. Dafür müssen Pufferplätze bereitgestellt sowie Prozesse ausgelegt werden, wodurch eine Komplexitätserhöhung im Montageprozess generiert wird.

Automatisierungsgrad

Automatisierung wird als eine Ersetzung von manuellen, also menschlichen Tätigkeiten durch maschinelle Aktivitäten definiert [Fro08], wobei zwischen dem Automatisierungsgrad der Montage und der Materialbereitstellung unterschieden werden kann. Grundsätzlich wird durch eine Steigerung des Automatisierungsgrads eine effizientere Produktionsstruktur geschaffen, die jedoch auch eine Zunahme der Steuerungskomplexität bedingt und kurzfristige Anpassungen im Produktprogramm aufgrund der starren Prozessketten erschwert ([WV11], S. 87).

Der Automatisierungsgrad der Materialbereitstellung beschreibt das Verhältnis der Bereitstellungsprozesse, die automatisiert ausgeführt werden, zu der Gesamtanzahl aller Bereitstellungsprozesse ([Gar12], S. 116). Realisiert wird die automatisierte Bereitstellung z. B. durch eine Elektrohängebahn oder schienengebundene Fördermittel. Dabei stellen die Fördertechniken immer einen Fixpunkt im Produktionssystem dar, auf welchen Prozesse und Planung ausgerichtet werden müssen und durch den eine flexible Anpassung an geänderte Rahmenbedingungen erschwert wird. Für den potenziellen Ausfall dieser Fördertechnik müssen außerdem Notfallstrategien und -prozesse aufgestellt werden, um die Versorgung weiterhin abzusichern.

6.3.3 Netzwerk

Um die Komplexitätstreiberbetrachtung zu vervollständigen, werden nun Einflussgrößen der Netzwerkkomplexität beschrieben. Im Fokus liegen hierbei die Eigenschaften des Lieferantennetzwerkes. Bevor auf die einzelnen Treiber detailliert eingegangen wird, liefert folgende Abbildung eine systemtheoretische Verortung der netzwerkbezogenen Komplexitätstreiber.

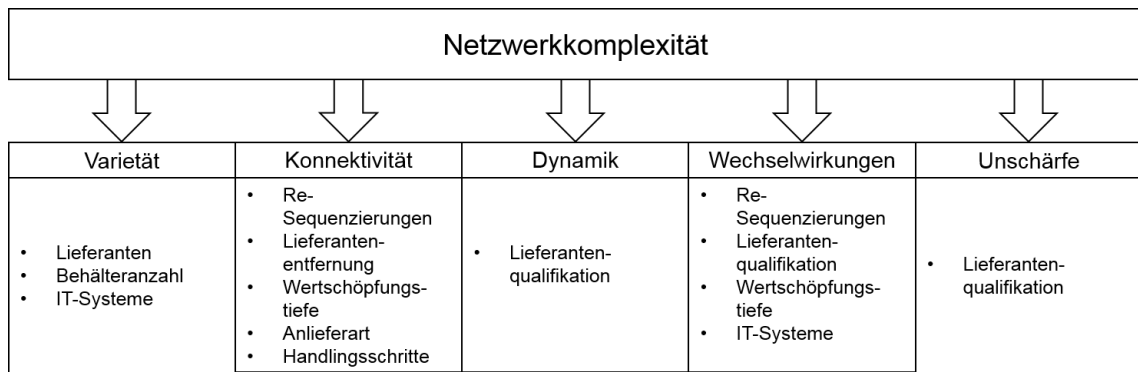


Abb. 6.5: Systemtheoretische Einordnung der Netzwerkkomplexität (in Anlehnung an [GL10a], S. 162)

Anzahl Lieferanten

Der in der Literatur am häufigsten erwähnte Treiber für die vom Beschaffungsmarkt induzierte Komplexität ist die Lieferantenzahl [Blu06]; [Gie10]; [Mil01]. Der Wirkungsbereich dieses Treibers kann wie folgt beschrieben werden: Je mehr Lieferanten an der Versorgung der Werke beteiligt sind, desto größer ist der Aufwand für das Lieferantenmanagement und für die Koordination der Zulieferer ([WV11], S. 81). Insbesondere gestaltet sich das Lieferanten-Monitoring bei zunehmender Lieferantenzahl schwierig ([GL10a], S. 161). Darüber hinaus müssen mehr ein- und ausgehende Transporte koordiniert werden. Als Folge daraus entsteht Unsicherheit mit Bezug auf die Lieferzeit bzw. -qualität und ein erhöhter Planungsaufwand für die bedarfsgerechte Versorgung des Montagebands. Um diese bei der erhöhten Anzahl der Zulieferer aufrechtzuerhalten, steigen die Bestände in den Lagern ([Mil01], S. 112). Gleichzeitig wird eine erhöhte Anzahl an Lieferanten vom Unternehmen angestrebt, um für kritische Teile das Risiko eines Versorgungsengpasses durch Streuung zu reduzieren. Es wird angenommen, dass ein positiver Zusammenhang zwischen der Anzahl an Lieferanten und der Komplexität eines Werks besteht.

Re-Sequenzierungen

Der Treiber Sequenzierungsaufwand und Re-Sequenzierungen wird vor allem in den Experteninterviews als Haupttreiber für die Logistikkomplexität genannt. Dieser Treiber beinhaltet die erhöhte Anzahl an Sequenzströmen und beschreibt den erhöhten Planungsaufwand zur Realisierung dieser Direktanlieferungen. Der Treiber lässt sich durch die steigende Anzahl Lieferanten für eine Just-In-Sequence-(JIS-)Teilefamilie beschreiben. Teilefamilien, wie beispielsweise der Fahrzeughimmel, werden als JIS-Teile von einem Lieferanten angeliefert. Werden Teilefamilien, wie beispielsweise Sitze und Mittelkonsolen, als JIS-Ströme von mehreren Lieferanten angeliefert, werden diese in Versorgungszentren re-sequenziert. Dort werden mehrere JIS-Ströme konsolidiert und es erfolgt ein richtig sequenzierter Güterstrom an die Montagelinie. Eine Re-Sequenzierung ist also eine erneute Reihenfolgebildung aufgrund unterschiedlicher Lieferanten von Teilefamilien bzw. Anlieferströmen, die bereits angeliefert worden sind. Derart genau synchronisierte Prozesse führen zu einer Zunahme der Komplexität von Planung und Abwicklung, denn die LKW-Ladungen müssen termingenaue am Wareneingang eintreffen, dort abgeladen und die entsprechenden Teile an den Verbauort gebracht werden bzw. in einem Versorgungszentrum re-se-

quenziert werden ([GH07], S. 13). Für die Logistik bedeutet dies einen zusätzlichen Kostenaufwand und einen Komplexitätsanstieg bei der Handhabung der Anlieferströme und Re-Sequenzierungen.

Lieferantenperformance

Der Treiber Lieferantenperformance beschreibt die Leistungsmessung eines Zulieferers durch das belieferte Unternehmen. Die Bewertung erfolgt über den Lieferservice, der üblicherweise durch die vier Kriterien Lieferzeit, -zuverlässigkeit, -qualität und -flexibilität definiert ist [Pfo10]. Dieser externe Einfluss des Beschaffungsmarkts wird in der Literatur häufig thematisiert [Mil01]; [BKM05]; [May07]. Weiterhin wird dieser Treiber in den Experteninterviews als einer der komplexitätstreibenden Faktoren bestätigt. Von den Lieferanten wird eine termingerechte Abwicklung der richtigen Teile in ggf. der festgelegten Reihenfolge gefordert. Diese Prozesse sind aufgrund der Lieferfähigkeit der Zulieferer und der heutigen Infrastruktur äußerst labil ([GH07], S. 13). Ein Zusammenhang mit der Komplexität in der Logistik lässt sich folgendermaßen beschreiben: Ist die Versorgungsleistung des OEM durch eine verspätete oder falsche Lieferung oder gar durch eine Versorgungsunterbrechung durch den Lieferanten gefährdet, führt dies zu hohen Kosten für das Unternehmen oder zu einem Produktionsstillstand. Ziel des Lieferantenmanagements ist es, dem Unternehmen eine hinreichend große Anzahl leistungsfähiger Versorgungsquellen von stabiler Existenz und Lieferbereitschaft zu erschließen [Wan14]. Gleichzeitig führt die Unsicherheit bezüglich der Lieferzeit und -qualität zu einem Komplexitätsanstieg, da Sicherheitsbestände vorzuhalten sind oder auf Ersatzlieferanten zurückgegriffen werden muss. Dadurch entstehen in der Logistik zusätzliche, teils aufwendige Abläufe, die einen Zusammenhang zwischen Lieferantenperformance und Komplexität vermuten lassen.

Lieferantentfernung

Der Treiber Lieferantentfernung bezeichnet die Entfernung des Zulieferers zum OEM und beinhaltet dabei auch den Vernetzungsgrad bzw. die Ausdehnung des Wertschöpfungsnetzwerks. Dieser komplexitätstreibende Faktor wird vorrangig in der Wissenschaft genannt [May07]; [WK01]; [Klu10]; [Lam12]; [Blu06]. Die geografische Verteilung und die damit einhergehende Unsicherheit durch Nichteinhalten der Lieferzeit und -treue haben zur Folge, dass Produktionsengpässe drohen und Sicherheitsbestände sowie außerplanmäßige Prozessschritte erforderlich werden können. Um die Versorgungsleistung aufrecht und konstant zu halten, müssen die Beschaffungsformen angepasst und ggf. Sonderfahrten eingelegt werden, die mit hohen Kosten und einem erheblichen Steuerungsaufwand verbunden sind. In diesem Zusammenhang ist der Trend zum Global Sourcing und eine damit verbundene Auswahl von Lieferanten aus Niedriglohnländern zu sehen. Dies lässt sich daran erkennen, dass die Zahl der ausländischen Lieferanten sowie die durchschnittliche Entfernung zwischen Liefer- und Abnehmerwerk laufend zunehmen ([Klu10], S. 234). Erweiterte Produktionsverbände mit weltweit produzierenden Lieferanten erfordern neue, zusätzliche Varianten logistischer Prozesse und erhöhen die Komplexität der Planung ([Sch08], S. 1).

Wertschöpfungstiefe

Unter dem Begriff der Wertschöpfungstiefe wird das Verhältnis der eigenen Produktionsleistung zu der insgesamt erforderlichen Wertschöpfung für ein Fahrzeug verstanden ([Sch08], S. 44). Als Faktor in der Beschaffungslogistik lässt sich aus der Literatur an erster Stelle die sinkende Fertigungstiefe in produzierenden Unternehmen nennen [WK01]; [Mey07]; [Rau99]; [Gie10]; [Lam12]. Auch die Analyse der Expertengespräche ergibt, dass eine hohe Fertigungstiefe einen Komplexitätsanstieg zur Folge hätte. Aufgrund der steigenden Komplexität der Produkte und der rasant zunehmenden Entwicklung vergeben die OEM vermehrt Fertigungs- und Entwicklungsleistungen an Zulieferer, die auf einzelne Produkt- und Technologiebereiche spezialisiert sind und über einen Know-how-Vorsprung verfügen. Durchschnittlich leisten Autohersteller nur noch ca. 28 Prozent der Wertschöpfung selbst [Wan14]. Diese Fremdvergabe bildet die Grundlage für eine Erweiterung der Produktpalette, ohne die internen Ressourcen proportional auszubauen ([Klu10], S. 44). Bei den Fertigungs- und Entwicklungsprozessen wächst die Anzahl externer Partner und die Anforderungen an das Fremdleistungsmanagement rücken in den Vordergrund. Die unternehmensexterne Logistik gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die unternehmensinterne Logistik erfährt durch die Fertigungstiefenreduzierung die Vorteile von Flächen- und Bestandsverringerung, da Modul- und Systemhersteller komplette Bauteile oft direkt anliefern. Systemlieferanten unterscheiden sich gegenüber Modullieferanten dadurch, dass sie eine hohe eigene Entwicklungsleistung an den gelieferten Komponenten besitzen. Ein Modullieferant liefert vor allem vormontierte Komponenten, die zum Großteil vom OEM entwickelt werden. Die sinkende Wertschöpfungstiefe kann einerseits zur Reduzierung der internen Netzkomplexität führen, z. B. durch Flächenreduzierung sie kann jedoch gleichzeitig zur Erhöhung führen, wenn der Lieferant nicht den Erwartungen entspricht, hoher Koordinations- und Integrationsaufwand entsteht und Nachbesserungen durchgeführt werden müssen.

Anlieferart

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben ist eines der Hauptziele der Logistik, die Lieferzeiten zu reduzieren und die Bestände gering zu halten. Um diese Ziele zu realisieren, ist eine geeignete Beschaffungsstrategie und Anlieferart für die einzelnen Komponenten zu wählen. Der Treiber Anlieferart bezeichnet die adäquate Versorgungsart für die Produktion durch Lagerhaltung oder durch Direktanlieferung (DAL). Im Direktversorgungskonzept liefert der Lieferant die Ware direkt an das Montagewerk, ohne dass die Ware in einem Versorgungszentrum zwischengelagert, bearbeitet und von dort aus wieder versendet wird. Sowohl die Experten als auch die Theorie betrachten die Wahl der geeigneten Anlieferart als ein Potenzial zur Beherrschung logistischer Komplexität ([Gie10], S. 65; [May07], S. 96 ff.).

Der logische Zusammenhang des Treibers mit der Logistikkomplexität erklärt sich wie folgt: Die Versorgung in der Automobilindustrie wird vermehrt auf das Prinzip der Direktanlieferungen verlegt, da hierdurch die zusätzliche Handlingsstufe über das Lager vermieden wird. Jedoch zieht dies einen deutlich höheren Planungs- und Steuerungsaufwand nach sich. Es ist zu vermuten, dass die Direktversorgung allgemein zu einer höheren Komplexität eines Werks führt. Die Analyse der Beschaffungsstrategie macht deutlich, dass zwischen den Funktionen Logistik und Einkauf nachhaltige Interessenkonflikte bestehen ([Ren], S. 56). Während der Einkauf auf eine kosten-

sparende Strategie durch Global Sourcing aus Niedriglohnländern abzielt, ist die Logistik an lokalem Sourcing interessiert, um die Transportwege und die Risiken eines Versorgungsengpasses minimal zu halten. Dieser Interessenkonflikt wird auch in den Expertengesprächen als Problem angeführt und als Grund genannt, weshalb die Lagerbestände wachsen.

Behälteranzahl

Unter dem Treiber Behälter sind Logistikhilfsmittel wie Gestelle, Paletten, Gitterboxen, Kunststoffkisten zusammengefasst, mit deren Hilfe Güter und Komponenten geschützt sowie der Transport, der Umschlag und die Lagerung vereinfacht werden. Die in der Praxis eingesetzten Behältertypen sind aufgrund der spezifischen Anforderungen und der entsprechenden Einsatzbereiche im Materialfluss hinsichtlich ihrer Form, Geometrie und Werkstoffe sehr unterschiedlich ([Klu10], S. 149). *Lammers, Mayer* und *Gießmann* führen die Anzahl der Transportbehälter sowie die Anzahl unterschiedlicher Behältertypen als Komplexitätstreiber auf [Lam12]; [May07]; [Gie10]. Die immer größeren Entfernungen zu den Lieferstandorten führen zwangsläufig neben steigenden Transportkosten und Mehraufwand bei der Materialsteuerung zu einem erhöhten Bedarf an Behältern im Umlaufbestand ([Klu10], S. 43). Die befragten Experten erwähnen, dass ein hoher Bedarf an Behältern im Unternehmen besteht, da aufgrund von Transportbeschädigungen die Packdichte niedrig ist und dadurch die hohe Anzahl an Behältern zustande kommt. Auch ist in den vergangenen Jahren eine Umstellung auf Kleinladungsträger-Prozesse (KLT-Prozesse) erfolgt, wodurch es zu einer Vereinzelung der Behälter kommt, die wiederum sequenziert werden müssen. Der Behälterbestand erhöht insofern die Logistikkomplexität eines Werks, da Flächen belegt werden und das Handling der Behälter geplant und koordiniert werden muss.

Handlungsschritte

Der Treiber Handlungsschritte beschreibt die Kontroll- und Handlingsprozesse an den Übergabepunkten verschiedener Verkehrsträger und Prozessbeteiligter. Er umfasst alle Arbeitsgänge, in denen das Beschaffungsobjekt physisch bewegt und umgeschlagen wird.

In der Literatur wird dieser Treiber über die Heterogenität der Schnittstellen und Prozesse beschrieben und als komplexitätssteigernd betrachtet [May07]; [Sch95b]; [Gie10]. Im Rahmen der Expertengespräche wird die Zunahme der Handlungsschritte als Komplexitätstreiber der Beschaffungslogistik bestätigt und der damit verbundene Mehraufwand mit der steigenden Lieferantenentfernung und den Sequenzierungsprozessen erklärt. Darüber hinaus ist die Werksstruktur eine wesentliche Determinante der Handlungsschritte, da beispielsweise Stockwerkswechsel eine höhere Anzahl an Handlungsschritten bedeuten.

Anzahl IT-Systeme

Der Treiber IT-Systeme steht für die Vielfalt der eingesetzten IT-Systeme. Dieser Treiber wird in der Analyse der Literatur als komplexitätswirksam bestätigt [Gie10]; [Mey07]; [BKM05]; [Lam12]. Die Gestaltung logistischer Netzwerke als permanenter Prozess ist auf die Unterstützung der Informationstechnologie (IT) angewiesen. Diese ist in der Lage, zum einen die Abhängigkeiten zwischen den Netzwerkpartnern zu koordinieren und zum anderen die Vielzahl an Materialflüssen zu überwachen. Die Mehrheit der Experten stimmt diesem Treiber zu und führt an,

dass in der Praxis durch die vielen IT-Systeme ein Komplexitätsanstieg entstand. Eine große Schwierigkeit wird in der Unterschiedlichkeit der IT-Systeme gesehen, die für die verschiedenen Aufgaben in der Logistik verwendet werden. Die Vielfalt der eingesetzten IT-Systeme führt zu Problemen und zu Mehraufwendungen, da z. B. Schnittstellen inkompatibel sind, die Logistikmitarbeiter durch die Vielfalt überfordert sind oder der Datenaustausch mit den Partnern der Supply Chain aufgrund verschiedener IT-Systeme nicht funktioniert. Dem Problem der steigenden Komplexität durch die IT könnte in Zukunft besser entgegengewirkt werden, wenn Prozesse angepasst werden und die IT-System-Vielfalt reduziert wird.

7 Kausalanalyse zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg

Um dem Forschungsziel dieser Arbeit, der Quantifizierung von Komplexität in der Logistik, näher zu kommen, werden in diesem Kapitel die Einflüsse von Komplexitätsursachen auf den Logistikerfolg mittels Kausalanalyse untersucht. Hierzu wird mit Hilfe des Programms *SmartPLS 3* eine PLS-Strukturgleichungsmodellierung durchgeführt. Das Ziel der Untersuchung ist es, die im Rahmen von Expertengesprächen ermittelten Vermutungen bezüglich Ursachen und Wirkungen statistisch zu prüfen und dabei Abhängigkeiten der Treiber untereinander zu berücksichtigen. Die Ergebnisse aus den Zusammenhängen dienen im nachfolgenden Kapitel der Methodenentwicklung zur Quantifizierung von Logistikkomplexität.

7.1 Datenerhebung

„Theorien helfen, aus der unendlichen Fülle von Faktoren genau die herauszufiltern, die untersucht werden sollen. Theorien entscheiden, welche Daten zu sammeln sind und wie diese Daten interpretiert werden sollen“ ([MLP⁺11], S. 34). Für die statistischen Analysen im Rahmen dieser Arbeit dienen die Aussagen der Experten bezüglich Ursachen-Wirkungs-Beziehungen zwischen Komplexität und Logistikerfolg. Dieser Abschnitt befasst sich mit den Hintergründen der Datenerhebung für die identifizierten und in der statistischen Analyse herangezogenen Komplexitätstreiber sowie für die in dieser Arbeit untersuchten logistischen Erfolgsgrößen. Die Daten werden bei einem Premiumautomobilhersteller erhoben, um vermutete Zusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikkennzahlen empirisch zu prüfen. Da für eine kausalanalytische Untersuchung spezifische Anforderungen an die Datenqualität und -menge bestehen, muss auch die Datenverfügbarkeit als drittes Kriterium neben Literatur und Praxisrelevanz für die Berücksichtigung eines Treibers herangezogen werden. Untersuchungen in der Praxis haben gezeigt, dass Daten zum Teil nicht konsistent gespeichert werden oder nicht genügend Datensätze verfügbar sind. Als Konsequenz können Komplexitätstreiber mit schlechter Datenverfügbarkeit oder -qualität nicht im späteren Kausalmodell berücksichtigt werden. Abb. 7.1 zeigt einen Abgleich zwischen Datenverfügbarkeit in der Praxis, Stand der Literatur sowie Praxisrelevanz und gibt Aufschluss darüber welche der in Kapitel 6 genannten Komplexitätstreiber letztendlich im Kausalmodell berücksichtigt werden.

| Stand der Forschung, Literaturrecherche | Datenver- fügbarkeit | Erhobene Messgröße(n) |
|--|-------------------------|---|
| Variantenvielfalt | ✓ | Anzahl Derivate |
| Teilevielfalt | ✓ | Anzahl SNR |
| Bündelungsstrategien | ✓ | Anzahl Plattformen, Gleichteile |
| Produktionsvolumen | ✓ | Gesamtvolumen |
| Produktionsanläufe und -ausläufe | ✓ | Anzahl An- und Ausläufe |
| Modellüberarbeitungen | ✓ | Anzahl LCI |
| Montagestruktur | ✓ | Anzahl Montagehallen, -linien, Vormontagehallen, Stockwerke |
| Externe Dienstleister | ✓ | Anzahl externer Logistikdienstleister |
| Strukturelemente | ✓ | Anzahl logistischer Strukturelemente |
| Technologische Produktvielfalt pro Montagelinie | ✓ | Anzahl Produktlinien pro Montagelinie |
| Prozessvielfalt | ✓ | Anzahl Versorgungsprozesse |
| Automatisierungsgrad | ✓ | Automatisierungsgrad in der Bereitstellung |
| Lieferantenvielfalt | ✓ | Anzahl Lieferanten |
| Lieferantenentfernung | ✓ | Durchschnittliche Lieferantenentfernung |
| Wertschöpfungstiefe | - | - |
| Anzahl IT-Systeme | - | - |
| Handlingsschritte | - | - |
| Anlieferart | ✓ | Anzahl Direktanlieferungen, Behälteranzahl |

Abb. 7.1: Finale Auswahl der Komplexitätstreiber für die Kausalanalyse

Zur Durchführung einer statistischen Analyse, welche den Einfluss von Logistikkomplexität auf den Logistikerfolg quantifizieren soll, müssen ebenso relevante logistische Erfolgsgrößen identifiziert werden. Logistikkennzahlen enthalten planungs- und entscheidungsrelevante Informationen in verdichteter Form und können Aufschluss über komplexe Strukturen geben [VS05]. Analog zur Identifizierung der Komplexitätstreiber wird auch hier der aktuelle Stand in der Literatur zu logistischen Kennzahlen mit der Datenverfügbarkeit in der Praxis abgeglichen. Es werden sechs logistische Erfolgsgrößen identifiziert, welche in die Analyse dieser Forschungsarbeit aufgenommen werden.

| Stand der Forschung, Literaturrecherche | Datenver- fügbarkeit | Erhobene Messgröße(n) |
|--|-------------------------|---|
| Kapitalbindungskosten | ✓ | Lagerreichweite, Montagereichweite |
| Liefertreue | ✓ | Anteil versorgter Fahrzeuge, störungsfreie Lieferungen |
| Servicegrad | ✓ | Anteil versorgter Fahrzeuge, störungsfreie Lieferungen |
| Lagerumschlag | - | |
| Durchlaufzeit | - | |
| Logistikkosten | ✓ | Innerbetriebliche Logistikkosten |
| Nachhaltigkeit | ✓ | CO ₂ -Ausstoß |

Abb. 7.2: Auswahl logistischer Kennzahlen für die Kausalanalyse

Ein Ziel der Logistik ist die optimale und sichere Versorgung der Montage mit Produktionsmaterial, also zum richtigen Zeitpunkt, in geeigneter Qualität und am richtigen Verbauort. Die Versorgung kann durch verschiedene Fehler und Zwischenfälle unterbrochen oder gestört werden, welche zur Messung des Logistikerfolgs dokumentiert werden und in dieser Arbeit unter dem Begriff Versorgungsleistung zusammengefasst werden. Störfälle können beispielsweise entstehen durch Bestandsdifferenzen, welche den Montageprozess behindern, falls laut Systembestand noch Teile vorhanden sind, die sich tatsächlich jedoch nicht mehr im Produktionssystem befinden. Gründe dafür sind Falschbuchungen, falsche Zählungen, falsche oder fehlende Ausschussbuchungen, Montagebestandsdifferenzen, nicht auffindbare Teile oder im Leergut zurückgehende Teile. Weitere Ursachen für interne Lieferprobleme können sein: zu späte Abrufung des Materials, Bereitstellung am falschen Verbauort, falsche Sequenzierung, Bereitstellung des falschen Teils oder der falschen Menge sowie zu späte Bereitstellung. Jeder Störfall wird in Produktionssystemen detailliert dokumentiert. Zur Berechnung der Versorgungsleistung wird zudem der Anteil an versorgten Fahrzeugen betrachtet. Sie wird in *parts per million* gemessen und gibt Aufschluss darüber wie viele Fahrzeuge vom produzierten Gesamtvolumen ohne Fehl-/Falschteil(e) versorgt werden konnten.

Die Produktionslogistik verfolgt das Ziel einer effizienten sowie effektiven Versorgung der Montage mit Produktionsmaterial. Dabei sollten die Kosten möglichst geringgehalten werden. Ein hoher Logistikerfolg kann neben der Versorgungsleistung an möglichst niedrigen Logistikkosten gemessen werden. Daher werden als Erfolgsgröße die innerbetrieblichen Kosten der Montagelogistik betrachtet, bestehend aus:

- Wareneingang (physisch, administrativ, Zollabwicklung, Reklamationsabwicklung, Bestandskontrolle, Zeitfenstersteuerung),
- Versand (Leergut, Vollgut, Versand-Zollabwicklung, Leergutsteuerung, werksinterner Transport, Disposition Zwischenwerksverkehr),
- Versorgungszentren (Lagerhallen, Dienstleistersteuerung, Automatisches Kleinteilelager (Betrieb/Leitstand), Hochregallager, Sequenzier-Zentren),

- Montageversorgung (Routenzug, Stapler, halleninterne Supermärkte/Großmärkte, Feinlogistiker, Leitstand Montageversorgung),
- Nichtserienmaterialien: Lager, physisch und administrativ (Betriebsmittel-Instandhaltung, Chemikalienlager, Entsorgung, Wareneingang für Nicht-Serienmaterialien und Gefahrstoffe),
- Anlauf (Anlauflager, Anlaufkosten) und
- Sekundärfunktionen (Leitung, Instandhaltung Logistikanlagen, Staplerwerkstatt, Batterieladestation).

Als logistische Erfolgsgrößen für die Kapitalbindung gilt die Lagerkennzahl Reichweite, wobei zwischen Lagerreichweite und Montagereichweite unterschieden werden kann. Die Lagerreichweite gibt Auskunft darüber, wann der Lagerbestand für den aktuellen Materialbedarf in der Produktion vollständig aufgebraucht ist [Wan14]. Sie wird in Arbeitstagen gemessen und berechnet sich durch die Division von Bestand im Lager und dem Bedarf:

$$\text{Reichweite} = \frac{\text{Bestand}}{\text{Bedarf}} [\text{Arbeitstage}] \quad (7.1)$$

Die Lagerreichweite kann als logistische Erfolgsgröße herangezogen werden, da eine zu geringe Reichweite zu Engpässen in der Versorgung führen kann, wohingegen eine zu hohe Reichweite zu höheren Lager- bzw. Kapitalbindungskosten führt. Analog zur Lagerreichweite wird die Montagereichweite berechnet, wobei hier lediglich das Material an der Montage berücksichtigt wird.

Durch die stetig steigende Weltbevölkerung und deren Ansprüche an Lebensqualität hat sich auch die Umweltbelastung erhöht, wodurch einer nachhaltigen Produktion eine immer stärkere Bedeutung beigemessen wird. In der Literatur wird nachhaltige Entwicklung als ein Grundsatz beschrieben, „der die Wirtschaftsweise als ökonomisch und ökologisch zukunftsfähig bezeichnet, welche die heutigen Bedürfnisse so befriedigt, dass die Bedürfnisbefriedigung kommender Generationen nicht gefährdet wird. Wirtschaften, Naturerhalt und Generationsvertrag werden als Einheit aufgefasst“ ([Bri04], S. 449). Eine Auswirkung der globalen Veränderungen ist der starke Anstieg von Kohlendioxid (CO₂) in der Atmosphäre, eine Folge der Verbrennungsprozesse zur Energiegewinnung. Um die heutige Lebensqualität auch in Zukunft zu erhalten, ist es notwendig, die Umweltbelastungen einzudämmen. Das erhöht die Anforderungen an umweltfreundliche Produkte und Produktionsprozesse [AIK⁺08], wodurch auch die Logistik betroffen ist. Daher werden als letztes Erfolgskriterium auch die CO₂-Emissionswerte eines Werks betrachtet. Sie umfassen alle CO₂-Umfänge für die Materialversorgung der Montagewerke.

7.2 Deskriptive Datenanalyse

Die Datenerhebung konnte eine Stichprobengröße von $n=64$ generieren. Dabei wurden verschiedene Merkmalsausprägungen der Variablen in acht Montagewerken eines OEM im Zeitraum von 2009 bis 2016 gemessen. Zur übersichtlicheren Darstellung und deskriptiven Untersuchung dieser Stichprobe werden die Daten nun mithilfe der Software SPSS analysiert und visualisiert.

Zunächst erfolgt eine Untersuchung der Häufigkeiten und Lageparameter, um einen ersten Eindruck über die Datenverteilungen zu gewinnen. Dabei werden zum einen quantitative Parameter

wie Mittelwert, Standardabweichung und Perzentile berechnet. Zum anderen werden die Verteilungen jeweils in einem Histogramm dargestellt. Abbildung 7.3 zeigt ein Beispiel für die Variable Anzahl_Anläufe mit einem Mittelwert von 1,24 und einer Standardabweichung von 1,265. Außerdem werden Boxplots generiert, um Ausreißer zu identifizieren, welche das Ergebnis verfälschen können [JL13]. In ihnen sind kleinster und größter Beobachtungswert, Quartile, Median sowie Ausreißer dargestellt. Abb. 7.4 zeigt den Boxplot für die Variable Einheiten_pro_Stunde.

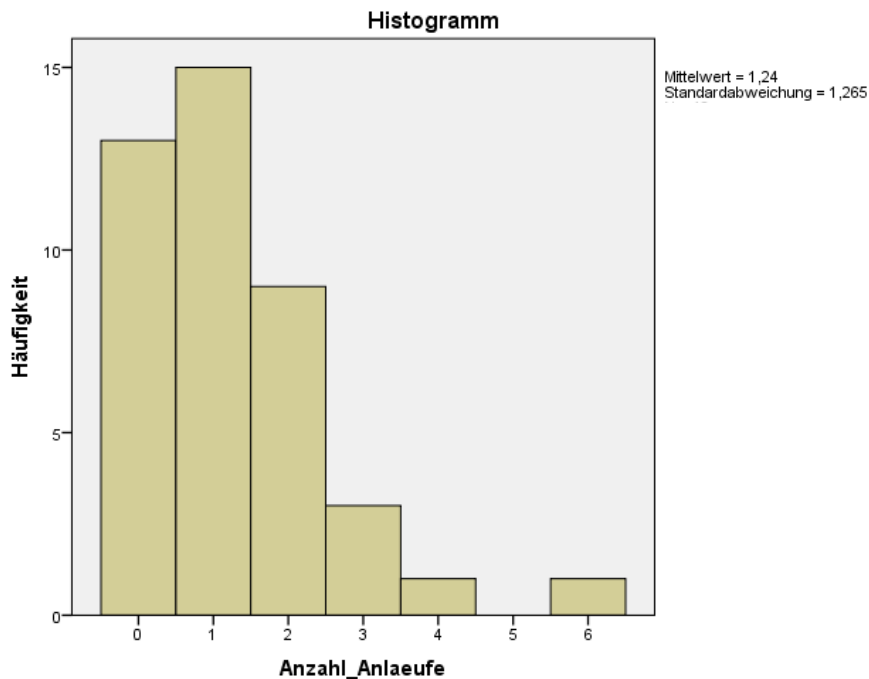


Abb. 7.3: Histogramm für die Variable Anzahl_Anläufe (aus SPSS Statistics)

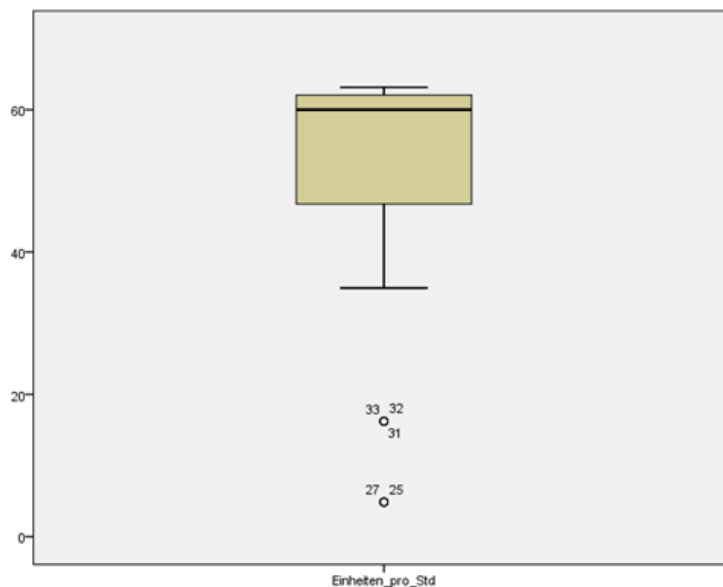


Abb. 7.4: Boxplot der Variable Einheiten_pro_Stunde (aus SPSS Statistics)

Der Median liegt beim obigen Beispiel bei $x_{\text{med}} = 60$ und der Interquartilsabstand beträgt $d_Q = 20,51$. Damit kann für diese Verteilung eine mittlere Streuung interpretiert werden. Beachtet werden müssen unbedingt die eingezeichneten Ausreißer der Fälle 25 bis 27 sowie 31 bis 33. Letztere sind die Beobachtungen eines Werks in Südafrika. Mit 16 Einheiten pro Stunde ist hier die Produktionsmenge um einiges geringer als der Durchschnitt von 48 Einheiten pro Stunde. Dies hängt beispielsweise mit dem geringeren gesamten Produktionsvolumen des Werkes, da hier lediglich ein Fahrzeugmodell montiert wird, und allgemein mit der geringeren Automatisierung der Montage zusammen. Ein weiterer Grund könnten auch kulturelle Unterschiede sein, da in Südafrika Streiks häufig die Ursache für eine tage- oder wochenlange Produktionsunterbrechung sind. Die zweite Ausreißergruppe (Fälle 25 bis 27) stellt die Produktion von Elektrofahrzeugen dar. Die Montage von Elektro- und Hybridfahrzeugen erfolgt noch wenig automatisiert und nimmt daher mehr Zeit in Anspruch. Außerdem wird von diesen Modellen aktuell ein wesentlich geringeres Produktionsvolumen erzielt, weshalb mit einer höheren Taktzeit in der Montage kalkuliert werden kann. Da die Ausreißer dieser Variable eindeutig erklärt werden können und somit nicht durch Messfehler oder zufällig entstanden sind, werden sie in der weiteren Analyse beibehalten und ausdrücklich einbezogen. Soweit keine Gesetzmäßigkeit bei den Ausreißerwerten erkannt wird, können diese ersetzt werden ([Cle15], S. 25). Bei der Ersetzung fehlender oder ausreißender Werte ist die Grundidee, fehlende Daten durch plausible Werte aufzufüllen. Dabei geht es jedoch nicht darum, die wahren Werte zu rekonstruieren. Hauptanliegen ist viel mehr, einen Datensatz zu erzeugen, der bei den weiteren Analysen gute Ergebnisse liefert. Aufgrund der Vorteile des EM-Algorithmus wird dieser für die Ersetzung der Ausreißer und fehlenden Werte verwendet. Fehlende Werte treten auf durch inkonsistente Datenspeicherung, schlechte Datenqualität oder mangelnde Zugänglichkeit für den Untersuchenden im Zeitraum der Studie. Daher ist es im Rahmen der deskriptiven Datenanalyse notwendig, den Anteil fehlender Werte zu betrachten.

Tab. 7.1: Fehlende Werte der Variablen in Prozent

| Variable | Anteil fehlend [%] |
|----------------------------|--------------------|
| Anteil_Nicht-Gleichteile | 2,4 |
| Anzahl_Lieferanten | 28,6 |
| Anzahl_Resequenzen | 19,0 |
| Lieferantenentfernung | 21,3 |
| Automatisierungsgrad | 21,2 |
| Anzahl_Versorgungsprozesse | 17,1 |
| Anzahl_Strukturelemente | 5,9 |
| Einheiten_pro_Stunde | 15,3 |

| | |
|---------------------------|------|
| Reichweite_Lager | 23,1 |
| Reichweite_Montage | 23,1 |
| Störungsfreie_Lieferungen | 35,3 |

Bevor fortgeschrittene Analysen mit dem generierten Datenmaterial durchgeführt werden können, müssen Datensätze auf ihre genaue Verteilungseigenschaft überprüft werden. Für viele statistische Analysen ist es notwendig, zwischen normalverteilten und nicht normalverteilten Daten zu unterscheiden. Daher werden im Laufe der deskriptiven Analyse Tests auf eine Normalverteilung durchgeführt, indem die Variablen gegen die Nullhypothese, die Daten sind normalverteilt, geprüft werden. Hierzu dienen der Kolmogorov-Smirnow und der Shapiro-Wilk-Test sowie Histogramme und Q-Q-Diagramme. Der Kolmogorov-Smirnow-Test zeigt, dass bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$ lediglich die Variablen innerbetriebliche_Logistikkosten und Reichweite_Lager auf eine Normalverteilung hinweisen. Die Daten aller anderen Variablen sind mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 10 % nicht normalverteilt.

Die Kenntnis über die Verteilungseigenschaften der Stichprobe ist beispielsweise wichtig zur Berechnung von Korrelationen. Da keine Normalverteilungen vorliegen, wird der Spearman-Korrelationskoeffizient verwendet. Aus dem bereinigten und vervollständigten Datensatz wird schließlich eine Korrelationsmatrix berechnet, um eine erste Analyse von Zusammenhängen zwischen jeweils zwei Variablen erkennen zu können. Die vollständige Korrelationsmatrix ist im Anhang C aufgeführt, folgende Abbildung zeigt einen Auszug:

| | | Einheiten_pro_Std | Anzahl_Stockwerke | Automatisierungsgrad | Anzahl_Externe_DL | Anzahl_Strukturelemente | Anzahl_Montagehallen | Anzahl_Standardversorgungsprozesse | Anzahl_Montagelinien | Produktlinien_pro_Montagelinie | Inhouse_Kosten | Reichweite_Montage | Reichweite_Lager | Anteil_versorgter_Fahrzeuge |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------|--------------------|------------------|-----------------------------|
| Einheiten_pro_Std | Korrelationskoeffizient | 1,000 | ,736* | ,843* | -,484* | ,553* | -,319* | ,528* | 0,018 | -,548* | -,469* | -,197* | -,001 | ,531* |
| | Sig. (2-seitig) | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,022 | 0,000 | 0,903 | 0,000 | 0,001 | 0,165 | 0,997 | 0,000 |
| Anzahl_Stockwerke | Korrelationskoeffizient | ,736* | 1,000 | ,656* | -,265 | 0,045 | ,518* | ,526* | 0,269 | 0,209 | ,555* | -,584* | -,185 | 0,265 |
| | Sig. (2-seitig) | | | 0,000 | 0,000 | 0,060 | 0,755 | 0,000 | 0,056 | 0,142 | 0,000 | 0,000 | 0,194 | 0,060 |
| Automatisierungsgrad | Korrelationskoeffizient | ,843* | ,656* | 1,000 | -,614* | ,503* | ,566* | ,589* | ,287* | ,580* | ,442* | -,223* | -,027* | ,356* |
| | Sig. (2-seitig) | | | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,041 | 0,000 | 0,001 | 0,117 | 0,853 | 0,010 |
| Anzahl_Externe_DL | Korrelationskoeffizient | -,484* | -,265 | -,614* | 1,000 | -,383* | -,604* | -,500* | -,646* | -,570* | -,243* | -,196* | 0,189 | -,160 |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,086 | 0,167 | 0,194 | 0,261 |
| Anzahl_Strukturelemente | Korrelationskoeffizient | ,553* | 0,045 | ,503* | -,383* | 1,000 | -,051 | ,303* | -,289* | ,592* | ,330* | ,361* | 0,183 | ,483* |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | 0,724 | 0,031 | 0,040 | 0,000 | 0,018 | 0,009 | 0,199 | 0,000 |
| Anzahl_Montagehallen | Korrelationskoeffizient | -,319* | ,518* | ,566* | -,604* | -,051 | 1,000 | ,498* | ,789* | 0,265 | ,484* | -,461* | -,550* | -,079* |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | 0,000 | 0,000 | 0,061 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,583 |
| Anzahl_Standardversorgungsprozesse | Korrelationskoeffizient | ,528* | ,526* | ,589* | -,500* | ,303* | ,498* | 1,000 | ,290* | ,308* | 0,235 | -,319* | -,276* | 0,993 |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | | 0,039 | 0,028 | 0,097 | 0,022 | 0,050 | 0,517 |
| Anzahl_Montagelinien | Korrelationskoeffizient | 0,018 | 0,269 | ,287* | -,646* | -,289* | ,789* | ,290* | 1,000 | 0,125 | 0,157 | -,213* | -,348* | -,166* |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | | | 0,382 | 0,270 | 0,133 | 0,012 | 0,244 |
| Produktlinien_pro_Montagelinie | Korrelationskoeffizient | ,548* | 0,209 | ,580* | -,570* | ,592* | 0,265 | ,308* | 0,125 | 1,000 | ,277* | 0,232 | 0,070 | 0,228 |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | | | | 0,049 | 0,101 | 0,625 | 0,107 |
| Inhouse_Kosten | Korrelationskoeffizient | -,469* | ,555* | ,442* | -,243* | ,330* | ,484* | 0,235 | 0,157 | ,277* | 1,000 | -,370* | 0,023 | 0,246 |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | | | | | | 0,008 | 0,873 |
| Reichweite_Montage | Korrelationskoeffizient | -,197* | -,584* | -,223* | -,196* | ,361* | -,461* | -,319* | -,213* | 0,232 | -,370* | 1,000 | ,385* | -,072* |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | | | | | | | 0,005 |
| Reichweite_Lager | Korrelationskoeffizient | -,001 | -,185 | -,027* | 0,189 | 0,183 | -,550* | -,276* | -,348* | 0,070 | 0,023 | ,385* | 1,000 | 0,617 |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | | | | | | | 0,059 |
| Anteil_versorgter_Fahrzeuge | Korrelationskoeffizient | ,997 | 0,194 | 0,853 | 0,184 | 0,199 | 0,000 | 0,050 | 0,012 | 0,625 | 0,873 | 0,005 | | 0,683 |
| | Sig. (2-seitig) | | | | | | | | | | | | | 0,000 |
| | | 0,000 | 0,060 | 0,010 | 0,261 | 0,000 | 0,583 | 0,517 | 0,244 | 0,107 | 0,082 | 0,617 | 0,683 | |

*. Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).
 †. Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

Abb. 7.5: Auszug der Korrelationsmatrix nach Spearman

Getestet wird sowohl auf dem 1 %- als auch dem 5 %-Signifikanzniveau, wobei selbst bei sehr geringem Signifikanzlevel (0,01) einige signifikante Korrelationen berechnet werden können. Die

Korrelationsmatrix zeigt, dass bereits einige statistische Zusammenhänge zwischen Komplexitätstreibern und logistischen Erfolgsfaktoren nachgewiesen werden können. Es werden aber auch Zusammenhänge dargestellt, die anhand von sachlogischen Überlegungen nicht erklärbar sind. In solch einem Fall spricht man von einer Scheinkorrelation. In obiger Korrelationsmatrix wird beispielsweise ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Variablen Einheiten_pro_Std und Automatisierungsgrad aufgezeigt. Hier kann jedoch durch theoretische Überlegungen kein direkter Zusammenhang gesehen werden. Auch umgekehrt kann beobachtet werden, dass vermutete Abhängigkeiten statistisch nicht signifikant bestätigt werden können. So kann angenommen werden, dass zwischen der Anzahl an Montagehallen und der Anzahl an Strukturelementen ein positiver Zusammenhang besteht. Dies ist jedoch anhand der vorliegenden Daten statistisch nicht nachweisbar. Gründe hierfür könnten die geringe Stichprobengröße und die sich wenig ändernden Daten der Montagestruktur sein.

7.3 Modellentwicklung und -spezifikation

Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage dieser Arbeit, der Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Komplexitätsursachen und Logistikerfolg, wird nun eine Kausalanalyse mittels PLS-Strukturgleichungsmodellierung durchgeführt. Die Anwendung dieser Methodik scheint im vorliegenden Forschungsfall besonders geeignet, da sie eine Trennung von latenten Konstrukten und den jeweiligen Indikatoren erlaubt. Eine weitere positive Eigenschaft der Strukturgleichungsmodellierung ist die explizite Berücksichtigung von Messfehlern in der Berechnung, welche durch die Datenerhebung bei einem OEM nicht auszuschließen sind [WM14b]. Die Unterschiede der beiden Verfahren Kovarianz- und Varianzstrukturanalyse wurden bereits in Abschnitt 5.3.2 herausgearbeitet. Die Entscheidung für die Verwendung der PLS-Methodik begründet sich vor allem durch zwei wesentliche Aspekte: Zum einen können mit PLS bereits kleine Stichprobengrößen verarbeitet werden. Dies ist bei einer vorliegenden Stichprobengröße von $n=64$ der Fall. Zum anderen ist der PLS-Ansatz wesentlich besser für Prognosen und die Ermittlung von Effektstärken geeignet, worauf der Fokus dieser Untersuchung liegt [CG09]. Des Weiteren kann die Vielzahl an Indikatoren und Komplexität der Modelle als Grund für die Verwendung des PLS-Ansatzes aufgeführt werden ([Gie10], S. 247).

7.3.1 Hypothesenbildung

Der erste Prozessschritt der Strukturgleichungsmodellierung besteht in der Bildung konkreter Hypothesen bezüglich der vermuteten Beziehungen zwischen den Variablen. Die Hypothesen bilden die Basis der Untersuchung und werden im Rahmen der Kausalanalyse auf ihre Richtigkeit überprüft. Allgemein beinhalten Hypothesen widerspruchsfreie und aus der betrachteten Theorie begründbare Aussagen, deren Gültigkeit in der Wirklichkeit aber nur vermutet wird. Als „wissenschaftlich“ werden Hypothesen dann bezeichnet, wenn sie folgende Kriterien erfüllen [BD02]:

- Die Hypothese weist einen Bezug zu realen Sachverhalten auf, die sich empirisch untersuchen lassen.

- Die Aussage einer Hypothese ist allgemeingültig, d. h. sie beinhaltet eine über den Einzelfall oder ein singuläres Ereignis hinausgehende Behauptung.
- Der Hypothese liegt zumindest implizit die Formalstruktur eines sinnvollen Konditionalsatzes zugrunde.
- Der Konditionalsatz muss potenziell falsifizierbar sein, d. h. es müssen Ereignisse denkbar sein, die dem Konditionalsatz widersprechen. ([WM14a], S. 4).

Es ist die Aufgabe von Strukturgleichungsmodellen, ein sachlogisch formuliertes Hypothesensystem in eine formale Struktur zu überführen und damit die empirische Prüfung von Strukturmodellen zu ermöglichen ([WM14a], S. 7). Gemäß der Strukturierung des Komplexitätsbegriffs in die Dimensionen Produkt-, Struktur- und Netzwerkkomplexität erfolgt auch die Hypothesenformulierung innerhalb dieser drei Kategorien.

Nach *Schuh* gibt es drei grundlegende, sich gegenseitig beeinflussende Dimensionen, in welchen sich die Produktkomplexität begründet ([Sch05b], S. 148). Diese sind Produktprogramm, Produktstruktur und Produktlebenszyklus. Als Folge externer Ursachen wie beispielsweise steigende Vielfalt der Kundenwünsche nennt *Schuh* die unternehmensseitige Ausweitung des Produktprogramms. Die daraus resultierende „(...) unübersichtliche Angebotspalette (...)“ führt zu Veränderungen bzw. Erweiterungen der Bauteilvarianten im Rahmen der Produktstruktur ([Sch05b], S. 148). „Kürzere Produktlebenszyklen und kleinere Marktsegmente verstärken diese Tendenz zunehmend.“ ([Sch05b], S. 149). Das Produktprogramm bezieht sich dabei auf Umfänge und Angebotsvielfalt, während die Produktstruktur sowohl Strukturen als auch Zusammenhänge der Produktelemente beschreibt [SLN10]. Der Produktlebenszyklus legt hingegen den Austausch alter Derivate gegen ihre Nachfolger sowie die Überarbeitung bestehender Derivate dar.

Tab. 7.2: Hypothesensystem für Produktkomplexität

| Hypothese | Richtung | Beschreibung |
|-----------|----------|---|
| H1 | (+) | Das Produktprogramm hat einen positiven Einfluss auf die Produktstruktur. |
| H2 | (+) | Die Produktstruktur hat einen positiven Einfluss auf den Produktlebenszyklus. |
| H3 | (+) | Das Produktprogramm hat einen positiven Einfluss auf den Produktlebenszyklus. |
| H4 | (-) | Das Produktprogramm hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H5 | (+) | Das Produktprogramm hat einen positiven Einfluss auf die Logistikkosten. |
| H6 | (+) | Das Produktprogramm hat einen positiven Einfluss auf die Umweltbelastungen. |
| H7 | (+) | Das Produktprogramm hat einen positiven Einfluss auf die Lagerhaltung. |

| | | |
|-----|-----|---|
| H8 | (-) | Die Produktstruktur hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H9 | (+) | Die Produktstruktur hat einen positiven Effekt auf die Logistikkosten. |
| H10 | (+) | Die Produktstruktur hat einen positiven Einfluss auf die Umweltbelastungen. |
| H11 | (+) | Die Produktstruktur hat einen positiven Effekt auf die Lagerhaltung. |
| H12 | (-) | Der Produktlebenszyklus hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H13 | (+) | Der Produktlebenszyklus hat einen positiven Effekt auf die Logistikkosten. |
| H14 | (+) | Der Produktlebenszyklus hat einen positiven Einfluss auf die Umweltbelastungen. |
| H15 | (+) | Der Produktlebenszyklus hat einen positiven Effekt auf die Lagerhaltung. |

Mit einer zunehmenden Komplexität wird vor allem ein Anstieg der Kosten assoziiert, da beispielsweise eine hohe Variantenanzahl und Teilevielfalt zu höheren Kosten für die Beschaffung, Lagerung sowie das Handling führt ([GL10a], S. 156). Daher wird in den formulierten Hypothesen grundsätzlich ein negativer Einfluss der Komplexitätstreiber auf die erfolgsbezogenen Logistikfaktoren angenommen. Basierend auf dem Grundgedanken der drei Elemente des Komplexitätsmanagements im Bereich Produkt sowie den Ergebnissen der Experteninterviews werden die in Tab. 7.2 dargestellten Hypothesen über den Zusammenhang zwischen Ursachen der Produktkomplexität und logistischen Erfolgsgrößen aufgestellt. Hierbei symbolisiert (+) einen positiven Zusammenhang, es wird bspw. angenommen, dass eine Ausweitung des Produktprogramms auch eine Erweiterung der Produktstruktur nach sich zieht. Dies wird auch anhand von Hypothese fünf deutlich: Der angenommene, positive Effekt des Produktprogramms auf die Logistikkosten ist als Erhöhung dieser zu interpretieren. In Bezug auf den Logistikerfolg ist eine Erhöhung der Logistikkosten negativ zu werten, dies ist jedoch von der positiven Wirkrichtung zu unterscheiden.

Das Logistiknetzwerk wird vor allem durch die Lieferantenstruktur und die implementierten Anlieferkonzepte bestimmt. In der Literatur werden auch hier die negativen Effekte eines komplexen Logistiknetzwerks betont. So resultiert eine hohe Anzahl zu beschaffender Artikel in einer Vielzahl zu führender Lieferantengespräche und im weiteren Verlauf zu einem Anstieg der erforderlichen Lieferantenaudits und Qualitätskontrollen ([GL10a], S. 156), was sich letztendlich in den Logistikkosten widerspiegelt.

Tab. 7.3: Hypothesensystem für Netzwerkkomplexität

| Hypothese | Richtung | Beschreibung |
|-----------|----------|--|
| H16 | (-) | Die Lieferantenvielfalt hat einen negativen Einfluss auf die Lieferantenperformance. |
| H17 | (+) | Die Lieferantenvielfalt hat einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |
| H18 | (+) | Die Anzahl Re-Sequenzierungen hat einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |
| H19 | (+) | Das Anlieferkonzept hat einen positiven Effekt auf die Logistikkosten. |
| H20 | (+) | Das Anlieferkonzept hat einen positiven Einfluss auf die Lagerhaltung. |
| H21 | (+) | Die Lieferantenlokation hat einen positiven Einfluss auf die Umweltbelastungen. |
| H22 | (+) | Die Lieferantenlokation hat einen positiven Einfluss auf die Lagerhaltung. |
| H23 | (+) | Das Transportvolumen hat einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |
| H24 | (+) | Das Transportvolumen hat einen positiven Einfluss auf die Umweltbelastungen. |
| H25 | (-) | Das Transportvolumen hat einen negativen Einfluss auf die Lagerhaltung. |
| H26 | (+) | Die Lieferantenperformance hat einen positiven Einfluss auf die Versorgungsleistung. |

Gleichzeitig wird jedoch auch der negative Einfluss der Komplexität auf die leistungsbezogenen Erfolgsgrößen betont ([Sch92], S. 84). Die Qualität der logistischen Leistung ist stark von der Verfügbarkeit der benötigten Inputfaktoren (Rohmaterialien, Zukaufteile, Module etc.) abhängig. Die Sicherstellung der zeitgenauen Bereitstellung der erforderlichen Volumina wird jedoch mit einer zunehmenden Komplexität schwieriger. Insbesondere die Termintreue sowie die Lieferfähigkeit werden stark von der Unsicherheit bzgl. der Lieferzeit und -qualität beeinflusst, die von den Lieferanten ausgeht. ([GL10a], S. 156f.). Zusammen mit den Erkenntnissen der Experteninterviews bzgl. der Auswirkungen von Netzwerkkomplexität auf den Logistikerfolg können zehn Hypothesen formuliert werden, welche in Tab. 7.3 zusammengefasst sind.

Tab. 7.4: Hypothesensystem für Struktur-/Prozesskomplexität

| Hypothese | Richtung | Beschreibung |
|-----------|----------|---|
| H27 | (+) | Die Montagestruktur hat einen positiven Einfluss auf den Logistikprozess. |

| | | |
|-----|-----|--|
| H28 | (-) | Die Montagestruktur hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H29 | (+) | Die Montagestruktur hat einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |
| H30 | (-) | Die Montagestruktur hat einen negativen Einfluss auf die Lagerhaltung. |
| H31 | (-) | Der Logistikprozess hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H32 | (+) | Der Logistikprozess hat einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |
| H33 | (+) | Der Logistikprozess hat einen positiven Einfluss auf die Lagerhaltung. |
| H34 | (-) | Die Produktlinien haben einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H35 | (+) | Die Produktlinien haben einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |
| H36 | (-) | Die Produktlinien haben einen negativen Einfluss auf die Lagerhaltung. |
| H37 | (-) | Der Produktionsausstoß hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H38 | (+) | Der Produktionsausstoß hat einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |
| H39 | (-) | Der Produktionsausstoß hat einen negativen Einfluss auf die Lagerhaltung. |
| H40 | (-) | Die Logistikstruktur hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H41 | (-) | Die Logistikstruktur hat einen negativen Einfluss auf Logistikkosten. |
| H42 | (-) | Der kumulierte Rückstand hat einen negativen Einfluss auf die Versorgungsleistung. |
| H43 | (+) | Der kumulierte Rückstand hat einen positiven Einfluss auf Logistikkosten. |

Die strukturelle Komplexität war bisher Gegenstand vielfältiger Komplexitätsanalysen von Produktionssystemen [SPB⁺06]; [WPB08]; [BMW14], jedoch ohne konkreten Logistikbezug. Die Strukturkomplexität wird dabei maßgeblich durch die Anzahl an Arbeitsstationen, Materialflüssen und verschiedenste Fertigungsprozesse charakterisiert und ihr negativer Einfluss auf das Unternehmensergebnis betont [SPB⁺06]. Unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Definition von Komplexität mit ihrer Vielzahl an Systemelementen und Relationen können die bisherigen Erkenntnisse auf ein Logistiksystem übertragen werden. Insbesondere werden die Strukturen und Prozesse der Werkslogistik auch maßgeblich durch die Montage beeinflusst. Einhergehend mit den Aussagen der Experten wird daher angenommen, dass die Montagestruktur einen signifikanten, negativen Einfluss auf den Logistikerfolg hat. In Anlehnung an die Untersuchung von *Gartzen* des Einflusses der Montageprozesse ([Gar12], S. 111 f.) wird auch hier davon ausgegangen,

dass der Logistikprozess negative Auswirkungen auf logistische Erfolgsmessgrößen hat. Basierend auf diesen Überlegungen und den Expertenmeinungen zur Strukturkomplexität werden die in Tab. 7.4 abgebildeten Hypothesen aufgestellt.

Aufbauend auf den zu untersuchenden Hypothesen, werden in den folgenden Abschnitten alle für die drei Strukturgleichungsmodelle relevanten Messmodelle sowie die Strukturmodelle spezifiziert.

7.3.2 Spezifizierung der Struktur- und Messmodelle

Obwohl einzelne Aspekte der Komplexität, insbesondere der Netzwerkkomplexität, in vorherigen Forschungsarbeiten bereits berücksichtigt wurden, war die Werkskomplexität bisher kein eigenständiges Untersuchungsobjekt. Daher kann bei der Spezifizierung der Mess- und Strukturmodelle auf keine bereits angewendeten und bewährten Konzeptualisierungen zurückgegriffen werden.

Für die Kategorie Produktkomplexität kann auf eine bestehende Untersuchung des Einflusses von Produktkomplexität auf den qualitativen Logistikerfolg von *Feldhütter et al.* zurückgegriffen werden [FHS16]. Das für diese Analyse zugrunde liegende Strukturmodell ist angelehnt an die Zusammenhangsuntersuchung dreier Strategieansätze im Umgang mit Produktkomplexität von *Schuh* ([Sch05b], S. 149). Demzufolge enthält das entwickelte Strukturmodell die drei latenten exogenen Variablen Produktprogramm, Produktstruktur und Produktfolge/-lebenszyklus. Diese repräsentieren die Dimensionen der Ursachen von Produktkomplexität und bilden Stellhebel für das Komplexitätsmanagement. Im Rahmen der Produktprogrammplanung werden Entscheidungen bezüglich Leistungsangebot und Leistungsumfänge zur Erfüllung der Nachfrage getroffen. Unter Produktstruktur wird „(...) die Zusammensetzung eines Erzeugnisses, bestehend aus Komponenten und Baugruppen und deren Strukturbeziehungen (...)“ ([Sch05b], S. 119) verstanden. Die gewählte Produktstruktur ist beispielsweise ausschlaggebend dafür, wie hoch Lagerbestände und -kosten sind und ob angestrebte optimierte Durchlaufzeiten erreicht werden können ([Sch05b], S. 272). Die latente Variable Produktfolge/-lebenszyklus beinhaltet die Häufigkeit der Abwechslung alter durch neue Derivate und die Überarbeitung bestehender Modelle. Die Erweiterung des bereits existierenden Modells von *Feldhütter et al.* findet seitens der latenten endogenen Variablen statt. Denn in der vorliegenden Arbeit enthält das Strukturmodell vier latente endogene Variablen, welche den Logistikerfolg abbilden. Der Logistikerfolg wird nun neben qualitativen Aspekten der Versorgungsleistung auch durch quantitative Faktoren wie beispielsweise Kosten skizziert. Diese Variablen sind insbesondere Versorgungsleistung, Umweltbelastungen, Lagerhaltung und Logistikkosten. Die Messmodelle der latenten Variablen Produktprogramm, Produktstruktur und Produktfolge/-lebenszyklus basieren auf den genannten Beschreibungen dieser drei Ursachen. Ihnen werden die erarbeiteten Treiber-Messgrößen unter Berücksichtigung der Korrelationen zwischen den Variablen zugeordnet. Für alle drei Konstrukte werden reflektive Messmodelle gewählt.

Dem Messmodell des Produktprogramms werden dem Begriffsverständnis entsprechend die manifesten Variablen Anzahl Derivate, Anzahl Plattformen und Gesamtvolumen zugeordnet. Das Gesamtkonstrukt ist reflektiv, da jede dieser Messgrößen für sich alleine die zugrunde liegende, latente Variable Produktprogramm repräsentiert und die drei Variablen untereinander stark korrelieren. Außerdem besitzen die Messgrößen dieselben Antezedenzen und Konsequenzen.

Die Produktstruktur wird durch die Anzahl Sachnummern und den Anteil an Nicht-Gleichteilen als korrelierende, manifeste Variablen operationalisiert. Da auch in diesem Konstrukt beide Messgrößen eigenständige Repräsentationen der Produktstruktur darstellen und die Veränderung einer dieser Variablen verbunden wäre mit einer gleichgerichteten Veränderung der anderen Messgröße, ist das Messmodell ebenfalls reflektiv. Das Messmodell des Produktlebenszyklus besteht aus den Messgrößen Anzahl Anläufe, Anzahl Ausläufe und LCI. Auch dieses Modell ist aus den in den anderen beiden Messmodellen genannten Gründen reflektiv.

Ebenso werden die endogenen latenten Variablen, welche den Logistikerfolg abbilden, durch reflektive Messmodelle spezifiziert. So wird die Versorgungsleistung durch die Indikatoren Störungsfreie Lieferungen und Anteil versorgter Fahrzeuge bestimmt. Logistikkosten werden lediglich durch den Indikator Innerbetriebliche Logistikkosten spezifiziert, da eine genauere Granularität aufgrund der Datenlage nicht möglich ist. Hierunter sind jegliche Kosten aggregiert, die für die Montageversorgung anfallen.¹⁰ Auch die Umweltbelastungen können nur durch eine Variable, den CO₂-Ausstoß gemessen werden. An dieser Stelle wäre es wünschenswert, weitere Variablen zur Operationalisierung der Umweltbelastungen mit in die Untersuchung aufzunehmen, dies ist allerdings aufgrund der Datenverfügbarkeit nicht möglich. Das letzte endogene Konstrukt im Pfadmodell für Produktkomplexität stellt die Lagerhaltung dar, welche durch die Materialreichweite in der Montage und im Lager repräsentiert wird. Abbildung 7.6 zeigt das vollständige Pfaddiagramm der spezifizierten Struktur- und Messmodelle für Produktkomplexität.

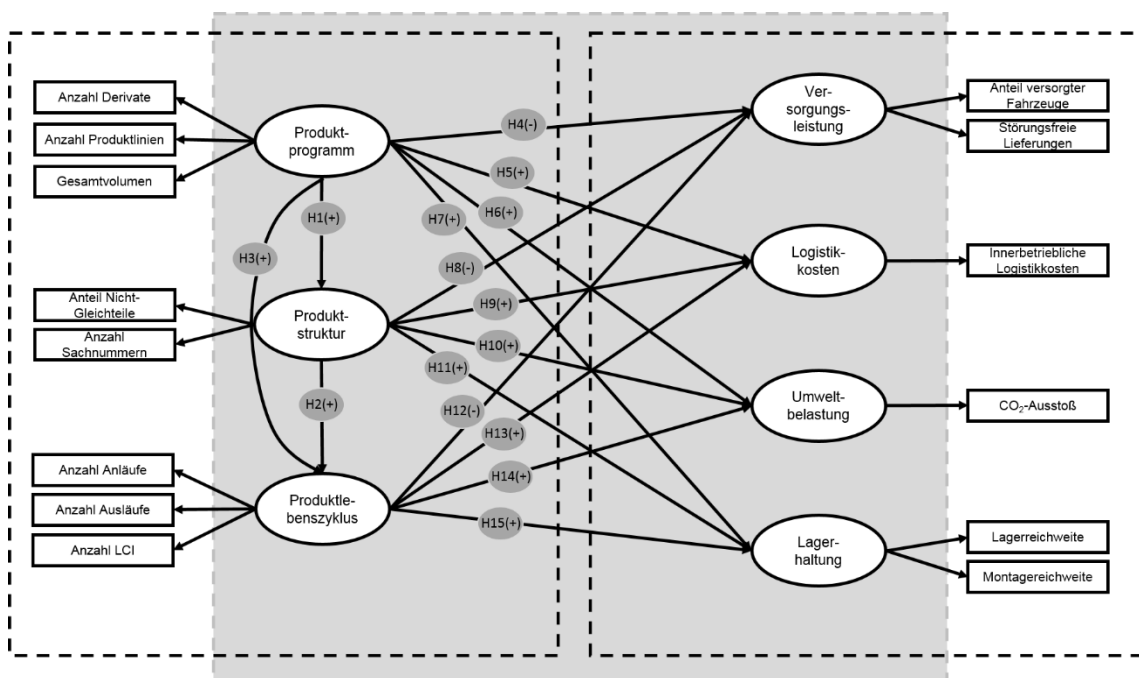


Abb. 7.6: Vollständiges Pfaddiagramm für Produktkomplexität inkl. Hypothesen (nach [FHS16])

Das entwickelte Strukturmodell für Netzwerkkomplexität enthält die sechs latenten exogenen Variablen Lieferantenvielfalt, Re-Sequenzierungen, Lieferantenperformance, Anlieferkonzept, Lieferantenlokation und Transportvolumen. Diese repräsentieren die Dimensionen der Ursachen für

¹⁰ Für eine detaillierte Auflistung der Kostenbestandteile siehe Abschnitt 7.1.

die Netzwerkkomplexität und sind „von außen“ vorgegebene Größen. Des Weiteren enthält das Strukturmodell die vier bereits im Modell für Produktkomplexität vorgestellten latenten endogenen Variablen Versorgungsleistung, Logistikkosten, Umweltbelastungen sowie Lagerhaltung, deren Messmodelle unverändert bleiben.

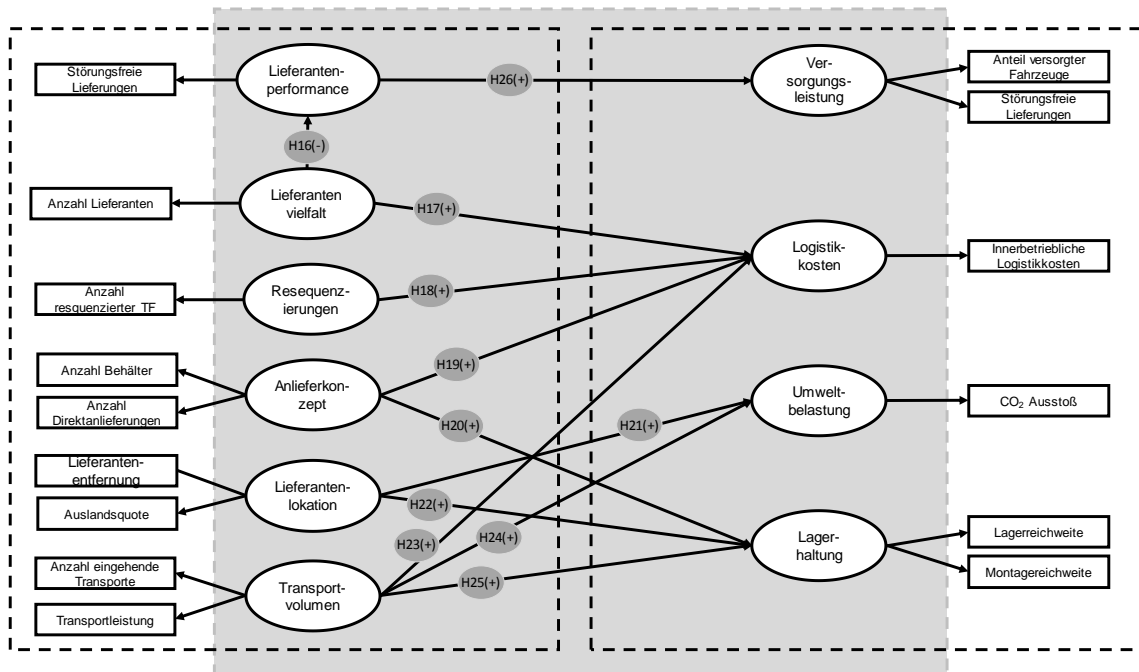


Abb. 7.7: Vollständiges Pfadmodell für Netzwerkkomplexität inkl. Hypothesen

Dem Messmodell der Konstrukte Lieferantenvielfalt, Re-Sequenzierung und Lieferantenperformance werden den Begriffen entsprechend die manifesten Variablen Anzahl Lieferanten, Anzahl re-sequenzierter Teilefamilien (TF) und Anzahl störungsfreie Lieferungen zugeordnet. Der latenten Variable Anlieferkonzept wird die Anzahl Direktanlieferungen wie auch die Messgröße Behälteranzahl zugewiesen, da die beiden Variablen stark miteinander korrelieren und inhaltlich das Anlieferkonzept repräsentieren. Ebenso korrelieren die Variablen Lieferantenentfernung und Auslandsquote stark miteinander und bestimmen die Lieferantenlokation. Die latente Variable Transportvolumen wird durch die beiden reflektiven Variablen Transportleistung und Anzahl eingehender Transporte gemessen.

Im Rahmen der Hypothesenformulierung wurden bereits zur Definition der Strukturkomplexität eines Werkes die latenten Begriffe Montagestruktur, Logistikstruktur und Logistikprozess gebildet. So wird jetzt die Montagestruktur mit den Indikatoren Anzahl Montagehallen, Anzahl Vormontagehallen, Anzahl Stockwerke sowie Anzahl Montagelinien belegt. Zum einen weisen die Variablen starke Korrelationen untereinander auf und zum anderen spiegeln sie auch inhaltlich die strukturellen Gegebenheiten eines Montagesystems gut wider. Der Logistikprozess wird durch die manifesten Variablen Anzahl Standardprozesse und Anzahl Strukturelemente repräsentiert. Die Anzahl der standardisierten Versorgungsprozesse in einem Werk wird maßgeblich durch die vorhandenen Strukturelemente und ihre Materialflussverbindungen untereinander beeinflusst. Dies wird auch durch die starke Korrelation der beiden Variablen bestätigt. Auch im Pfadmodell für Strukturkomplexität können drei latente exogene Variablen mit lediglich einem Indikator belegt werden: die Produktlinien, der Produktionsausstoß und der kumulierte Rückstand. Diesen

werden die Indikatoren Produktlinien pro Montagelinie, Einheiten pro Stunde und kumulierter Rückstand zugeordnet. Zwar würde die Anzahl verschiedener Produktlinien, die auf einer Montagelinie montiert wird, inhaltlich auch gut zur latenten Variable Montagestruktur passen, dies wird aber durch eine Betrachtung der Korrelationen nicht bestätigt. Daher wird der Aspekt separat aufgenommen. Die beiden anderen Variablen weisen weder Korrelationen zu anderen Indikatoren auf noch können sie aufgrund sachlogischer Überlegungen bestehenden latenten Konstrukten zugeordnet werden. Abbildung 7.8 liefert das vollständige Pfadmodell mit den genannten Messmodellen sowie den vorgestellten Hypothesen für die Struktur- und Prozesskomplexität in der Montagelogistik.

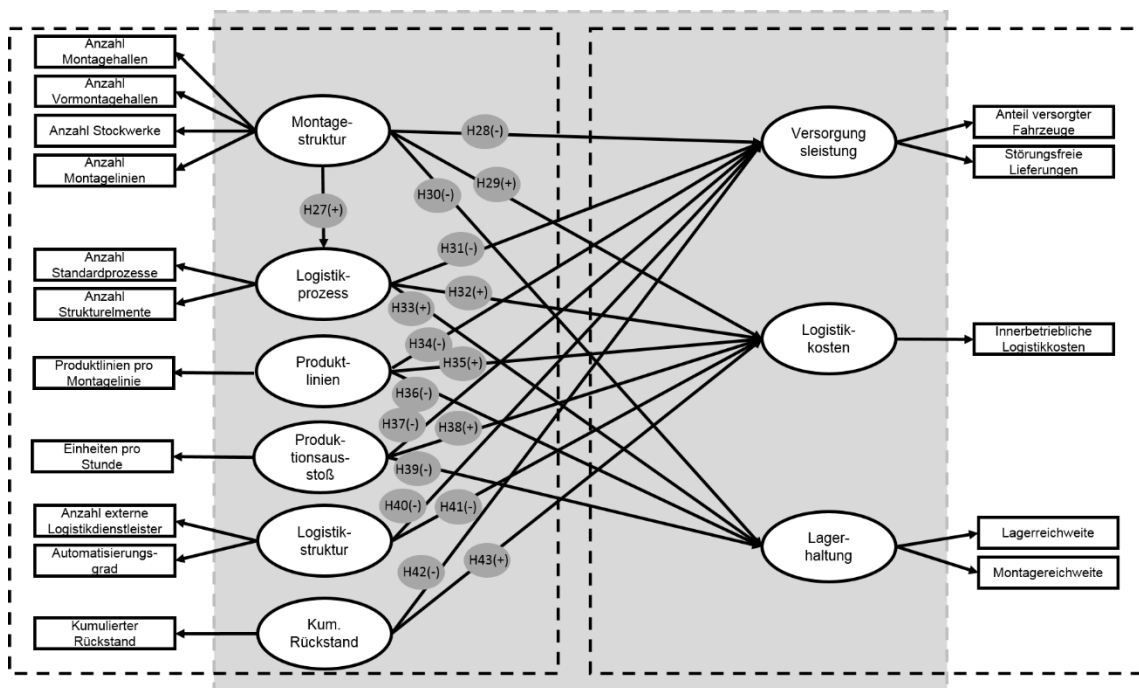


Abb. 7.8: Vollständiges Pfadmodell für Struktur- und Prozesskomplexität inkl. Hypothesen

7.4 Ergebnisse der Untersuchung

Nach vollständiger Spezifizierung der drei Pfadmodelle sowie der Datenerhebung stellt die Schätzung der Pfadkoeffizienten im Strukturmodell und der Ladungen in den Messmodellen den nächsten Schritt dar. Hierfür wird der Partial-Least-Squares-(PLS-)Algorithmus (siehe Anhang B) verwendet, welcher die erklärte Varianz maximiert sowie die unerklärte Varianz minimiert. Die Berechnung erfolgt mithilfe der Software *SmartPLS*. Für den PLS-Algorithmus wird dabei das Pfadgewichtungsschema mit 300 Iterationen und einem Stop-Kriterium von 10^7 eingestellt. Für fehlende Werte wird der paarweise Fallausschluss gewählt, was in diesem Fall jedoch unerheblich war, da alle fehlenden Werte in einem vorgelagerten Schritt bereits durch den EM-Algorithmus ersetzt wurden. Zur Bewertung von Güte und Signifikanz der Modellbestandteile wird außerdem ein Bootstrapping mit 5000 Stichproben und Signifikanzniveau $\alpha = 0,1$ durchgeführt, wobei Vorzeichenänderungen durch die Einstellung *No Sign Changes* ignoriert wurden.

7.4.1 Parameterschätzung

Die Schätzung der Modelle liefert als Ergebnis zum einen die Ladungen zwischen den Indikatoren und Konstrukten. Zum anderen werden die Effekte zwischen den exogenen und endogenen latenten Variablen, das heißt die zu überprüfenden Hypothesen und deren Signifikanz berechnet. Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der Messmodelle und anschließend die Ergebnisse des Strukturmodells im Detail aufgezeigt.

Die Tab. 7.5, Tab. 7.6 und Tab. 7.7 enthalten die Ergebnisse der Schätzung der Messmodelle. Die Koeffizienten zwischen manifesten Variablen und latenten Variablen im reflektiven Modell werden als Ladungen bezeichnet ([Hai14], S. 76). Der P-Wert dient als Indikator für die Signifikanz der jeweiligen Verbindung. Bei den Messmodellen für Produktkomplexität ist zu beobachten, dass alle, außer der Ladung für die Variable Anteil versorgter Fahrzeuge, signifikant bei $\alpha = 0,05$ sind, da der P-Wert kleiner/gleich 0,05 ist. Da der P-Wert mit 0,006 nur minimal über dem geforderten Signifikanzniveau liegt, kann er trotzdem akzeptiert werden.

Tab. 7.5: Schätzergebnisse der Messmodelle für Produktkomplexität

| Latente Variable | Manifeste Variable | Ladung | P-Wert | Signifikanz bei $\alpha = 0,05$? |
|---------------------|-----------------------------|--------|--------|-----------------------------------|
| Produktprogramm | Anzahl_Derivate | 0,910 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_Plattformen | 0,646 | 0,000 | ja |
| | Gesamtvolumen | 0,915 | 0,000 | ja |
| Produktstruktur | Anteil_Nicht-Gleichteile | 0,912 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_SNR | 0,928 | 0,000 | ja |
| Produktlebenszyklus | Anzahl_Anläufe | 0,781 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_Ausläufe | 0,678 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_LCI | 0,710 | 0,000 | ja |
| Versorgungsleistung | Anteil_versorgter_Fahrzeuge | 0,878 | 0,060 | nein |
| | Störungsfreie_Lieferungen | 0,759 | 0,001 | ja |
| Logistikkosten | Inhouse_Kosten | 1,000 | 0,000 | ja |
| Umweltbelastungen | CO2_Ausstoß | 1,000 | 0,000 | ja |
| Lagerhaltung | Reichweite_Lager | 0,928 | 0,000 | ja |
| | Reichweite_Montage | 0,896 | 0,000 | ja |

Auch beim zweiten Modell weist lediglich die Ladung für die Variable Anteil versorgter Fahrzeuge keine Signifikanz bei $\alpha = 0,05$ auf und liegt mit einem P-Wert von 0,08 auch hier nur minimal über dem geforderten Signifikanzniveau und wird daher akzeptiert. Beim dritten Modell, der Struktur- und Prozesskomplexität, sind alle Ladungen bei einem Niveau von $\alpha = 0,05$ signifikant.

Tab. 7.6: Schätzergebnisse der Messmodelle für Netzwerkkomplexität

| Latente Variable | Manifeste Variable | Ladung | P-Wert | Signifikanz bei $\alpha = 0,05$? |
|------------------------|-----------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|
| Lieferantenvielfalt | Anzahl_Lieferanten | 1,000 | 0,000 | ja |
| Re-Sequenzierungen | Anzahl_resequenzierter_TF | 1,000 | 0,000 | ja |
| Lieferantenperformance | Anteil_störungsfreier_Lieferungen | 1,000 | 0,000 | ja |
| Anlieferkonzept | Anzahl_Behälter | 0,768 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_Direktanlieferungen | 0,955 | 0,000 | ja |
| Lieferantenlokation | Lieferantenentfernung | 0,963 | 0,000 | ja |
| | Auslandsquote | 0,936 | 0,000 | ja |
| Transportvolumen | Transportleistung | 0,672 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_eingehender_Transporte | 0,828 | 0,000 | ja |
| Logistikkosten | Inhouse_Kosten | 1,000 | 0,000 | ja |
| Umweltbelastungen | CO2_Ausstoß | 1,000 | 0,000 | ja |
| Lagerhaltung | Reichweite_Lager | 0,942 | 0,000 | ja |
| | Reichweite_Montage | 0,947 | 0,000 | ja |
| Versorgungsleistung | Anteil_versorgter_Fahrzeuge | 0,884 | 0,080 | nein |
| | Störungsfreie_Lieferungen | 0,659 | 0,002 | ja |

Zum Testen der aufgestellten Hypothesen dienen die Koeffizienten zwischen den latenten Variablen, welche als Pfadkoeffizienten bezeichnet werden und auf das Intervall $[0;1]$ bzw. $[-1;0]$ standardisiert sind, wobei 0 keinen Einfluss und 1 bzw. -1 einen starken Einfluss darstellen.

Die Gesamteffekte des Strukturmodells für Produktkomplexität über die vermuteten Zusammenhänge (Hypothesen) zwischen den latenten Variablen sind Tab. 7.8 zu entnehmen. In diesen Ergebnissen sind neben den direkten auch alle mediierenden bzw. indirekte Effekte eingerechnet.

Hypothese 1 bestätigt den positiven Zusammenhang zwischen Produktprogramm und Produktstruktur mit einer Gesamteffektstärke von 0,902, es liegt somit ein starker Zusammenhang vor. Das Produktprogramm stellt das Portfolio an Fahrzeugmodellen dar, welches ein Werk produziert, daher wirkt sich eine Vergrößerung dessen durch beispielsweise die Integration von weiteren Modellen auch direkt auf die Produktstruktur aus, manifestiert durch die Anzahl an Bauteilen oder den Kommunalitätsgrad der Modelle. Hypothese 2 ist mit einem P-Wert von 0,112 nur marginal über dem geforderten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$. Der vermutete Effekt der Produktstruktur auf den Produktlebenszyklus kann zwar nicht bestätigt werden, die Nähe des P-Werts zum geforderten Grenzwert lässt dennoch auf einen vorhandenen statistischen Zusammenhang schließen. Im Gegensatz dazu wird in Hypothese 3 der positive Einfluss des Produktprogramms auf den Produktlebenszyklus eindeutig nachgewiesen. In anderen Worten bedeutet dies: Je mehr Modelle ein Werk produziert, umso mehr Produktanläufe und -ausläufe müssen auch bewerkstelligt werden. Dieser sachlogisch mühelos erklärbare und intuitiv einleuchtende Zusammenhang kann jedoch als Indikator für eine hinreichende Datenqualität aufgefasst werden, da insbesondere solch naheliegende Zusammenhänge statistisch bestätigt werden.

Tab. 7.7: Schätzergebnisse der Messmodelle für Struktur-/Prozesskomplexität

| Latente Variable | Manifeste Variable | Ladung | P-Wert | Signifikanz bei $\alpha = 0,05$? |
|-----------------------|------------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|
| Montagestruktur | Anzahl_Montagehallen | 0,720 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_Montagelinien | 0,730 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_Stockwerke | 0,702 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_Vormontagehallen | 0,689 | 0,000 | ja |
| Logistikstruktur | Anzahl_Externe_Dienstleister | 0,720 | 0,035 | ja |
| | Automatisierungsgrad | 0,720 | 0,027 | ja |
| Produktlinien | Produktlinien_pro_Montagelinie | 1,000 | 0,000 | ja |
| Logistikprozess | Anzahl_Standardversorgungsprozesse | 0,924 | 0,000 | ja |
| | Anzahl_Strukturelemente | 0,611 | 0,000 | ja |
| Produktionsausstoß | Einheiten_pro_Stunde | 1,000 | 0,000 | ja |
| Kumulierter Rückstand | Kumulierter_Rückstand | 1,000 | 0,000 | ja |
| Versorgungsleistung | Anteil_versorgter_Fahrzeuge | 0,951 | 0,000 | ja |
| | Störungsfreie_Lieferungen | 0,776 | 0,003 | ja |

| | | | | |
|----------------|--------------------|-------|-------|----|
| Logistikkosten | Inhouse_Kosten | 1,000 | 0,000 | ja |
| Lagerhaltung | Reichweite_Lager | 0,965 | 0,000 | ja |
| | Reichweite_Montage | 0,968 | 0,000 | ja |

Mit Bezug auf die Auswirkung von Produktkomplexität auf logistische Erfolgsgrößen werden in den Hypothesen 4 bis 7 alle vermuteten Zusammenhänge nachgewiesen. So bewirkt eine Vergrößerung des Produktprogramms eine Minderung in der Versorgungsleistung, d. h. je mehr Modelle, sowohl gemessen an der Verschiedenartigkeit als auch am Volumen, ein Werk produziert, umso fehleranfälliger ist die Teileversorgung durch die Logistik. Interessant ist an dieser Stelle, dass im Hinblick auf die Produktstruktur der Effekt nicht nachgewiesen werden kann. Lediglich eine vermehrte Anzahl an Produktanläufen und -ausläufen scheint einen Effekt auf die Versorgungsleistung zu haben. Bei einem Anlauf müssen sämtliche Versorgungsprozesse und Logistikstrukturen neu geplant werden, was in einer erhöhten Fehleranfälligkeit münden kann, da Mitarbeiter angelernt und Systeme angepasst werden müssen. Eine positive Wirkung hat eine Ausweitung des Produktprogramms auf Logistikkosten und Umweltbelastungen. Der Kostenanstieg ist durch vielzählige Faktoren erklärbar. Zum einen besteht ein erhöhter Mitarbeiterbedarf in der Materialbereitstellung, zum anderen werden mehr Flächen, Läger und Betriebsmittel benötigt. Der Einfluss auf die Umweltbelastungen, gemessen am CO₂-Ausstoß durch die Versorgungslogistik, ist durch das vermehrte Transportaufkommen durch eine Volumen- und Modellausweitung zu begründen. Insgesamt werden somit sieben der fünfzehn Hypothesen durch die Daten bestätigt. Für die verbleibenden Hypothesen sind auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$ keine signifikanten Einflüsse zu beobachten.

Tab. 7.8: Gesamteffekte des PLS-Pfadmodells für Produktkomplexität

| Hypothese (vermuteter Zusammenhang) | Gesamteffekt | P-Wert | Hypothese bestätigt? |
|---|--------------|--------|----------------------|
| H1: Produktprogramm → Produktstruktur | 0,902 | 0,000 | ja |
| H2: Produktstruktur → Produktlebenszyklus | 0,408 | 0,112 | (nein) |
| H3: Produktprogramm → Produktlebenszyklus | 0,692 | 0,000 | ja |
| H4: Produktprogramm → Versorgungsleistung | -0,207 | 0,065 | ja |
| H5: Produktprogramm → Logistikkosten | 0,632 | 0,000 | ja |
| H6: Produktprogramm → Umweltbelastung | 0,321 | 0,000 | ja |
| H7: Produktprogramm → Lagerhaltung | -0,658 | 0,000 | ja |
| H8: Produktstruktur → Versorgungsleistung | -0,138 | 0,760 | nein |

| | | | |
|--|--------|-------|------|
| H9: Produktstruktur → Logistikkosten | 0,484 | 0,207 | nein |
| H10: Produktstruktur → Umweltbelastung | 0,056 | 0,861 | nein |
| H11: Produktstruktur → Lagerhaltung | 0,048 | 0,887 | nein |
| H12: Produktlebenszyklus → Versorgungsleistung | -0,327 | 0,100 | ja |
| H13: Produktlebenszyklus → Logistikkosten | 0,163 | 0,681 | nein |
| H14: Produktlebenszyklus → Umweltbelastung | -0,303 | 0,280 | nein |
| H15: Produktlebenszyklus → Lagerhaltung | 0,129 | 0,450 | nein |

Analog dazu zeigt Tab. 7.9 die Gesamteffekte der Hypothesen für Netzwerkkomplexität. Insgesamt können acht von elf Hypothesen anhand des vorliegenden Datensatzes bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$ bestätigt werden. Zunächst wird ein negativer Zusammenhang zwischen der Lieferantenvielfalt und der Lieferantenperformance attestiert, in anderen Worten: Je mehr Lieferanten ein Werk beliefern, umso geringer ist die Anzahl an störungsfreien Lieferungen in der Versorgungskette, da jeder Akteur im Netzwerk die Wahrscheinlichkeit für eine Störung erhöht. Naheliegend ist daher auch, dass je schlechter die Lieferantenperformance ist, umso schlechter auch die Versorgungsleistung innerhalb der Werks Grenzen ist (Hypothese 26). Darüber hinaus erhöht die Vielfalt der Lieferanten auch die Logistikkosten durch verstärkten Koordinations- und Steuerungsaufwand, was Hypothese 17 mit einer eher geringen Effektstärke von 0,182 zeigt. Wesentlich größer ist jedoch der Einfluss der Anzahl re-sequenzierter Teilefamilien auf die Logistikkosten, da eine Re-Sequenzierung einen äußerst personalintensiven Prozess darstellt. Dies kann statistisch mit einer Effektstärke von 0,442 eindeutig nachgewiesen werden.

Durch Standardisierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wird versucht Logistikkosten zu senken, so auch bei der Auslegung von Behältern. Eine Vereinheitlichung ist jedoch nicht immer möglich, wie etwa bei sehr unterschiedlichen Teilegeometrien. Durch die sortenreine Materialbereitstellung beeinflusst die Anzahl verschiedener Behälter somit die Reichweiten im Lager und an der Montage, was durch Hypothese 20 nachgewiesen wird. Für die latente Variable Transportvolumen kann ein Effekt sowohl auf Kosten, als auch auf die Umweltbelastungen und Lagerhaltung in den Hypothesen 23 bis 25 bestätigt werden. Durch ein vermehrtes Transportaufkommen steigen auch die CO₂-Emissionen sowie Logistikkosten. Lediglich zur Lagerhaltung besteht ein negativer Zusammenhang, die Reichweiten nehmen also durch erhöhtes Transportvolumen ab. Dies kann durch die erhöhte Lieferfrequenz begründet werden, da bei kürzeren Anlieferzyklen und folglich einer kürzeren Wiederbeschaffungszeit der Teile vom Lieferanten weniger Teile im Werk vorgehalten werden müssen.

Tab. 7.9: Gesamteffekte des PLS-Pfadmodells für Netzwerkkomplexität

| Hypothese (vermuteter Zusammenhang) | Gesamteffekt | P-Wert | Hypothese bestätigt? |
|---|--------------|--------|----------------------|
| H16: Lieferantenvielfalt → Lieferantenperformance | -0,304 | 0,092 | ja |
| H17: Lieferantenvielfalt → Logistikkosten | 0,182 | 0,062 | ja |
| H18: Re-Sequenzierungen → Logistikkosten | 0,442 | 0,001 | ja |
| H19: Anlieferkonzept → Logistikkosten | 0,062 | 0,446 | nein |
| H20: Anlieferkonzept → Lagerhaltung | 0,652 | 0,000 | ja |
| H21: Lieferantenlokation → Umweltbelastung | 0,163 | 0,105 | nein |
| H22: Lieferantenlokation → Lagerhaltung | 0,030 | 0,787 | nein |
| H23: Transportvolumen → Logistikkosten | 0,696 | 0,000 | ja |
| H24: Transportvolumen → Umweltbelastung | 0,790 | 0,000 | ja |
| H25: Transportvolumen → Lagerhaltung | -0,425 | 0,008 | ja |
| H26: Lieferantenperformance → Versorgungsleistung | 0,328 | 0,023 | ja |

Im dritten Modell werden sieben von siebzehn vermuteten Zusammenhängen zwischen Struktur- bzw. Prozesskomplexität und logistischen Erfolgsgrößen bestätigt. In Hypothese 28 wird mit einer Gesamteffektstärke von -0,383 der negative Einfluss der Montagestruktur auf die Versorgungssicherheit mit einer Signifikanz von $0,060 < \alpha$ statistisch nachgewiesen. Damit kann davon ausgegangen werden, dass eine komplexere Montagestruktur mit einer hohen Anzahl an Stockwerken, mehreren Montagehallen oder Produktionslinien einen negativen Einfluss auf die Versorgungssicherheit in diesem Werk hat. Insgesamt ist also eine komplexe Montagestruktur fehleranfälliger in der Materialversorgung. Die Montagestruktur hat außerdem einen signifikanten negativen Einfluss auf die Lagerhaltung, welche anhand der Reichweiten gemessen wird (-0,700). Eine Ausweitung der Montagestruktur ist meist durch eine Erhöhung des Produktionsvolumens bedingt. Dadurch steigt der Bedarf an Produktionsmaterial. Lagerflächen und Platz zur Materialbereitstellung an der Montage sind jedoch oftmals sehr begrenzte Ressourcen und können nicht beliebig erweitert werden. Daher kann die Reichweite in der Montage und den Lägern sinken, wenn zusätzliche Montagelinien oder -hallen in bestehende Versorgungsstrukturen integriert werden. Auch Hypothese 36 kann durch diesen Effekt erklärt werden, denn auch durch die Integration neuer Produktlinien in eine bestehende Montagelinie steigen die Materialumfänge und müssen in bestehende Lager- und Bereitstellungsflächen integriert werden. Mit einer negativen Effektstärke

von -0,188 kann dieser Einfluss jedoch als gering eingestuft werden. Dies spiegelt auch die Meinung der Experten wider, die hier keinen bzw. einen nur sehr schwachen Zusammenhang vermuteten. In Hypothese 27 wird der Einfluss der Montagestruktur auf den Logistikprozess bestimmt. Der Gesamteffekt von 0,558 zeigt: Je komplexer die Montagestruktur ist, umso vielfältiger sind auch die materialflusseitigen Verbindungen der verschiedenen Strukturelemente, welche durch Standardversorgungsprozesse realisiert sind.

Tab. 7.10: Gesamteffekte des PLS-Pfadmodells für Struktur-/Prozesskomplexität

| Hypothese (vermuteter Zusammenhang) | Gesamteffekt | P-Wert | Hypothese bestätigt? |
|--|--------------|--------|----------------------|
| H27: Montagestruktur → Logistikprozess | 0,558 | 0,000 | ja |
| H28: Montagestruktur → Versorgungsleistung | -0,383 | 0,060 | ja |
| H29: Montagestruktur → Logistikkosten | -0,005 | 0,981 | nein |
| H30: Montagestruktur → Lagerhaltung | -0,700 | 0,000 | ja |
| H31: Logistikprozess → Versorgungsleistung | -0,072 | 0,571 | nein |
| H32: Logistikprozess → Logistikkosten | 0,140 | 0,523 | nein |
| H33: Logistikprozess → Lagerhaltung | -0,138 | 0,183 | nein |
| H34: Produktlinien → Versorgungsleistung | 0,158 | 0,404 | nein |
| H35: Produktlinien → Logistikkosten | 0,090 | 0,546 | nein |
| H36: Produktlinien → Lagerhaltung | -0,188 | 0,010 | ja |
| H37: Produktionsausstoß → Versorgungsleistung | -0,155 | 0,083 | ja |
| H38: Produktionsausstoß → Logistikkosten | 0,026 | 0,868 | nein |
| H39: Produktionsausstoß → Lagerhaltung | -0,225 | 0,007 | ja |
| H40: Logistikstruktur → Versorgungsleistung | -0,208 | 0,495 | nein |
| H41: Logistikstruktur → Logistikkosten | -0,377 | 0,040 | ja |
| H42: Kumulierter Rückstand → Versorgungsleistung | -0,030 | 0,845 | nein |
| H43: Kumulierter Rückstand → Logistikkosten | 0,091 | 0,567 | nein |

Die Logistikstruktur hat einen signifikanten negativen Einfluss in Höhe von $-0,377$ auf die Logistikkosten, wie Hypothese 41 zeigt. Durch den Einsatz von Automatisierungstechnik in der Materialbereitstellung oder das Outsourcing an externe Dienstleister können Personalkosten gemindert werden. Das heißt, bei einer höheren Anzahl an externen Logistikdienstleistern oder einem höheren Automatisierungsgrad bestätigt das Modell eine Verringerung der internen Logistikkosten. Dies ist ein offensichtlicher und wenig überraschender Zusammenhang, trotzdem werden durch solch scheinbar triviale Erkenntnisse die Modellgüte und auch die Datengrundlage indirekt bestätigt.

Hypothese 37 weist einen negativen Zusammenhang zwischen Produktionsausbringung und Versorgungsleistung nach, mit einer Gesamteffektstärke von $-0,155$. Bei einem höheren Produktionssausstoß, welcher in Einheiten pro Stunde gemessen wird, muss die Teileversorgung zügiger erfolgen. Außerdem kann die verfügbare Bereitstellfläche am Montageband reduziert werden, weshalb auf aufwändigere Versorgungsprozesse wie eine Sequenzierung ausgewichen werden muss. Dies bedeutet mehr Fehleranfälligkeit in der Versorgung, welche sich durch eine Senkung der Versorgungsleistung manifestiert. Auch auf die Reichweiten hat der Produktionsausstoß einen negativen Einfluss ($-0,255$). Dies kann durch die starren und begrenzten Logistikflächen bzw. anhand der Berechnungsformel für Reichweite ($= \text{Bestand/Bedarf}$) begründet werden. Unter der Annahme begrenzter Lagerflächen und somit Bestände führt eine Erhöhung der Bedarfe durch die Zunahme des Produktionsausstoßes zu einer Verringerung der Reichweite. Die restlichen Hypothesen konnten anhand des vorliegenden Datensatzes nicht bestätigt werden.

In Anlehnung an das Vorgehensmodell für Strukturgleichungsmodellierung in Abb. 5.8 werden nach erfolgreicher Schätzung der Pfadmodelle im folgenden Abschnitt die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Güte beurteilt.

7.4.2 Gütebeurteilung

Die Beurteilung der Ergebnisse für die Messmodelle erfolgt bezüglich der Konstrukt-Validität und -Reliabilität. Validität bezeichnet das Ausmaß, „(...) mit dem ein Messinstrument auch das misst, was es messen sollte (...)“, und impliziert damit, ob das Messinstrument gültig bzw. konzeptionell richtig ist ([WM14a], S. 156). Reliabilität misst dagegen „(...) das Ausmaß, mit dem wiederholte Messungen eines Sachverhaltes mit einem Messinstrument auch die gleichen Ergebnisse liefern (...)“ ([WM14a], S. 135).

Für die Gütebeurteilung reflektiver Messmodelle werden die Interne Konsistenzreliabilität (Cronbach's Alpha und Faktorreliabilität) und die Konvergenzvalidität, auch bekannt als Average Variance Extracted (AVE) analysiert ([Hai14], S. 101f.). Mit Cronbach's Alpha wird die Annahme überprüft, dass alle Indikatoren gleich reliabel sind, d. h. gleiche Ladungen auf die latente Variable haben. Für konfirmatorische Analysen eines Messmodells mit mehr als vier Indikatoren gelten Werte ab 0,7 als akzeptabel, für explorative Analysen Werte ab 0,6 ([ECH⁺10], S. 50).

Zunächst erfolgt die Beurteilung der Messmodelle für Produktkomplexität. Da die Konstrukte Logistikkosten und Umweltbelastungen jeweils nur einen Indikator haben, kann ihre Reliabilität nicht beurteilt werden, denn im Falle von nur einem Indikator ist das Cronbach's Alpha immer 1,0. Das Cronbach's Alpha ist für das Messmodell Produktprogramm, Produktstruktur und Lagerhaltung mit 0,719 bzw. 0,815 und 0,923 größer als der Schwellwert von 0,6. Die Konstrukte Produktlebenszyklus und Versorgungsleistung liegen mit 0,547 und 0,519 knapp darunter. Jedoch

ist in diesem Modell die Indikatorenanzahl geringer als für den Schwellwert gefordert. Da das Cronbach's Alpha von der Anzahl der Indikatoren abhängt und mit der Annahme gleicher Ladungen eine eher konservative Beurteilung der Messmodelle darstellt, wird ebenfalls die Faktorreliabilität gemessen ([Hai14], S. 101f.). Die Faktorreliabilität nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei größere Werte für eine bessere Reliabilität sprechen. Werte größer als 0,6 bzw. 0,7 deuten auf ein reliables Messmodell hin ([Hai14], S. 115). Für alle Messmodelle ist die Faktorreliabilität deutlich größer als 0,6. Die Reliabilität ist damit bestätigt.

Die Konvergenzvalidität ist eine Messgröße für die Korrelation eines Indikators mit den anderen Indikatoren des gleichen Konstrukts. Die durchschnittlich extrahierte Varianz (AVE) errechnet sich als Summe der quadrierten Ladungen dividiert durch die Anzahl an Indikatoren. Ein AVE-Wert größer gleich 0,5 bedeutet, dass das Konstrukt mehr als 50 Prozent der Varianz der Indikatoren erklärt und das Messmodell valide ist ([Hai14], S. 103). Auch für die Bestätigung dieses Kriteriums sind alle Voraussetzungen erfüllt, da die AVE für alle Messmodelle größer 0,5 ist. Damit ist schließlich auch die Validität aller Messmodelle für das Teilmodell Produktkomplexität nachgewiesen.

Tab. 7.11: Gütemaße der Messmodelle für Produktkomplexität

| Messmodell | Reliabilität | | Validität |
|---------------------|------------------|--------------------|----------------------------|
| | Cronbach's Alpha | Faktorreliabilität | Average Variance Extracted |
| Produktprogramm | 0,719 | 0,844 | 0,654 |
| Produktstruktur | 0,815 | 0,915 | 0,844 |
| Produktlebenszyklus | 0,547 | 0,767 | 0,525 |
| Versorgungsleistung | 0,519 | 0,676 | 0,609 |
| Logistikkosten | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Umweltbelastungen | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Lagerhaltung | 0,932 | 0,952 | 0,833 |

Für die Beurteilung der Reliabilität der Messmodelle für Netzwerkkomplexität erfüllt lediglich das Transportvolumen mit 0,246 nicht den geforderten Wert von 0,6 beim Cronbach's Alpha. Auch hier ist jedoch die Indikatoren-Anzahl gering und die Faktorreliabilität liegt über dem Grenzwert von 0,6, daher wird das Messmodell für das Transportvolumen dennoch akzeptiert. Die Faktorreliabilität weist auch bei allen anderen latenten Variablen Werte über 0,6 auf und deutet auf reliable Messmodelle hin. Das Kriterium für die Konvergenzvalidität AVE, welches größer als 0,5 sein sollte, ist bei allen Messmodellen für Netzwerkkomplexität erfüllt. Diese Ergebnisse sind in Tab. 7.12 zusammengefasst:

Tab. 7.12: Gütemaße der Messmodelle für Netzwerkkomplexität

| Messmodell | Reliabilität | | Validität |
|------------------------|------------------|--------------------|----------------------------|
| | Cronbach's Alpha | Faktorreliabilität | Average Variance Extracted |
| Lieferantenvielfalt | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Re-Sequenzierungen | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Lieferantenperformance | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Anlieferkonzept | 0,704 | 0,856 | 0,751 |
| Lieferantenlokation | 0,893 | 0,948 | 0,902 |
| Transportvolumen | 0,246 | 0,723 | 0,568 |
| Logistikkosten | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Umweltbelastungen | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Lagerhaltung | 0,880 | 0,943 | 0,893 |
| Versorgungsleistung | 0,659 | 0,812 | 0,759 |

Die Beurteilung der Messmodelle des dritten Teilmodells, Struktur- bzw. Prozesskomplexität, ergibt, wie bei den anderen beiden Modellen, lediglich Abweichungen von den geforderten Schwellwerten beim Cronbach's Alpha. In diesem Fall liegen die Werte für die latenten Variablen Logistikprozess und Logistikstruktur knapp unter 0,6. Diese können aber auch unter Berufung auf obige Argumentation akzeptiert werden.

Tab. 7.13: Gütemaße der Messmodelle für Struktur-/Prozesskomplexität

| Messmodell | Reliabilität | | Validität |
|--------------------|------------------|--------------------|----------------------------|
| | Cronbach's Alpha | Faktorreliabilität | Average Variance Extracted |
| Montagestruktur | 0,699 | 0,803 | 0,505 |
| Logistikprozess | 0,415 | 0,753 | 0,614 |
| Produktlinien | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Logistikstruktur | 0,571 | 0,683 | 0,518 |
| Produktionsausstoß | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

| | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| Kumulierter Rückstand | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Logistikkosten | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Lagerhaltung | 0,929 | 0,966 | 0,933 |
| Versorgungsleistung | 0,703 | 0,858 | 0,753 |

Es ist somit festzuhalten, dass alle Messmodelle hinsichtlich Reliabilität und Validität überprüft wurden und akzeptiert werden können, da lediglich vereinzelt Abweichungen beim Cronbach's Alpha auftreten, welches ein konservatives Kriterium darstellt, und gleichzeitig auch die Faktorreliabilität zur Beurteilung der Reliabilität der Messmodelle herangezogen wird.

Der zweite Teil der Gütebeurteilung im Rahmen von Strukturgleichungsmodellen besteht aus der Gütebeurteilung der Strukturmodelle bzw. ihrer Vorhersagegenauigkeit. Dazu dienen in einem ersten Schritt die Vorzeichen sowie die Höhe und das Signifikanzniveau der Pfadkoeffizienten. Hierbei verfolgen *Gießmann und Lasch* die folgenden Kriterien: Das Vorzeichen soll den Vorüberlegungen entsprechend korrekt sein und die Gesamteffekte $\geq |0,2|$ sein ([GL10a], S. 173). Zur Beurteilung der Vorhersagegenauigkeit des Modells wird das Bestimmtheitsmaß R^2 untersucht. Dieses errechnet sich aus der quadrierten Korrelation zwischen tatsächlichem und geschätztem Wert eines endogenen Konstrukts und kennzeichnet damit den Anteil der durch die exogenen Konstrukte erklärten Varianz. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Maß für den Anteil der Varianz der abhängigen Variablen, welche durch die unabhängigen Variablen erklärt wird. Das Bestimmtheitsmaß R^2 kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei größere Werte einen höheren Anteil der erklärten Varianz anzeigen und eine bessere Vorhersagegenauigkeit bedeuten ([Hai14], S. 174). Die R^2 -Werte der untersuchten Strukturgleichungsmodelle sind in Tab. 7.14, Tab. 7.15 und Tab. 7.16 gelistet. Es existiert kein allgemeiner Richtwert für die Größe eines akzeptablen R^2 -Wertes bei Strukturgleichungsmodellen, weshalb dessen Definition in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsgebiet steht. Nach Chin können bereits R^2 -Werte ab 0,19 akzeptiert werden ([Chi98], S. 323).

Die R^2 -Werte für Produktkomplexität zeigen, dass die Produktstruktur mit einer erklärten Varianz von 81,4 % ($R^2 = 0,814$) am besten bestimmt wird. Lediglich das endogene Konstrukt Umweltbelastungen liegt leicht unter dem Grenzwert. Die Betrachtung der Vorzeichen der Gesamteffekte in Tab. 7.8 zeigt, dass alle entsprechend den Vorüberlegungen in den Hypothesen korrekt sind. Auch die Gesamteffektstärken liegen alle über dem geforderten Wert von $|0,2|$.

Tab. 7.14: Bestimmtheitsmaß der endogenen Konstrukte für Produktkomplexität

| Endogenes Konstrukt | R^2 |
|---------------------|-------|
| Produktstruktur | 0.814 |
| Produktlebenszyklus | 0,509 |
| Versorgungsleistung | 0,413 |

| | |
|-------------------|-------|
| Logistikkosten | 0,456 |
| Umweltbelastungen | 0,148 |
| Lagerhaltung | 0,441 |

Bei Betrachtung des Teilmodells für Struktur-/Prozesskomplexität in Tab. 7.15 fällt auf, dass die endogenen Variablen sehr gut durch ihre vorgelagerten exogenen Variablen erklärt werden. Lediglich das R^2 der Versorgungsleistung liegt leicht unter dem gewünschten Wert. Dieser niedrige Wert kann dadurch erklärt werden, dass der Versorgungsleistung im Pfadmodell nur zwei signifikante Effekte zugeordnet werden können. Dadurch liefern die exogenen Konstrukte weniger Erklärungswert für das latente Konstrukt Versorgungsleistung. Die Vorzeichenbetrachtung ergibt auch hier eine Übereinstimmung mit den vermuteten Wirkzusammenhängen in den signifikanten Hypothesen. Lediglich die Effektstärken der Hypothesen 36 (Produktlinien haben einen negativen Effekt auf die Lagerhaltung) und 37 (Der Produktionsausstoß hat einen negativen Effekt auf die Versorgungsleistung) liegen mit -0,188 bzw. -0,155 marginal unter dem Grenzwert von |0,2|.

Tab. 7.15: Bestimmtheitsmaß der endogenen Konstrukte für Struktur-/Prozesskomplexität

| Endogenes Konstrukt | R^2 |
|---------------------|-------|
| Logistikprozess | 0,312 |
| Logistikkosten | 0,198 |
| Lagerhaltung | 0,577 |
| Versorgungsleistung | 0,149 |

Das Modell für die Netzwerkkomplexität bestätigt auch die in den Hypothesen formulierten Vorzeichen der Gesamteffekte, ersichtlich in Tab. 7.9. Bei Betrachtung der Effektstärken fällt auf, dass lediglich Hypothese 17 mit einem schwachen Effektwert von 0,182 leicht unter die Akzeptanzgrenze von 0,19 fällt. Die R^2 -Werte in Tab. 7.16 zeigen, dass die Logistikkosten mit einer erklärten Varianz von 84,2 % ($R^2 = 0,842$) das höchste Bestimmtheitsmaß haben, wohingegen die Versorgungsleistung auch hier den niedrigsten Wert aufweist.

Insgesamt kann auch die Güte der Strukturmodelle als zufriedenstellend betrachtet werden. Da es sich im vorliegenden Fall um ein recht komplexes Strukturgleichungsmodell handelt, ist mit niedrigeren Werten des Bestimmtheitsmaßes zu rechnen. In ähnlichen Untersuchungen werden sogar Werte von weniger als 0,19 akzeptiert (vgl. [Deh01], S. 196ff.). Die Validität der Teilmodelle wird vor allem auch dadurch gewährleistet, dass die Modellentwicklung in enger Zusammenarbeit mit Experten durchgeführt wurde. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die verwendeten Indikatoren sowohl für die Operationalisierung der Konstrukte relevant sind als auch vollständig erfasst wurden ([GL10a], S. 175).

Tab. 7.16: Bestimmtheitsmaß der endogenen Konstrukte für Netzwerkkomplexität

| Endogenes Konstrukt | R ² |
|---------------------|----------------|
| Umweltbelastungen | 0,540 |
| Logistikkosten | 0,842 |
| Lagerhaltung | 0,603 |
| Versorgungsleistung | 0,178 |

7.5 Fazit zur kausalanalytischen Untersuchung

Anhand deskriptiver und explorativer Analysen mit Hilfe von Daten eines Premium OEM stellte sich heraus, dass hohe Korrelationen zwischen den Treibern von Logistikkomplexität und logistischen Kennzahlen vorhanden sind. In einer anschließenden Strukturgleichungsanalyse bestätigten sich viele der angenommenen kausalen Zusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg, ebenso wie zwischen den Komplexitätstreibern.

Im Bereich der Produktkomplexität stellte sich heraus, dass das Produktprogramm (Anzahl Derivate, Gesamtvolumen und Anzahl Plattformen) einen direkten Einfluss auf alle betrachteten Komponenten des Logistikerfolgs, Versorgungsleistung, Logistikkosten, Umweltbelastung und Lagerhaltung, hat. Den größten Einfluss hat das Produktprogramm aber auf die Logistikkosten sowie die Lagerhaltung. Demnach bewirkt eine Veränderung im Produktprogramm, beispielsweise durch die Integration eines neuen Modells, eine Verschlechterung seitens der Logistikkennzahlen. Wird eine Ausweitung der Modellpalette und zunehmende Individualisierung der Fahrzeuge vom Markt gefordert, so führt sie innerhalb der Logistik zu bemerkenswerten Veränderungen in den Leistungsmessgrößen. Entgegen der Vermutung der Experten konnte der Einfluss der Produktstruktur (Kommunalitätsgrad und Anzahl SNR) nicht bestätigt werden. Lediglich beim Produktlebenszyklus konnte noch ein Effekt auf die Versorgungsleistung beobachtet werden.

Bei der Netzwerkkomplexität konnten insgesamt acht von elf Hypothesen bestätigt werden. Die Hypothesen, die einen Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Lieferantentfernung und den logistischen Erfolgsgrößen vermuten lassen, können im Rahmen dieser Analyse nicht bestätigt werden. Die ursprüngliche Annahme der Experten, dass der Trend zum Global Sourcing und zu steigenden Transportentfernungen sich auf die Logistikkomplexität auswirkt, kann durch die vorliegenden Daten nicht bestätigt werden. Hervorzuheben ist jedoch, dass vor allem die Hypothesen, die einen Einfluss auf die Kosten annehmen, alle bestätigt werden konnten. In diesem Zuge ist besonders der starke Einfluss der Re-Sequenzierungen und des Transportvolumens auf die Kosten zu erwähnen. Ebenso bestätigt das SGM die Verbindung der gestiegenen Transportleistung mit den ansteigenden CO₂-Emissionen und zeigt auf, dass die Inbound-Umfänge der Materialversorgung ein Optimierungspotenzial darstellen. Die Wechselwirkungen zwischen Lieferstörungen durch Lieferanten und der internen Materialversorgung werden verdeutlicht. Die praktizierte Strategie der Risikostreuung durch die Auswahl mehrerer Lieferanten wird im Modell belegt.

Die strukturelle Logistikkomplexität wird vor allem durch die strukturellen Gegebenheiten eines Montagewerkes definiert. Ein besonders starker Effekt konnte im Modell zwischen der Montagestruktur und der Versorgungsleistung nachgewiesen werden. Vor allem Brownfield-Werke mit vielen Stockwerken und verteilten logistischen Strukturelementen sind somit fehleranfälliger in der Materialversorgung. Einen signifikanten Einfluss auf die Logistikkosten hat laut Modell nur der Einsatz von Automatisierung und Outsourcing an externe Logistikdienstleister, da hier Personalkosten gemindert werden können.

Der Fokus der Strukturgleichungsanalyse lag auf der Aufdeckung und Untersuchung von vermuteten Zusammenhängen zwischen Komplexitätsindikatoren und Logistikkennzahlen, welche in enger Zusammenarbeit mit Experten formuliert wurden. Wie in einer empirischen Untersuchung üblich, konnte ein Teil der Hypothesen bestätigt werden. Im folgenden Teil der Analyse werden nun die Beziehungen zwischen den Komplexitätstreibern untersucht, um jene Treiber zu identifizieren, welche die größten Ansatzpunkte für ein effizientes Komplexitätsmanagement bieten.

7.6 Ermittlung der Beziehungen zwischen den Komplexitätstreibern

Nachdem nun eindeutige Zusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikleistung festgestellt wurden, stellt sich in einem zweiten Schritt die Frage welche Elemente das größte Optimierungspotenzial im Rahmen eines Komplexitätsmanagements aufweisen. Dabei ist die Kenntnis derjenigen Einflussfaktoren, welche die stärksten Auswirkungen auf ein System aufweisen eine zentrale Herausforderung. Durch Konzentration auf die einflussreichsten Treiber kann im Zuge eines Komplexitätsmanagement eine Verschwendung von Ressourcen vermieden werden (vgl. [Bog10], S. 155).

Nach *Lindemann* ist es sinnvoll, Wirkzusammenhänge zwischen Systemelementen in einer Matrix darzustellen ([Lin09], S. 74f.). In einer sogenannten Einflussmatrix¹¹ bzw. Design Structure Matrix (DSM) werden die zu untersuchenden Elemente aufgelistet und einander gegenübergestellt [Bro]. In dieser Matrix können dann die Relationen zwischen den Elementen qualitativ oder quantitativ eingetragen werden, wodurch eine Analyse der Zusammenhänge möglich ist. Dabei geht die Richtung der Einflussstärke von Zeile nach Spalte. Aus der Einflussmatrix kann dann entsprechend der Richtung der Einflussstärke abgeleitet werden, ob die jeweiligen Elemente eine passive oder aktive Rolle im System spielen. Passive Elemente werden von anderen Elementen beeinflusst, wohingegen die aktiven Elemente selbst andere Elemente beeinflussen. Dabei ist es üblich, dass das Element einer Zeile die Elemente der Spalten beeinflusst ([Lin09], S. 74ff.). Aus den in der Matrix eingetragenen Werten kann jeweils die Aktivsumme (Summe über Zeilen) und die Passivsumme (Summe über Spalten) gebildet werden ([Mau07], S. 199; [Rei92], S. 35f.). Liegt eine negative Einflussstärke zwischen zwei Elementen vor, muss bei der Berechnung der Aktiv- und Passivsummen der Betrag der Einflussstärke verwendet werden. Dabei bezeichnet die Aktivsumme das Maß, mit dem der Einfluss eines Elementes auf die weiteren Elemente gemessen

¹¹ Für den Begriff Einflussmatrix wird oft Vernetzungsmatrix synonym verwendet (vgl. [Rei92], S. 35f.).

werden kann. Dementsprechend kann der Einfluss auf ein Element von den restlichen Elementen als Passivsumme bezeichnet werden ([Mau07], S. 123f.). Eine hohe Aktivsumme bedeutet somit, dass ein einzelnes Element bei Veränderungen im System hohe Auswirkungen auf die anderen Elemente hat und somit geeignet ist, um Optimierungen vorzunehmen ([Lin09], S. 76ff.). Die Aktivität eines Elementes bezeichnet den Quotienten aus Aktiv- und Passivsumme. Dieser gibt das Verhältnis an, in dem ein Element Einfluss auf die Veränderungen in Systemen nimmt ([Mau07], S. 123f.). Ein Element mit hoher Aktivität hat einen hohen Einfluss auf das System und eignet sich somit, um Veränderungen im System anzustoßen. Weist ein Systemelement hingegen eine geringe Aktivität auf, können Änderungen an diesem Element vorgenommen werden, ohne dass sich das System dadurch wesentlich verändert. Um aus diesen Werten die kritischsten Elemente ermitteln zu können, muss nach *Lindemann* die Kritikalität berücksichtigt werden ([Lin09], S. 75ff.). Diese beschreibt das Produkt aus Aktiv- und Passivsumme und stellt somit dar, inwieweit ein Element von Veränderungen im System betroffen ist bzw. selbst eine Veränderung des Systems hervorruft ([Mau07], S. 124f.). Elemente mit hoher Kritikalität werden kritische Elemente genannt und sind stark ins Netzwerk eingebunden, sogenannte träge Elemente weisen hingegen eine geringe Kritikalität auf ([Lin09], S. 75ff.). Träge Elemente, die sowohl eine Aktiv- als auch eine Passivsumme von null aufweisen, werden isolierte Elemente genannt, da sie weder Einfluss auf das System nehmen noch von diesem beeinflusst werden.

Um eine eindeutige und übersichtliche graphische Darstellung von Systemelementen erstellen zu können, wird das sogenannte Einflussportfolio nach *Maurer* und *Lindemann* betrachtet [Mau07]; [Lin09]. Bei diesem Einflussportfolio werden zunächst die Systemelemente in ein Koordinatensystem mit den Achsen Aktiv- und Passivsumme eingetragen. Nach der Definition der Aktivität der Elemente liegen jene, die die gleiche Aktivität aufweisen, auf einer Ursprungsgeraden. Es gilt: Je größer die Aktivität ist, desto geringer ist die Steigung dieser Geraden. Für die Kritikalität gilt:

$$\text{Kritikalität} = \text{Aktivsumme} * \text{Passivsumme} \quad (7.2)$$

Aus dieser Funktion lässt sich die entsprechende Hyperbel-Funktion ableiten, somit gilt:

$$\text{Passivsumme} = \text{Kritikalität} / \text{Aktivsumme} \quad (7.3)$$

Dabei gilt: Je höher die Kritikalität eines Elements, desto weiter entfernt vom Ursprung liegt die jeweilige Hyperbel (vgl. Abb. 7.9: Einflussportfolio).

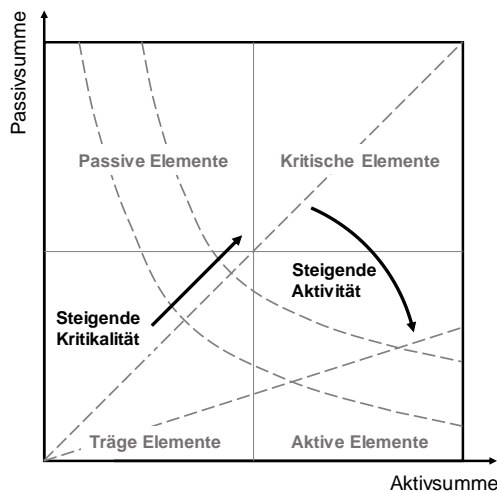


Abb. 7.9: Einflussportfolio nach Lindemann ([Lin09], S. 77)

Die sogenannten kritischen Elemente im oberen rechten Quadranten des Portfolios sind demnach stark vernetzt und haben sowohl eine hohe Aktiv- als auch eine hohe Passivsumme. Die kritischen Elemente spielen eine sehr große und wichtige Rolle im Gesamtsystem, da sie einen großen Einfluss auf dieses ausüben. Daher sollten diese Elemente zuerst auf mögliche Optimierungspotenziale geprüft

werden, da sich daraus der größtmögliche Erfolg ableiten lässt ([Rei92], S. 38ff.). Anschließend sollten die aktiven Elemente betrachtet werden, die im Einflussportfolio im unteren rechten Quadranten angeordnet sind. Diese beiden Kategorien werden oft auch Schlüsselfaktoren genannt [Lin09]. Die passiven Elemente im oberen linken Quadranten werden lediglich stark beeinflusst, beeinflussen andere Elemente aber nur marginal. Daher sollten sie zwar bei Veränderungen im System berücksichtigt werden, spielen aber keine entscheidende Rolle im Prozess. Die trägen Elemente hingegen, die im unteren linken Quadranten positioniert sind, können im Planungsprozess meist gänzlich vernachlässigt werden, da sie kaum vernetzt sind und somit keinen erheblichen Einfluss auf das System haben.

7.6.1 Erstellung eines Einflussportfolios

Durch die Erstellung des eben vorgestellten Einflussportfolios kann nun die Frage beantwortet werden, welche der Komplexitätstreiber direkt auf die ausgewählten Zielkriterien wirken und von welchen anderen Faktoren diese ihrerseits beeinflusst werden [UP95]. Durch die Analyse von direkten und indirekten Vernetzungen im System können potenzielle Erfolgsfaktoren im Rahmen eines Komplexitätsmanagements identifiziert werden (vgl. [Dre97], S. 145). Aus der Kenntnis der kritischen Komplexitätstreiber kann folglich abgeleitet werden, welche Treiber beherrscht werden müssen, um die Gesamtkomplexität in der Logistik zu reduzieren und somit den Logistikerfolg zu maximieren. Hierfür werden die Komplexitätstreiber einander zunächst in einer Einflussmatrix gegenübergestellt und ihre Beziehungen in einem paarweisen Vergleich bewertet. Dabei werden in einem Expertenworkshop die kausalen Zusammenhänge der Treiber betrachtet und mit Werten zwischen 1 (schwache Einflussstärke) und 3 (starke Einflussstärke) qualitativ beurteilt. Aus diesem paarweisen Vergleich ergibt sich die in Abb. 7.10 dargestellte Einflussmatrix. Zur Ergebnisauswertung wird die Einflussmatrix in das Softwaretool *cmt* eingelesen. Dort wird

diese ausgewertet und die Aktiv- und Passivsummen sowie Aktivität und Kritikalität der einzelnen Komplexitätstreiber berechnet [HBF16]. Die Ergebnisse finden sich in den rechten Spalten von Abb. 7.10. Der kritischste Treiber ist demnach die Anzahl SNR mit einer Kritikalität von 150. Um die weiteren kritischen Treiber zu identifizieren und auch aktive, passive und träge Treiber zuordnen zu können, wird anschließend ein Einflussportfolio dieser Treiber erstellt. Dabei wurden die Standardwerte¹² der Hyperbelfaktoren und des Quadratfaktors in *cmt* zur Auswertung verwendet.

| Treiber | Anzahl SNR | Anzahl Anläufe | Anzahl Ausläufe | Anzahl LCI | Anzahl Derivate | Gesamtvolumen | Anzahl Plattformen | Anzahl Nicht-Gleichteile | Einheiten pro Stunde | Anzahl Stockwerke | Automatisierungsgrad | Anzahl externe Dienstleister | Anzahl Strukturelemente | Anzahl Montagehallen | Anzahl Vormontagehallen | Kumulierter Rückstand | Anzahl Montagelinien | Anzahl Standardversorgungsprozesse | Anzahl Lieferanten | Anzahl Resequenzen | Durchschn. Lieferantenentfernung | Transportleistung je Werk | Auslandsquote | Lieferantenperformance | Anzahl Lieferanten für DAL | Behälteranzahl | Aktivsumme | Aktivität | Kritikalität |
|------------------------------------|------------|----------------|-----------------|------------|-----------------|---------------|--------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------|------------------------|----------------------------|----------------|------------|-----------|--------------|
| Anzahl SNR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | 0,67 | 150 |
| Anzahl Anläufe | 2 | | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21 | ∞ | 0 |
| Anzahl Ausläufe | 2 | | | 3 | 3 | 1 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 13 | 4,33 | 39 | |
| Anzahl LCI | 2 | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 6 | 2 | 18 | |
| Anzahl Derivate | 3 | | | | | 3 | 2 | 3 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 21 | 3,5 | 126 | |
| Gesamtvolumen | | | | | | | | | 3 | | | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | 10 | 1,11 | 90 | |
| Anzahl Plattformen | 3 | | | | | | | 3 | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | 11 | 2,75 | 44 | |
| Anzahl Nicht-Gleichteile | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | 0,21 | 42 | |
| Einheiten pro Stunde | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0,33 | 3 | |
| Anzahl Stockwerke | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | 3 | ∞ | 0 | |
| Automatisierungsgrad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| Anzahl externe Dienstleister | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| Anzahl Strukturelemente | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | 4 | 0,5 | 32 | |
| Anzahl Montagehallen | | | | | | | | | | | | | | 2 | 2 | | | | | | | | | | | 7 | 2,33 | 21 | |
| Anzahl Vormontagehallen | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 4 | 4 | 4 | |
| Kumulierter Rückstand | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | ∞ | 0 | |
| Anzahl Montagelinien | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 | 1,25 | 20 | |
| Anzahl Standardversorgungsprozesse | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| Anzahl Lieferanten | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 9 | 1,8 | 45 | |
| Anzahl Resequenzen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | 0,6 | 15 | |
| Durchschn. Lieferantenentfernung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 | 0,83 | 30 | |
| Transportleistung je Werk | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| Auslandsquote | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | 1,5 | 6 | |
| Lieferantenperformance | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| Anzahl Lieferanten für DAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| Behälteranzahl | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | |
| Passivsumme | 15 | 0 | 3 | 3 | 6 | 9 | 4 | 14 | 3 | 0 | 1 | 3 | 8 | 3 | 1 | 0 | 4 | 18 | 5 | 5 | 6 | 8 | 2 | 8 | 6 | 3 | | | |

Abb. 7.10: Einflussmatrix der Komplexitätstreiber nach paarweisem Vergleich (nach [HBF16], S. 8)

Im Einflussportfolio in Abb. 7.11 sind die kritischen Treiber in rot, die aktiven Treiber in grün, die passiven Treiber in hellblau und die trägen Treiber in dunkelblau markiert worden. Wie in der Einflussmatrix zu erkennen ist, sind die drei kritischen Komplexitätstreiber Anzahl SNR, Anzahl Derivate und Gesamtvolumen mit den Kritikalitäten 150, 126 und 90. Da diese Treiber den höchsten Vernetzungsgrad im Gesamtsystem aufweisen, können sie als wichtigste „Stellschrauben“ für die Optimierung der Logistikkomplexität identifiziert werden. Wie auch im Einflussportfolio in Abb. 7.11 zu erkennen ist, sind diese Komplexitätstreiber mit Abstand die am stärksten beeinflussenden bzw. beeinflussten Treiber im System. Dabei kann dem Portfolio sowie der Matrix entnommen werden, dass die Anzahl Derivate als Treiber mit der höchsten Aktivsumme vor allem eine beeinflussende Rolle im Gesamtsystem spielt. Die Anzahl SNR besitzt hingegen lediglich

¹² Hyperbelfaktor kritische Daten: 0,4; Hyperbelfaktor aktive/passive Daten: 0,22; Quadratfaktor träge Daten: 0,25.

eine hohe Passivsumme und eine mittlere Aktivsumme und wird somit mehr vom System beeinflusst, als dass sie selbst Einfluss nimmt. Das Gesamtvolumen weist sowohl für die Aktiv- als auch die Passivsumme mittlere Werte auf und ist demnach gleichmäßig in das Netzwerk eingebunden. Die beiden passivsten Treiber sind die Anzahl Standardversorgungsprozesse und die Anzahl Nicht-Gleichteile mit Passivsummen von 18 und 14, die demnach am stärksten vom System beeinflusst werden. Zu den trägen Treibern zählen bspw. die Taktzeit, der Automatisierungsgrad, die Behälteranzahl und der kumulierte Rückstand. Dabei muss für den kumulierten Rückstand noch die Besonderheit als isolierter Treiber hervorgehoben werden, da er vom Gesamtsystem unabhängig ist und somit eine Aktiv- und Passivsumme von 0 aufweist. Hieraus kann geschlossen werden, dass der kumulierte Rückstand in diesem Fall nicht relevant ist, um Komplexität reduzieren zu können. Aus den gewonnenen Erkenntnissen über die Beziehungen zwischen den Komplexitätstreibern und ihr Beeinflussungspotenzial im Gesamtsystem können nun Ableitungen für das Komplexitätsmanagement getroffen werden.

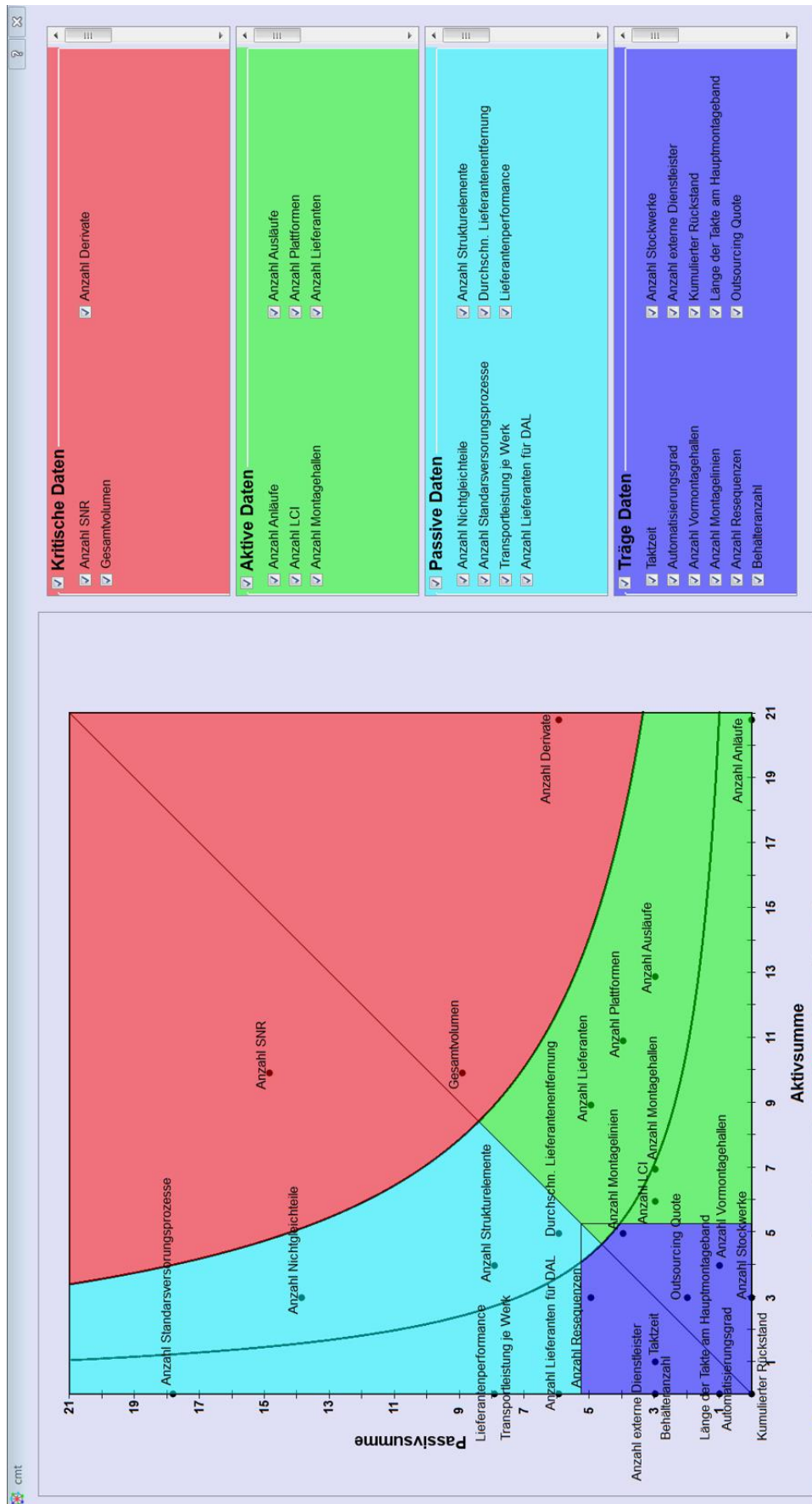


Abb. 7.11: Einflussportfolio der Komplexitätstreiber (nach [HBF16], S. 9)

7.6.2 Implikationen für das Komplexitätsmanagement

Nachdem die Analyse des Systems durchgeführt worden ist, geht es jetzt darum, die spezielle Systemdynamik nicht nur zu erkennen, sondern sie für konkrete Aktivitäten, Strategien und Maßnahmen usw. zu nutzen. Die größte Verstärkerwirkung im System erreicht man, wenn man versucht, die Verhaltensweisen und Beeinflussungsarten der Elemente im aktiven Bereich so zu nutzen, dass sie den eigenen Zielen und Strategien entsprechen. Die Grundregel der Systemdynamik besagt daher, dass der Hebel im System dort anzusetzen ist, wo die größte Verstärkerwirkung erzielt werden kann. Dies wird in der Regel durch die aktiven Systemelemente erreicht ([Rei92], S. 36ff.)

Wie aus der Einflussmatrix und dem Einflussportfolio zu entnehmen ist, sind Anzahl Derivate, Anzahl SNR und Gesamtvolumen die kritischen Treiber, welche die größte Veränderung im Gesamtsystem hervorrufen können. Um eine Optimierung des Logistikerfolgs zu erzielen, sollten sie demnach als erstes auf Potenziale überprüft werden, da eine Optimierung dieser Treiber zu Verbesserungen der von ihnen beeinflussten Treiber führen wird. Dennoch ist dabei zu beachten, dass diese Treiber ebenfalls von vielen anderen Treibern stark beeinflusst werden, wodurch die Anpassung eingeschränkt wird. Wird z. B. die Anzahl der produzierten Derivate in einem Werk reduziert, sinken automatisch die Anzahl der Bauteile, das Gesamtvolumen, die Anzahl der Nicht-Gleichteile oder auch die Anzahl der Lieferanten. Eine Senkung dieser Treiber ist allerdings nicht immer sinnvoll, da etwa durch eine Reduzierung des Gesamtvolumens weniger Fahrzeuge produziert und somit auch verkauft werden, wodurch zwar Kosten gesenkt werden, der Umsatz aber gleichzeitig auch abnimmt. Daher ist es zweckmäßig, auch die aktiven Treiber auf mögliche Potenziale zu überprüfen, bevor endgültige Entscheidungen getroffen werden.

Aktive Treiber, die anhand ihrer Aktivsumme und Aktivität einen großen Einfluss auf das Gesamtsystem haben, sind im vorliegenden Fall die Anzahl Anläufe, Anzahl Ausläufe, Anzahl Plattformen und die Anzahl Lieferanten (vgl. Abb. 7.10 und Abb. 7.11). Sie weisen Aktivsummen von 21, 13, 11 und 9 auf sowie Aktivitäten von ∞ , 4,33, 2,75 und 1,8 und nehmen demzufolge großen Einfluss auf das Gesamtsystem. Daher sollten die als besonders aktiv identifizierten Treiber bei der Planung neuer Werke am Anfang des Planungsprozesses betrachtet werden, um frühzeitig Potenziale zur Komplexitätsreduzierung auszuschöpfen. Wird nun bspw. die Anzahl der Plattformen innerhalb eines Werkes reduziert, sinkt demzufolge die Anzahl der unterschiedlichen Bauteile, die Anzahl der Nicht-Gleichteile, die Anzahl der benötigten Montagelinien und somit auch die Anzahl der Montagehallen. Durch diesen Ansatz können die Logistikkosten enorm gesenkt werden, wobei gleichzeitig weitere Auswirkungen z. B. auf das produzierbare Gesamtvolumen zu berücksichtigen sind.

Mit Passivsummen von 18 und 14 werden die Anzahl Standardversorgungsprozesse und die Anzahl Nicht-Gleichteile demnach am stärksten vom System beeinflusst. Die Tatsache, dass ein Einflussbereich passiv ist, bedeutet noch lange nicht, dass dieser Bereich unwichtig ist. Passiv bedeutet lediglich, dass er sich im Zusammenspiel mit anderen Systemelementen anders verhält und mehr Einflüsse absorbiert, als er selber beeinflussen kann. Da diese Elemente von allen anderen im System abhängig sind, sollte versucht werden, passive Elemente nicht nur direkt, sondern vor allem auch indirekt über die aktiven Elemente zu beeinflussen ([Rei92], S. 36ff.). Im vorliegenden Anwendungsfall werden die Anzahl Standardversorgungsprozesse vor allem durch

die Anzahl an logistischen Strukturelementen beeinflusst. Dies kann bei der Planung von zentralen Logistikstrukturen eines Greenfield-Werks berücksichtigt werden, um so die verschiedenen Versorgungsprozesse zu reduzieren.

Neben der Konzentration auf jene Elemente mit der größten Hebelwirkung, um eine möglichst große Wirkung zu erzielen, ist es weiterhin empfehlenswert, einen Maßnahmen-Mix zur Steuerung und Verstärkung der für das Unternehmen wichtigen Elemente zu erarbeiten. Nach *Reibnitz* bedeutet dies, „dass man parallel zum Ankoppeln der eigenen Strategie an die dynamischsten Elemente im System gleichzeitig flankierende Maßnahmen einleiten muss (...), die als Unterstützung für die Hebelwirkung wichtig sind“ ([Rei92], S. 41).

8 Modellbasierte Methodik zur Komplexitätsbewertung in Montagelogistiksystemen

Im folgenden Kapitel wird, basierend auf den vorausgegangenen Untersuchungen, eine Methodik zur Bewertung von Komplexität in der Montagelogistik entwickelt. Das Ziel ist ein ganzheitlicher Ansatz auf strategischer Ebene, durch dessen Anwendung Transparenz hinsichtlich der Logistikkomplexität eines Montagewerks geschaffen werden kann, aber auch Handlungsempfehlungen zur Handhabung bzw. Reduzierung von Komplexität gegeben werden können. Außerdem können interessante Fragestellungen beantwortet werden, bspw. wie sich die Produktkomplexität in einem Werk verändert, wenn neue Derivate oder Modellvarianten einem Produktionsprogramm hinzugefügt werden bzw. entfallen [WBA06]. Als Grundlage für die Bewertungsmethodik dienen die im vorherigen Kapitel ermittelten Zusammenhänge zwischen den komplexitätssteigernden Faktoren und den logistischen Erfolgsgrößen, welche als Gewichtungsfaktoren für die jeweiligen Komplexitätstreiber in die Bewertung einfließen. Eine grundsätzliche Anforderung besteht in der vereinheitlichten Skalierung der Komplexitätsdimensionen, weshalb eine Systematik zur vereinheitlichten Ausprägungsbeschreibung der Treiber erarbeitet wird.

Da das Verhalten des Systems der Montagelogistik hinsichtlich seiner Komplexität modelliert und bewertet werden soll, wird hierzu zunächst der Modellbegriff im folgenden Abschnitt erläutert.

8.1 Modellbegriff

Reale Systeme zu analysieren ist nur selten durch eine reine Beobachtung möglich und zielführend ([Bos92], S. 27), da diese nach *Malik* durch eine Vielzahl an Elementen, Relationen und Zuständen charakterisiert sind (siehe Abschnitt 3.2). Aus diesem Grund ist es normalerweise unmöglich, die Komplexität der Realität vollständig aufzunehmen bzw. zu beschreiben. Modelle werden demnach mit dem Ziel verwendet, trotzdem neue Einblicke über reale Zusammenhänge zu gewinnen ([Kel77], S. 3 f.). Somit abstrahieren Modelle Systeme und Prozesse, wobei eine Beschränkung auf wesentliche Systemeigenschaften anzustreben ist ([Grü04], S. 53).

Somit ist die Modellierung ein fundamentales Element bei der Untersuchung realer Systeme. Vor diesem Hintergrund gilt es zunächst eine einheitliche Definition für den Terminus Modell zu erarbeiten, da der Begriff in Theorie und Praxis zwar oft verwendet und interdisziplinär eingesetzt wird, aber keine allgemeingültige Begriffsdefinition vorliegt ([KFG02], S. 32; [Wer07], S. 70). *Keller* verwendet und definiert den Modellbegriff explizit im naturwissenschaftlichen Kontext, daher wird in der vorliegenden Arbeit dessen Begriffsverständnis verwendet. Demnach besteht Modellbildung darin, die Realität durch (Teil-)Abbildungen zu rekonstruieren ([Kel77], S. 4).

In dieser Arbeit wird ein realwissenschaftlicher Modellbegriff verwendet. Dieser fokussiert sich auf faktisch überprüfbare Beschreibungen, Erklärung und die Gestaltung von empirisch wahrnehmbaren Ausschnitten der Wirklichkeit ([Mot09], S. 8). Modelle zeichnen sich dadurch

aus, dass sie drei konstituierende Merkmale vorweisen: Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal und pragmatisches Merkmal ([Sta73], S. 131ff.). Das Abbildungsmerkmal besagt, dass ein Modell eine Abbildung bzw. Repräsentation natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können, darstellt. Modelle weisen somit eine Rekursivität auf und stehen immer in einer Abbildungsrelation mit dem repräsentierten Original ([Mot09], S. 10). Das Verkürzungsmerkmal wird dadurch deutlich, dass Modelle Abstraktionen gegenüber dem Original sind und somit nicht sämtliche Attribute des Originals, sondern nur diejenigen, die der jeweilige Modellmodellierer oder -nutzer als relevant erachtet, erfassen. Das pragmatische Merkmal eines Modells wird dadurch deutlich, dass die Beziehung zwischen Original und Modell willkürlich durch pragmatische Entschlüsse entsteht und somit direkten Einfluss auf die Auswahl der abzubildenden Attribute besitzt. Grundsätzlich existieren verschiedene Modelltypen, Grünz unterscheidet hier die folgenden vier Konzepte hinsichtlich ihres Einsatzzwecks, welcher maßgeblich durch die Zielsetzung einer Analyse beeinflusst wird:

1. *Deskriptive Modelle*: Fokus eines deskriptiven Modells ist die Abbildung realer Daten und Fakten. Ziel ist die Abbildung der Realität, indem ein Versuch unternommen wird, das Verhalten des Realsystems nachzubilden.
2. *Explikative Modelle*: Explikative Modelle haben das Ziel, die wesentliche Struktur eines Systems darzustellen, wodurch das Verhalten des Ausgangssystems aufgezeigt werden soll.
3. *Normative Modelle*: Anwendungszweck eines normativen Modells ist die Beschreibung des wesentlichen Systemzwecks. Verständnis über das Systemverhalten ist hier, analog zum explikativen Modell, erforderlich.
4. *Gemischte Modelle*: Falls eine Systemstruktur nur teilweise erkennbar ist, müssen weitere essenzielle Faktoren durch deren Reproduktion dargestellt werden, wodurch gemischte Modelle geschaffen werden ([Grü04], S. 53 f.).

Die Modellierung hat demnach stets das Ziel, einen Erkenntnisgewinn bezüglich der zu untersuchenden Fragestellung herbeizuführen. Da im vorliegenden Fall insbesondere die Systemeigenschaft Komplexität im Bereich von Montagewerken untersucht werden soll, ist die Modellbildung gemäß *Raufeisen* unter Berücksichtigung der vorhandenen Systemelemente durchzuführen. Hierdurch wird ein vereinfachtes Abbild der Werkskomplexität erzeugt, welches mithilfe von werkspezifischen Kriterien zu untersuchen ist ([Rau99], S. 99 f.).

Somit wird ein normatives Modell skizziert, welches das Systemverhalten zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt darstellt. Das Modell kann also sowohl durch das Abbildungs- als auch durch das Verkürzungsmerkmal charakterisiert werden. Zuletzt ist festzuhalten, dass auch das pragmatische Merkmal erkennbar ist, da die Modellbildung mit dem Ziel der Komplexitätsanalyse in der Logistik von Montagewerken erfolgt und entsprechend angewendet werden kann.

8.2 Konzeption eines Komplexitätsvektors zur Bewertung von Logistikkomplexität in Montagewerken

Erst die Transparenz hinsichtlich der logistisch relevanten Komplexitätstreiber und deren Auswirkungen auf Logistikkosten und Logistikleistung ermöglicht es, Logistikkomplexität ganzheitlich zu erfassen. Ziel ist es deshalb, sowohl die Erkenntnisse aus den Experteninterviews in Kapitel 6 als auch die Ergebnisse der statistischen Kausalanalyse in Kapitel 7 in der Bewertungsmethodik zu berücksichtigen.

Um der Mehrdimensionalität von Komplexität gerecht zu werden und alle Treiber in den Bereichen Produkt-, Netzwerk- und Strukturkomplexität zu erfassen, wird ein vektorieller Ansatz gewählt, welcher die drei Kategorien in seinen Dimensionen widerspiegelt. Dieser stellt im Rahmen der Komplexitätsbewertung ein bereits etabliertes Instrument dar (vgl. [Lam12]; [WPB08]; [DGE⁺12]) und scheint für den vorliegenden Anwendungsfall besonders geeignet, da sich die verschiedenen Komplexitätstreiber hinsichtlich ihres Einflusses auf den Logistikerfolg gewichten lassen. Daher wird im Folgenden die Bildung des Komplexitätsvektors mit den Dimensionen Produkt-, Netzwerk- und Strukturkomplexität mit den bereits definierten Komplexitätstreibern schrittweise beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass die Wahl der geeigneten Komplexitätstreiber situativ für den jeweiligen Anwendungsfall abgeändert werden kann.

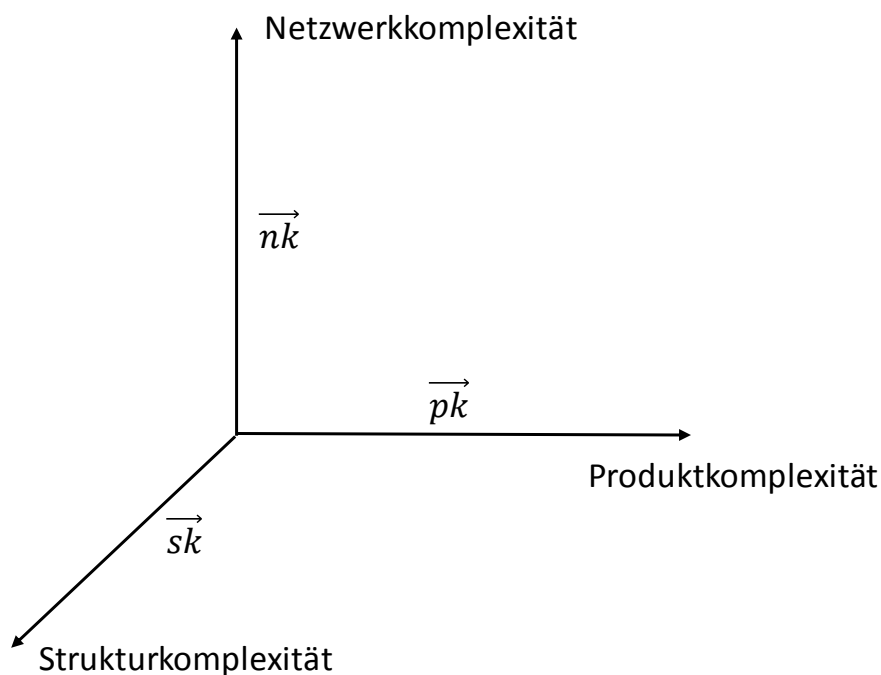


Abb. 8.1: Dimensionen des Komplexitätsvektors (eigene Darstellung)

Für die mathematische Beschreibung des Bewertungsansatzes werden folgende Indizes und Parameter gewählt, wobei auf bereits bestehende Elemente von *Feldhütter et al.* zurückgegriffen wird [FHS16].

Indizes

| | |
|------|--|
| pk | Produktkomplexität |
| nk | Netzwerkkomplexität |
| sk | Strukturkomplexität |
| m | Latente exogene Variable |
| M | Anzahl latenter exogener Variablen |
| n | Latente endogene Variable |
| N | Anzahl latenter endogener Variablen |
| k | Reflektive Messgröße |
| K | Anzahl Messgrößen innerhalb der betrachteten latenten Variable m |
| i | Werk |
| I | Menge aller Werke |
| j | Jahr |
| J | Menge aller Jahre |

Parameter

| | |
|-------------|--|
| \vec{c} | Ursachenvektor (Vektor der Werte aller latenten exogenen Variablen) |
| c_m | Vektorelement des Ursachenvektors (Wert der latenten exogenen Variable m) |
| $g_{m,n}$ | Gesamteffekt aus PLS-SGM zwischen latenter exogener Variable m und der latenten endogenen Variable n |
| G | Gewichtungsmatrix (Matrix der Gesamteffekte des PLS-SGM) |
| \vec{k} | Komplexitätsvektor |
| \vec{t}_m | Treibervektor der latenten exogenen Variable m |
| \vec{T} | Menge aller Treibervektoren |

| | |
|------------------|--|
| $t_{m,k}$ | Gewichteter Datenpunkt des betrachteten Werks und Jahres für Messgröße k innerhalb der latenten Variable m |
| $t_{m,k}^N$ | Normierter Datenpunkt des betrachteten Werks und Jahres für Messgröße k innerhalb der latenten Variable m |
| $l_{m,k}$ | Ladung zwischen latenter Variable m und Messgröße k |
| $x_{m,k}$ | Datenpunkt des zu analysierenden Werks und Jahres für Messgröße k innerhalb der latenten Variable m |
| $x_{m,k,i,j}$ | Datenpunkt des Werks i im Jahr j für Messgröße k innerhalb der latenten Variable m |
| $x_{m,k}^{\min}$ | Minimalwert für Normierung der Datenpunkte |
| $x_{m,k}^{\max}$ | Maximalwert für Normierung der Datenpunkte |
| $Z_{pk,nk,sk}$ | Komplexitätszahl des betrachteten Werks und Jahres für Produkt-, Netzwerk- und Strukturkomplexität |
| GK | Gesamtkomplexität. |

Die Gesamtkomplexität GK setzt sich zusammen aus den Komplexitätszahlen für Produkt-, Netzwerk- und Strukturkomplexität:

$$\overline{GK} = \begin{pmatrix} Z_{pk} \\ Z_{nk} \\ Z_{sk} \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

Mit der Zielfunktion Z wird eine repräsentative Komplexitätszahl für ein betrachtetes Werk und Jahr bestimmt. Die Komplexitätszahl Z wird durch den Betrag des Komplexitätsvektors $|\vec{k}|$ berechnet, welcher sich wiederum aus dem Produkt von Ursachenvektor \vec{c} und Gewichtungsmatrix G zusammensetzt. Der Ursachenvektor repräsentiert die latenten exogenen Variablen der jeweiligen Teilmodelle der in Abschnitt 7.3 analysierten PLS-SGM. Aus den Ergebnissen dieses SGM (Gesamteffekte) stammen auch die Werte für die Elemente der Gewichtungsmatrix G , wodurch die Effekte der Komplexitätstreiber bzw. Komplexitätsursachen auf die Logistikleistung direkt in der Bewertungsmethodik berücksichtigt werden. Die Zielfunktion beschreibt somit eine Regressionsfunktion analog dem formativen Zusammenhang zwischen exogenen und endogenen latenten Variablen im Strukturmodell ([GBC92], S. 57).

$$Z = |\vec{k}| \quad (8.2)$$

mit

$$\vec{k} = \vec{c} \times G \quad (8.3)$$

Die Elemente des Gewichtungsvektors sind äquivalent zu den Gesamteffekten des SGM. Da die Gesamteffekte der Komplexitätsursachen auf den Logistikerfolg negativ sind, ihre Beiträge zur Logistikkomplexität jedoch positiv sind, werden zur Berechnung der Komplexitätszahl die Beträge der Gesamteffekte verwendet:

$$G = \begin{bmatrix} |g_{m,n}| & |g_{m,n+1}| & \cdots & |g_{m,N}| \\ |g_{m+1,n}| & |g_{m+1,n+1}| & \cdots & |g_{m+1,N}| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |g_{M,n}| & |g_{M,n+1}| & \cdots & |g_{M,N}| \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

Der Ursachenvektor \vec{c} setzt sich aus den Elementen c_m zusammen, welche sich jeweils aus den Beträgen der einzelnen Komplexitätstreiber \vec{t}_m , berechnen lassen.

$$\vec{c} = \begin{pmatrix} c_m \\ c_{m+1} \\ \vdots \\ c_M \end{pmatrix} \quad (8.5)$$

mit

$$c_m = |\vec{t}_m| = \sqrt{\sum_{k=1}^K t_{m,k}^2} \quad \forall m = 1, \dots, M \quad (8.6)$$

Die Elemente der Treibervektoren \vec{t}_m , repräsentieren alle Messgrößen der latenten Variable m (dies sind bspw. für die latente Variable Produktprogramm die Indikatoren Anzahl Derivate, Anzahl Plattformen und Gesamtvolumen):

$$\vec{t}_m = \begin{pmatrix} t_{m,k} \\ t_{m,k+1} \\ \vdots \\ t_{m,K} \end{pmatrix} \in \vec{T} \quad \forall m = 1, \dots, M \quad (8.7)$$

Jedes Element des Treibervektors bestimmt sich aus dem Produkt des für die Messgröße k erhobenen, normierten Datenwerts eines Werkes (und Jahres) $t_{m,k}^N$ sowie der im PLS-SGM berechneten Ladung $l_{m,k}$ zwischen Messgröße k und latenter Variable m:

$$t_{m,k} = t_{m,k}^N \cdot l_{m,k} \quad \forall m = 1, \dots, M \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (8.8)$$

Eine Normierung der erhobenen Daten $x_{m,k}$ ist vor einer Berechnung nötig, damit die unterschiedlichen Messgrößen anhand einer einheitlichen Messskala in die Bewertung einfließen. Mit Hilfe von Maximal- und Minimalwerten der Einzelausprägungen x_{\max} und x_{\min} erfolgt diese Normierung mittels Interpolation zwischen $\tilde{x}_{\max} = 100$ und $\tilde{x}_{\min} = 0$. Die normierten Datenwerte liegen damit im Intervall $[0,100]$.

$$t_{m,k}^N = \frac{(x_{m,k} - x_{m,k}^{\min}) \cdot 100}{x_{m,k}^{\max} - x_{m,k}^{\min}} \quad \forall m = 1, \dots, M \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (8.9)$$

mit

$$x_{m,k}^{\min} = 0 \quad \forall m = 1, \dots, M \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (8.10)$$

$$x_{m,k}^{\max} = \text{MAX}(x_{m,k,i,j}) \quad \forall m = 1, \dots, M \quad \forall k = 1, \dots, K \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J \quad (8.11)$$

Zur Veranschaulichung der Funktionsweise erfolgt im folgenden Abschnitt eine beispielhafte Anwendung der Methodik. Hierfür wird die Logistikkomplexität für das gesamte Produktionsnetzwerk eines deutschen Premium-OEM berechnet und verschiedene Anwendungsszenarien vorgestellt.

8.3 Anwendung der Methodik in der Praxis

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Systematik zur Bewertung von Komplexität der Montagelogistik wird bei einem deutschen OEM eingesetzt und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit überprüft. Die Implementierung des Bewertungsansatzes wurde mit Microsoft Excel durchgeführt.

Der Einsatz eines neu entwickelten Modells zur Entscheidungsunterstützung setzt voraus, dass es umfassend validiert und auf seine Eignung zur Beantwortung der adressierten Fragestellungen getestet worden ist [NM]. Außerdem kann so die Verlässlichkeit der Bewertungsergebnisse gewährleistet werden. Es gilt zu überprüfen, ob Modell und Original hinreichend übereinstimmen, und es muss sichergestellt werden, dass das Modellverhalten das reale System genau genug und fehlerfrei widerspiegelt, wobei die Richtigkeit des Modells nicht allgemein nachzuweisen ist, da die Validierung einen eher subjektiven Prozess darstellt ([Lec12], S. 125). Die Funktionalität der Methodik wird durch die exemplarische Anwendung bei einem deutschen OEM nachgewiesen. Durch Verwendung von unternehmensspezifischen Bewertungsdaten wird die Handhabbarkeit im Praxiskontext sichergestellt und die Ergebnisse im Anschluss kurz erläutert und interpretiert. Die Validitätsprüfung im Hinblick auf die gewonnenen Erkenntnisse findet im Rahmen eines Expertenworkshops statt. Hier wird die Aussagekraft der vektoriiellen Komplexitätsmessung qualitativ überprüft und die erzielten Ergebnisse vor dem Hintergrund der Erfahrungswerte und Unternehmenskenntnisse der Experten diskutiert ([Lam12], S. 138 f.). Ein Vorteil von Validierungsworkshops ist der Synergieeffekt durch die Teilnahme mehrerer Personen, wodurch die Qualität der Ergebnisse gesteigert werden kann ([CW], S. 516 ff.).

Um die Funktionsweise der Berechnungslogik zu veranschaulichen, wird zunächst die Komplexitätszahl Z für die Kategorie Strukturkomplexität für ein Werk A im Produktionsnetzwerk des Praxispartners im Jahr 2015 exemplarisch berechnet. Im Anschluss daran werden die Komplexitätszahlen für alle drei Kategorien Produkt-, Netzwerk- und Strukturkomplexität im gesamten Produktionsnetzwerk im Zeitraum zwischen 2010 und 2015 dargestellt. Somit kann eine ganzheitliche Bewertung der Entwicklung von Logistikkomplexität in den letzten Jahren und Werksvergleiche hinsichtlich des Komplexitätsniveaus vorgenommen werden.

Analog zum Strukturgleichungsmodell in Abschnitt 7.3.2 für Strukturkomplexität werden die Komplexitätstreiber bzw. latenten endogenen Konstrukte für Struktur-/Prozesskomplexität folgendermaßen parametrisiert:

Tab. 8.1: Parameterzuordnung der latenten endogenen Variablen

| n | Latente (endogene) Variable |
|---|-----------------------------|
| 1 | Versorgungsleistung |
| 2 | Logistikkosten |
| 3 | Lagerhaltung |
| 4 | Umweltbelastungen |

Analog dazu erfolgt die Zuordnung der Parameternummern zu den latenten exogenen Variablen in Tab. 8.2:

Tab. 8.2: Parameterzuordnung der latenten exogenen Variablen für Strukturkomplexität Werk A

| m | Latente Variable | k | Manifeste Variable |
|---|-----------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Montagestruktur | 1 | Anzahl_Montagehallen |
| | | 2 | Anzahl_Vormontagehallen |
| | | 3 | Anzahl_Stockwerke |
| | | 4 | Anzahl_Montagelinien |
| 2 | Logistikstruktur | 1 | Anzahl_Externe_Dienstleister |
| | | 2 | Automatisierungsgrad |
| 3 | Produktlinien | 1 | Produktlinien_pro_Montagelinie |
| 4 | Produktionsausstoß | 1 | Einheiten_pro_Stunde |
| 5 | Kumulierter Rückstand | 1 | Kumulierter Rückstand |

| | | | |
|---|-----------------|---|------------------------------------|
| 6 | Logistikprozess | 1 | Anzahl_Standardversorgungsprozesse |
| | | 2 | Anzahl_Strukturelemente |

Die Gewichtungsmatrix beinhaltet die Gesamteffekte aus dem Strukturgleichungsmodell. Alle signifikanten Effekte werden dabei mit ihrem vollen Betrag als Matrixwerte einbezogen. Effekte, die statistisch nicht signifikant sind, werden an dieser Stelle ignoriert bzw. werden mit 0,000 gewichtet. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass insignifikante Effekte durchaus einen Einfluss auf die Logistikleistung haben können, dieser konnte aber anhand des verwendeten Datensatzes nicht nachgewiesen werden. Daher sollte der Anwender situativ entscheiden, ob Parameter trotz fehlender Signifikanz in die Komplexitätsbewertung aufgenommen werden sollten. Ein denkbarer Ansatz wäre hier bspw. auch jene Effekte zu berücksichtigen, welche durch sachlogische Überlegungen erklärt werden können und bei denen zumindest die Vorzeichen der Gesamteffekte mit den Hypothesen übereinstimmen. Zu Demonstrationszwecken werden hier in einem ersten Schritt lediglich die signifikanten Einflüsse aufgenommen, was in Gewichtungsmatrix G_1 ersichtlich wird. Nach Absprache mit dem Praxispartner wird dann in einem zweiten Schritt aber auch eine Gewichtungsmatrix mit den eben genannten Modifikationen berechnet, da so mehr Komplexitätsindikatoren in die Berechnung einfließen. In der Gewichtungsmatrix G_1 steht der Eintrag $g_{1,3}$ beispielsweise für den Einfluss der Montagestruktur ($m=1$) auf die Lagerhaltung ($n=3$) mit einer Höhe von 0,700. Da bei der Strukturkomplexität keine Effekte auf Umweltbelastungen nachgewiesen werden konnten, besteht die letzte Spalte der Gewichtungsmatrix nur aus 0,000. Das gleiche gilt für Zeilen 5 und 6, welche die Effekte von Logistikprozess und kumuliertem Rückstand darstellen.

$$G_1 = \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & g_{1,3} & g_{1,4} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & g_{2,3} & g_{2,4} \\ g_{3,1} & g_{3,2} & g_{3,3} & g_{3,4} \\ g_{4,1} & g_{4,2} & g_{4,3} & g_{4,4} \\ g_{5,1} & g_{5,2} & g_{5,3} & g_{5,4} \\ g_{6,1} & g_{6,2} & g_{6,3} & g_{6,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,383 & 0,000 & 0,700 & 0,000 \\ 0,000 & 0,377 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,188 & 0,000 \\ 0,155 & 0,000 & 0,225 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \end{bmatrix}$$

Um nun auch jene Komplexitätstreiber zu berücksichtigen, welche zwar qualitativ in den Experteninterviews bestätigt wurden, jedoch im SGM keine Signifikanzen aufzeigen, werden in G_2 auch die Variablen mit richtigem Vorzeichen einkalkuliert. Der Tatsache, dass diesen Treibern keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden konnte und somit ein geringerer Effekt angenommen werden muss, wird dadurch Rechnung getragen, dass nur die Hälfte des Gesamteffektes als Betrag in die Gewichtungsmatrix G_2 einfließt.

$$G_2 = \begin{bmatrix} 0,383 & 0,002 & 0,700 & 0,000 \\ 0,104 & 0,377 & 0,000 & 0,000 \\ 0,079 & 0,045 & 0,188 & 0,000 \\ 0,155 & 0,013 & 0,225 & 0,000 \\ 0,015 & 0,045 & 0,000 & 0,000 \\ 0,004 & 0,070 & 0,069 & 0,000 \end{bmatrix}$$

Die Gewichtungsmatrix ändert sich nicht im Zeitverlauf, wohingegen der Ursachenvektor für jedes Werk und Jahr spezifisch berechnet werden muss. Im Folgenden wird die Berechnung beispielhaft für das Werk A im Jahr 2015 dargestellt. Zunächst werden die Datenpunkte normiert, um eine Vergleichbarkeit zwischen allen Variablen zu erzielen. Der Messwert für die Anzahl der Montagehallen ($m=1$, $k=1$) im Werk A im Jahr 2015 wird mittels Interpolation normiert und ergibt sich unter Berücksichtigung der Minimal- und Maximalausprägungen von 0 bzw. 2 als

$$t_{1,1}^N = \frac{(x_{1,1} - x_{1,1}^{\min}) \cdot 100}{x_{1,1}^{\max} - x_{1,1}^{\min}} = \frac{(1-0) \cdot 100}{2-0} = 50,00$$

Durch Multiplikation mit der Ladung der manifesten Variable Anzahl Montagehallen ($l_{1,1} = 0,720$) ergibt sich dann der gewichtete Datenpunkt:

$$t_{1,1} = t_{1,1}^N \cdot l_{1,1} = 50,00 \cdot 0,720 = 36,00$$

Alle gewichteten Datenpunkte, welche zu einer latenten Variable gehören, bilden gemeinsam deren Treibervektor. Der Treibervektor der Montagestruktur ist beispielsweise

$$\vec{t}_1 = \begin{pmatrix} t_{1,1} \\ t_{1,2} \\ t_{1,3} \\ t_{1,4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 36,00 \\ 68,90 \\ 70,20 \\ 36,50 \end{pmatrix}$$

Mit der Bildung der Vektorbeträge aller Treibervektoren werden die Einträge für den Ursachenvektor \vec{c} generiert. Der Ursachenvektor für das Werk A im Jahr 2015 ergibt sich somit als

$$\vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 110,92 \\ 62,57 \\ 33,33 \\ 98,41 \\ 40,00 \\ 98,78 \end{pmatrix}, \text{ mit beispielsweise } c_1 = |\vec{t}_1| = 110,92$$

Anschließend an die Berechnung von Ursachenvektor und Gewichtungsmatrix kann die Erstellung des Komplexitätsvektors für Strukturkomplexität erfolgen, wobei an dieser Stelle Variante 2 der Gewichtungsmatrix verwendet wird.

$$\vec{k} = \vec{c} \cdot G_2 = \begin{pmatrix} 110,92 \\ 62,57 \\ 33,33 \\ 98,41 \\ 40,00 \\ 98,78 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,383 & 0,002 & 0,700 & 0,000 \\ 0,104 & 0,377 & 0,000 & 0,000 \\ 0,079 & 0,045 & 0,188 & 0,000 \\ 0,155 & 0,013 & 0,225 & 0,000 \\ 0,015 & 0,045 & 0,000 & 0,000 \\ 0,004 & 0,070 & 0,069 & 0,000 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 67,87 \\ 35,31 \\ 112,87 \\ 0,00 \end{pmatrix}$$

Der Vektorbetrag dieses Komplexitätsvektors bildet die Strukturkomplexitätskennzahl des Werkes A im Jahr 2015:

$$Z_{sk} = |\vec{k}| = 136,36$$

Folgende Abbildung zeigt die Realisierung der Berechnungslogik in Microsoft Excel anhand des eben vorgestellten Beispiels.

| Werk: | | A | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|---|-----------|-----------|----------------------|---|--|---|--|---|---|--|--|
| Jahr: | | 2015 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Messmodell | Latente Variable | m | k | Manifeste Variable | $x_{m,k}$ (Datenpunkt) | x_{max} (Maximaler Datenwert aus allen Werten über die Jahre 2009-2016) | x_{min} | $v_{m,k}$ | Ladungen aus PLS-SGM | Treibervektor für m = 1 (Montagestruktur) | Treibervektor für m = 2 (Logistikstruktur) | Treibervektor für m = 3 (Produktlinien) | Treibervektor für m = 4 (Produktionsausstoß) | Treibervektor für m = 5 (kumulierter Rückstand) | Treibervektor für m = 6 (Logistikprozess) | | |
| | Montagestruktur | 1 | 1 | Anzahl Montagehallen | 1 | 2 | 0,00 | 50,00 | 0,720 | 36,00 | | | | | | | |
| | | | 2 | Anzahl Vormontagehallen | 2 | 2 | 0,00 | 100,00 | 0,689 | 68,90 | | | | | | | |
| | | | 3 | Anzahl Stockwerke | 3 | 3 | 0,00 | 100,00 | 0,702 | 70,20 | | | | | | | |
| | | | 4 | Anzahl Montagelinien | 1 | 2 | 0,00 | 50,00 | 0,730 | 36,50 | | | | | | | |
| | Logistikstruktur | 2 | 1 | Anzahl externe LDC | 2 | 3 | 0,00 | 66,67 | 0,720 | 48,00 | 48,00 | | | | | | |
| | | | 2 | Automatisierungsgrad | 2,23 | 4,00 | 0,00 | 55,75 | 0,720 | 40,14 | 40,14 | | | | | | |
| | Produktlinien | 3 | 1 | Produktlinien pro Montagelinie | 1 | 3 | 0,00 | 33,33 | 1,000 | | | 33,33 | | | | | |
| | Produktionsausstoß | 4 | 1 | Einheiten pro Stunde | 62 | 63 | 0,00 | 98,41 | 1,000 | | | | 98,41 | | | | |
| | Kum. Rückstand | 5 | 1 | Kumulierter Rückstand | 40 | 100 | 0,00 | 40,00 | 1,000 | | | | | 40,00 | | | |
| Logistikprozess | 6 | 1 | Anzahl Standardprozesse | 202 | 202 | 0,00 | 100,00 | 0,924 | | | | | | | 92,40 | | |
| | | 2 | Anzahl Strukturelemente | 8 | 14 | 0,00 | 57,14 | 0,611 | | | | | | | 34,91 | | |
| Strukturmodell | Betrag des Treibervektors | | Montagestruktur | | | | | | 110,92 | | | | | | | | |
| | | | Logistikstruktur | | | | | | 62,57 | | | | | | | | |
| | | | Produktlinien | | | | | | 33,33 | | | | | | | | |
| | | | Produktionsausstoß | | | | | | 98,41 | | | | | | | | |
| | | | Kumulierter Rückstand | | | | | | 40,00 | | | | | | | | |
| | | | Logistikprozess | | | | | | 98,78 | | | | | | | | |
| | Gesamteffekte aus PLS-SGM | | Versorgungssicherheit | | | | | | 0,383 | 0,104 | 0,079 | 0,155 | 0,015 | 0,004 | | | |
| | Gesamteffekte aus PLS-SGM | | Kosten | | | | | | 0,002 | 0,377 | 0,045 | 0,013 | 0,045 | 0,070 | | | |
| | Gesamteffekte aus PLS-SGM | | Lagerhaltung | | | | | | 0,700 | 0,000 | 0,188 | 0,225 | 0,000 | 0,069 | | | |
| | Gesamteffekte aus PLS-SGM | | Umweltbelastungen | | | | | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | | | |
| Komplexitätsvektor | | | | | | | | 67,87 | 35,31 | 112,87 | 0,00 | | | | | | |
| Zielfunktion | Komplexitätszahl | | | | | | | | | | | | | 136,36 | | | |

Abb. 8.2: Realisierung der Berechnungslogik in Excel am Bsp. von Strukturkomplexität für Werk A im Jahr 2015 (in Anlehnung an [FHS16])

Während durch dieses Anwendungsbeispiel die Funktionsweise der Berechnungsmethodik demonstriert wurde, soll das folgende Beispiel ein mögliches Anwendungsszenario in der strategischen Planung eines OEM zeigen. Eine Anforderung an diese Forschungsarbeit stellte die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Werke in einem Produktionsnetzwerks hinsichtlich ihres Komplexitätsniveaus dar. Daher wird die Methodik nun für fünf Montagewerke des Praxispartners im Zeitraum von 2010 bis 2015 in den drei Kategorien Produkt-, Netzwerk- und Strukturkomplexität angewendet. Somit können die Entwicklungen der einzelnen Werke betrachtet werden. Zudem ist die Komplexität der Werke untereinander vergleichbar.

Abb. 8.3 zeigt den Werkevergleich bzgl. Produktkomplexität in den Jahren 2010 bis 2015. Die Werte der y-Achse repräsentieren die anhand der entwickelten Berechnungslogik ermittelten Produktkomplexitätszahlen Z_{pk} . Werk B weist im Produktionsverbund des OEM über den gesamten Zeitverlauf das höchste Niveau an Produktkomplexität auf. Dies liegt vor allem in dem breiten Produkt- und Variantenspektrum des Werkes begründet. Werk B baut mit 16 verschiedenen Fahrzeugmodellen und drei Produktlinien die meisten unterschiedlichen Fahrzeugtypen innerhalb des Produktionsnetzwerks des Praxispartners. Interessant ist auch der Verlauf der Produktkomplexitätskurve von Werk D. 2010 lag hier die Produktkomplexität noch auf dem zweitniedrigsten Niveau, diese ist aber im Zeitverlauf linear angestiegen und erreicht 2015 das zweithöchste Niveau innerhalb der Vergleichsbetrachtung. Die Analyse des zugrunde liegenden Datenmaterials zeigt, dass das vor allem durch die Integration einer Produktlinie mit Elektroantrieben und neuartigen Karosserieförmern erklärt werden kann, da diese Produktlinie keinerlei Kommunalitäten zu den bereits existierenden Fahrzeugen besitzt. Die Ergebnisse der Berechnungsmethodik für Produktkomplexität können durch die Experten beim Praxispartner umfassend bestätigt werden. Sie spiegeln eine subjektive Einschätzung der Experten quantitativ durch die Komplexitätszahl wider.

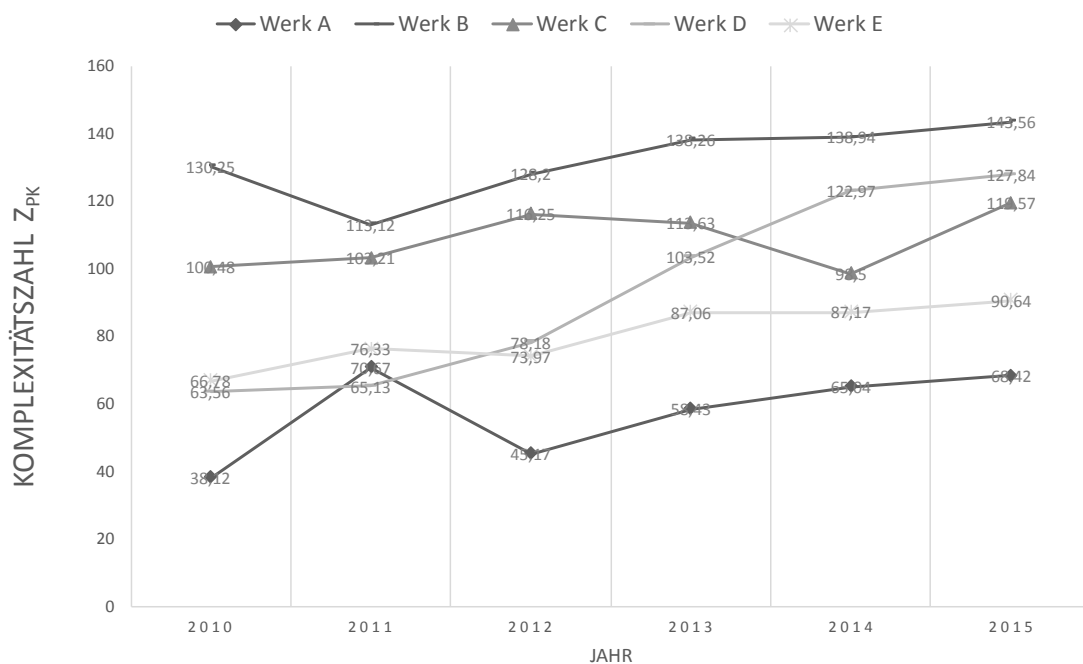


Abb. 8.3: Werkevergleich Produktkomplexität

Bei der Betrachtung der Entwicklung der Netzwerkkomplexität innerhalb des Produktionsverbundes fällt zunächst auf, dass bei allen Werken die Netzwerkkomplexität in den letzten Jahren signifikant angestiegen ist. Somit bestätigt sich hier der allgemeine Trend der Globalisierung in der Beschaffungskette, da Indikatoren wie Lieferantentfernung hier mit einfließen. Darüber hinaus schlägt sich auch die Strategie einer Risikodiversifizierung in der Entwicklung der Netzwerkkomplexität nieder, da durch die Vergabe von Teileumfängen an mehrere Lieferanten der Anteil an re-sequenzierten Teilefamilien zunimmt. Das hohe Netzwerkkomplexitätsniveau von Werk C im Jahr 2015 kann durch eine mangelhafte Lieferantenperformance erklärt werden. Hier

traten vermehrt Lieferschwierigkeiten seitens der Lieferanten auf, wodurch aufwändige Sondertransporte zum Einsatz kommen mussten. Zu betonen ist allerdings, dass sich Änderungen der Komplexitätszahlen häufig keinem einzelnen Komplexitätstreiber zuordnen lassen, sie entstehen vielmehr durch das Zusammenspiel der vielschichtigen Faktoren.

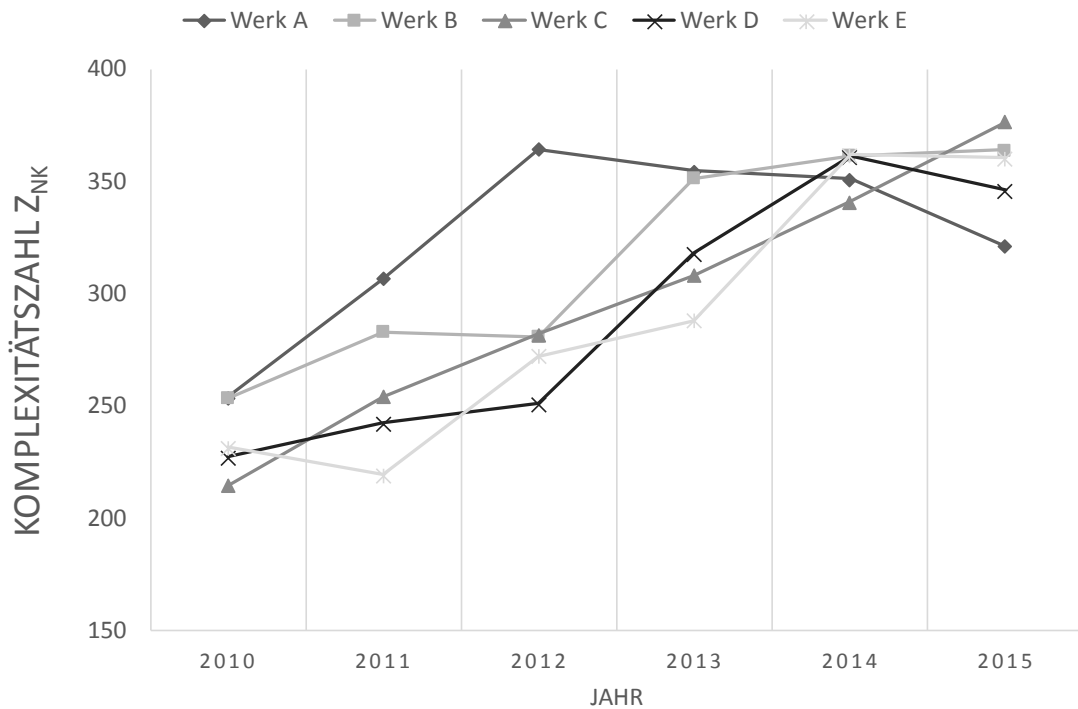


Abb. 8.4: Werkevergleich Netzwerkkomplexität

Die graphische Darstellung der Strukturkomplexität in Abb. 8.5 lässt erkennen, dass sich die Montagewerke des betrachteten OEM in ihrer Strukturkomplexität maßgeblich unterscheiden. Das Werk B hat im Vergleich zu anderen Werken sehr komplexe Logistikstrukturen, was durch die Versorgung von zwei Montagehallen durch ein gemeinsames Logistiksystem erklärt werden kann. Diese Tendenz wurde in den Expertengesprächen bereits erwartet und kann nun bestätigt werden. Ebenfalls eine hohe Strukturlogistikkomplexität kann dem Werk A zugeschrieben werden. Dieses Werk stellt ein Brownfield-Werk im klassischen Sinne dar, da es zum Zeitpunkt seiner Erbauung am Stadtrand lag, heute aber mitten im Stadtkern liegt und somit keine Ausweichmöglichkeiten mehr bestehen. Resultat ist nun eine komplexe Gebäudestruktur mit vielen Stockwerken und dezentralen logistischen Strukturelementen. Außerdem kann festgestellt werden, dass die Strukturkomplexität der einzelnen Werke auf einem vergleichsweise konstanten Niveau ist und nur geringfügigen Schwankungen unterliegt. Dies ist intuitiv nachvollziehbar, da eine bestehende Werksstruktur aus Kostengründen nur selten grundlegend verändert wird. Vielmehr sind die Schwankungen durch die Integration einer neuen Produktlinie oder Veränderungen in logistischen Prozessen begründet.

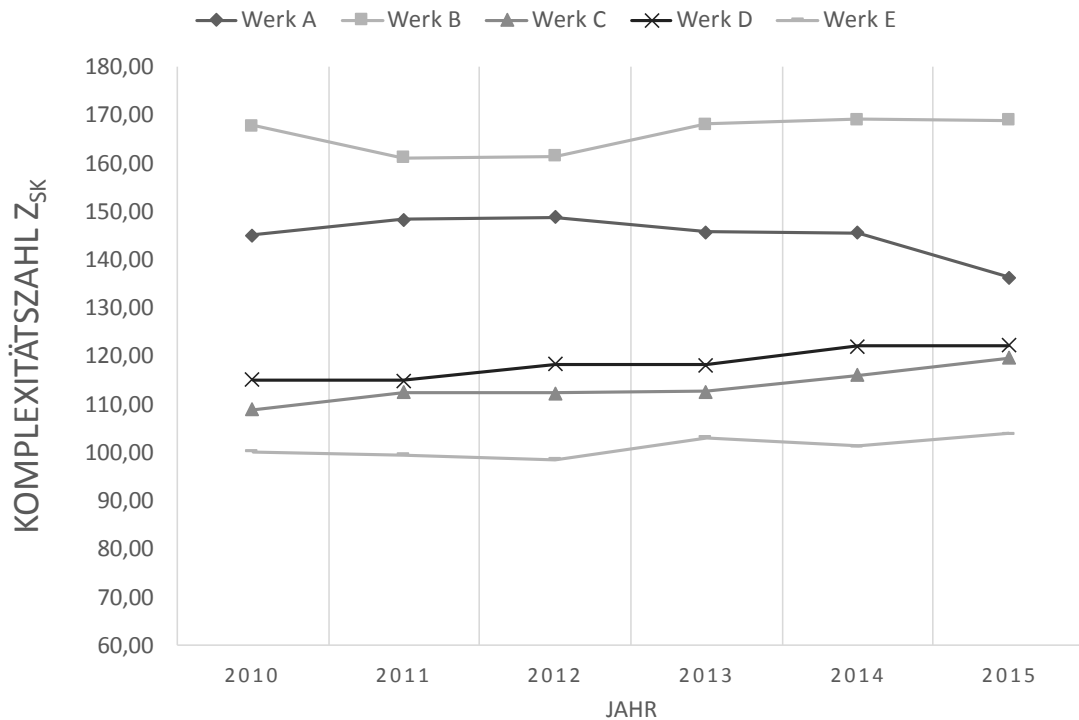


Abb. 8.5: Werkevergleich Strukturkomplexität

Sowohl das Berechnungsbeispiel für Strukturkomplexität als auch der Werksvergleich in den drei Komplexitätskategorien untermauern die Bedeutung der Berücksichtigung von Logistikkomplexität in Planungsprozessen, denn durch die Quantifizierung von Komplexität und ihre Auswirkungen auf die Logistikleistung können bereits in frühen Planungsphasen Ableitungen getroffen werden. Außerdem kann die Berechnungsmethodik zur Entscheidungsunterstützung und Bewertung von Szenarien bspw. bei Werkebelegungen herangezogen werden. Die praxistaugliche Nutzung der Forschungsergebnisse wird durch die Bereitstellung eines Excel-Tools gewährleistet, sodass die Bewertungsmethodik auch in Zukunft bei einem OEM als Entscheidungsunterstützungsinstrument eingesetzt werden kann. Das Ziel für Unternehmen kann aus diesem Ergebnis jedoch nicht sein, Logistikkomplexität z. B. durch eine minimale Anzahl an Derivaten und Ausstattungsvarianten zu reduzieren, denn diese stellen marktbezogen einen strategischen Erfolgsfaktor dar. Vielmehr verdeutlicht dieses Ergebnis die Relevanz des richtigen Komplexitätsmanagements, welches nur durch Transparenz und Verständnis der komplexen Zusammenhänge erzielt werden kann.

Zur Beurteilung der Validität der Ergebnisse wird eine qualitative Validitätsprüfung mit dem Praxispartner durchgeführt. Hierzu werden die Forschungsergebnisse verschiedenen Managementebenen des OEM vorgestellt. Insbesondere wird die Güte der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Erfahrungswerte und Systemkenntnisse der Manager in Bezug auf die Montagelogistik diskutiert. Folgende Kernaussagen konnten im Zuge der Validierungsphase herausgearbeitet werden: Das Modell beinhaltet alle für den OEM relevanten Komplexitätstreiber und schafft Transparenz hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Logistikkennzahlen. Die Ergebnisse der Berechnungslogik entsprechen den Einschätzungen der Manager und liefern eine ganzheitliche objektive, universal einsetzbare Methodik zur Bewertung von Komplexität in der Montagelogistik. Der

nachhaltige Einsatz und die Funktionalität sind durch die Implementierung in Microsoft Excel sichergestellt.

9 Schlussbetrachtung

Im Anschluss an die Entwicklung einer modellbasierten Methodik zur Komplexitätsbewertung in der Montagelogistik sowie deren Anwendung bei einem deutschen OEM werden in diesem Kapitel die wesentlichen Ergebnisse der Forschungsarbeit zusammengefasst und diskutiert.

9.1 Zusammenfassung zentraler Erkenntnisse

Steigende Kundenanforderungen an individuelle Produkte und eine hohe Liefertreue sowie globale Produktionsnetzwerke erhöhen die Komplexität in allen Bereichen eines Unternehmens. Aufgrund seiner zentralen Bedeutung ist der Unternehmensbereich der Logistik besonders stark von diesem Komplexitätsanstieg betroffen. Gleichzeitig kann die Logistik mit ihrer Querschnittsfunktion einen maßgeblichen Beitrag zur Komplexitätsbeherrschung in der gesamten Wertschöpfungskette eines Unternehmens leisten. Insbesondere in der Automobilindustrie wird der Komplexitätsanstieg in der Logistik immer mehr erkannt, weshalb das Komplexitätsmanagement zunehmend an Bedeutung gewinnt. Um geeignete Maßnahmen zum Umgang mit Komplexität einleiten zu können, ist ein vertieftes Verständnis über die komplexitätsverursachenden Faktoren und deren Auswirkungen auf das Unternehmen notwendig. Erst wenn umfangreiche Kenntnisse über die Wirkzusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg bestehen, ist es möglich, Transparenz hinsichtlich der Komplexität zu schaffen. Dazu werden Lösungsansätze benötigt, die eine Bewertung und Einordnung der Logistikkomplexität ermöglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher die unternehmensinternen, primären Treiber der Logistikkomplexität in den Kategorien Produkt, Netzwerk sowie Struktur/Prozess eines OEM identifiziert, um anhand deren Auswirkungen auf den Logistikerfolg eine Bewertungsmethodik für Logistikkomplexität zu entwickeln. Zur Ermittlung der internen Komplexitätstreiber wurden Experteninterviews in den Werken eines Premium-OEM durchgeführt. Hierbei war das Ziel, Treiber aus der Literatur in der Praxis zu validieren, weitere praxisrelevante Treiber zu identifizieren und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge dieser aufzudecken. Durch diese qualitative Analyse konnte Transparenz hinsichtlich der internen Treiber von Logistikkomplexität geschaffen werden. Im Bereich Produktkomplexität wurden insbesondere die Anzahl an verschiedenen Derivaten in einem Werk, der Kommunalitätsgrad sowie die Anzahl an Sachnummern als haupttreibend für die Produktkomplexität herausgearbeitet. Dies spiegelte sich auch in der Literatur wider, da hier die Varietät die größte Nennungshäufigkeit zeigte. Im zweiten untersuchten Teilgebiet, der Netzwerkkomplexität, wurden in der qualitativen Studie vor allem die Anzahl an Lieferanten, die resequenzierten Teilefamilien sowie die durchschnittliche Lieferantenentfernung von den Experten als primäre Komplexitätstreiber genannt. Auch diese wurden im Vorfeld im Rahmen einer Literaturanalyse bestimmt und um weitere, anwendungsspezifische Faktoren erweitert. Den letzten Teil der qualitativen Studie bildete die Struktur-/Prozesskomplexität. Die Strukturkomplexität als Systemeigenschaft ist zwar in der Literatur häufig anzutreffen, jedoch konnte kaum auf vorhandene Untersuchungen zurückgegriffen werden, da diesen durch eine allgemeine Systembetrach-

tung der Fokus auf Logistik- bzw. Werkskomplexität fehlte. Im Zuge der leitfadengestützten Experteninterviews konnten die Anzahl an Montagehallen, die Anzahl an Versorgungsprozessen sowie die Anzahl an Produktlinien pro Montagelinie als strukturelle Haupttreiber aufgenommen werden. Im Anschluss an die qualitative Studie wurden Daten für sämtliche Komplexitätstreiber bei dem Praxispartner erhoben. Anhand dieser identifizierten Komplexitätstreiber war es nun möglich, vermutete Zusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg mit vergangenheitsbasierten Unternehmensdaten statistisch zu überprüfen. Eine Strukturgleichungsanalyse als multivariates Analyseverfahren der Statistik ermöglichte hierbei neben der Überprüfung von Hypothesen auch eine graphische Darstellung der vermuteten komplexen Zusammenhänge. Außerdem bietet das SGM dem OEM ein umfassendes Verständnis über die Auswirkungen von Logistikkomplexität auf logistische Kennzahlen.

Es zeigte sich, dass im Rahmen von Produktkomplexität das Produktprogramm, welches durch die Indikatoren Anzahl Derivate, das Gesamtvolumen und die Anzahl an Plattformen bestimmt wird, den größten negativen Einfluss auf den Logistikerfolg hat. Hier konnten signifikante Effekte auf alle vier betrachteten Logistikkennzahlen Kosten, Versorgungsleistung, Lagerhaltung sowie Umweltbelastungen nachgewiesen werden.

Im zweiten Teilmodell, der Netzwerkkomplexität, wurde für die Treiber Lieferantenzahl, Re-Sequenzierungen und Transportvolumen ein Einfluss auf die Kosten festgestellt. Außerdem bestätigte das SGM die vermutete Verbindung zwischen einer Erhöhung der Transportleistung und ansteigenden CO₂-Emissionswerten. Als Folge einer Erhöhung der Lieferantenzahl in einem Werk konnte zudem die Verringerung der gesamten Lieferantenperformance genannt werden, da jeder weitere Lieferant potenzielles Ausfall- bzw. Störungsrisiko birgt.

Die größten Effektstärken bei der Strukturkomplexität konnten für die Montagestruktur nachgewiesen werden. Die empirische Untersuchung zeigte, dass eine Ausweitung der Montagestruktur durch bspw. mehr Montagehallen oder -linien zu einer Verringerung der Versorgungsleistung führt. Darüber hinaus hat auch die Anzahl an Produktlinien pro Montageband einen wesentlichen Einfluss auf die Versorgungsleistung sowie Lagerhaltung. Der Automatisierungsgrad in der Materialbereitstellung und die Anzahl an externen Logistikdienstleistern weisen laut SGM für Strukturkomplexität einen maßgeblichen Effekt auf die Logistikkosten auf.

Auf Basis der im SGM ermittelten Effektstärken wurde im Anschluss an die multivariate statistische Analyse eine vektorbasierte Bewertungsmethodik für Komplexität in der Montagelogistik entwickelt. Dabei dienten die Effektstärken aus dem SGM als Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Komplexitätstreiber, welche durch die entwickelte Berechnungsvorschrift zu einer Komplexitätszahl aggregiert werden konnten. Die Praxistauglichkeit wurde durch die Anwendung bei einem deutschen Premium-OEM sichergestellt. Die Ergebnisse des Anwendungsfalls zeigen, dass die forschungsleitende Fragestellung beantwortet werden konnte, indem Logistikkomplexität in der Montage eines OEM bewertbar gemacht wurde.

Zusammenfassend wird der Forschungsbeitrag dieser Arbeit durch den Abgleich der Ergebnisse mit den in Abschnitt 1.3 definierten Anforderungen seitens Wissenschaft und Praxis bewertet.

Tab. 9.1: Abgleich der Ergebnisse mit den Anforderungen aus Abschnitt 1.3

| Anforderung | Beschreibung | Bewertung |
|-------------|---|--|
| A1 | Berücksichtigung von produkt-, netzwerk- und strukturbezogenen Komplexitätstreibern | Wesentliche Einflussfaktoren in den drei Kategorien wurden identifiziert und in der Methodik berücksichtigt. |
| A2 | Integration von OEM, Lieferanten, Dienstleistern, Strukturen und Prozessen | Die beteiligten Akteure im System unter Berücksichtigung des gewählten Betrachtungsraumes wurden erfasst. |
| A3 | Erfassung und Quantifizierung der Folgen von Komplexität auf Logistikerfolg | Durch die Datenerhebung von Komplexitätstreibern und Logistikkennzahlen bei einem deutschen OEM und das daraus gebildete SGM konnten die Folgen von Logistikkomplexität auf den Logistikerfolg quantifiziert werden. |
| A4 | Einsatz als Entscheidungsunterstützungsinstrument | Die Methodik wurde prototypisch angewendet und die Funktionsweise als Entscheidungsunterstützungsinstrument demonstriert. |
| A5 | Berücksichtigung der wechselseitigen Abhängigkeiten der Komplexitätstreiber | Durch die Erstellung des Einflussportfolios konnten die aktiven, passiven, kritischen und trägen Komplexitätstreiber identifiziert werden, woraus Handlungsempfehlungen für ein zielgerichtetes Komplexitätsmanagement abgeleitet werden können. |
| A6 | Modellbasierter Aufbau zur Abbildung von Szenarien und Experimenten | Das entwickelte Modell ermöglicht die Abbildung von vielfältigen Szenarien und die Bewertung dieser hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Komplexität in der Werkslogistik. |
| A7 | Erhebung realer, quantitativer Messgrößen | Es wurden lediglich Daten erhoben, die in Systemen oder Dateien beim Praxispartner vorlagen. |
| A8 | Akzeptabler Pflegeaufwand des Bewertungsansatzes | Durch die Implementierung eines Tools in Microsoft Excel ist der Aktualisierungs- und Pflegeaufwand beherrschbar. |

9.2 Kritische Würdigung

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Methodik zur Quantifizierung von Logistikkomplexität ermöglicht es erstmals, valide Aussagen bezüglich des Komplexitätsgrads verschiedener Montagewerke zu treffen und Vergleiche von werksbezogenen Komplexitätsmessungen vorzunehmen. Die Anwendung der Methodik und die inhaltliche Auseinandersetzung mit dieser

ermöglicht es zudem, Komplexitätsänderungen zu erkennen und zu bewerten. Das der Bewertungsmethodik zugrunde liegende SGM liefert zudem Erkenntnisse über statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen Komplexitätstreibern und Logistikkennzahlen. Aus den Gesamtergebnissen dieser Analysen und der Transparenz über Komplexitätsfolgen können schließlich Handlungsalternativen erarbeitet werden, welche Komplexität bereits in der Entwicklung und Beschaffung verringern, um die Logistikkomplexität zu reduzieren.

Zur weiteren Präzisierung der Forschungsbasis und einer Erweiterung des Komplexitätskriterienkataloges um externe, qualitative Faktoren wie Gesetzgebung, Klima oder Bildungsniveau ist eine Ausweitung der Literaturanalyse notwendig. Darüber hinaus ist die entwickelte Methodik spezifisch auf die Automobilindustrie ausgelegt. Für eine Übertragung auf weitere Industriezweige oder auch andere OEM müssten neue qualitative Studien aufgesetzt werden, um die individuellen Komplexitätstreiber zu identifizieren. Diese firmenspezifische Konkretisierung geht außerdem einher mit einem Verlust an Allgemeingültigkeit, da die nachgewiesenen kausalen Zusammenhänge nicht auf alle OEM übertragbar sind. Es ist zwar anzunehmen, dass die identifizierten Komplexitätstreiber zum großen Teil übereinstimmen. Jedoch müssten die im Bewertungsmodell als Gewichtungsfaktoren realisierten Effektstärken im Rahmen einer neuen statistischen Analyse für jedes Unternehmen neu bestimmt werden. Die Anwendung der Methodik in Kapitel 8 stellt lediglich einen prototypischen Einsatz des Bewertungsansatzes dar, zur weiteren Validierung und Bestätigung der Praxistauglichkeit sind weitere Use Cases entweder beim gleichen OEM oder bei anderen Automobilherstellern notwendig. Dies birgt aber die eben erwähnte Problematik unterschiedlicher Zusammenhänge zwischen Komplexitätstreibern und Logistikkennzahlen und wäre mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Die vorliegende Arbeit liefert somit eine Methodik, um Komplexität in der Montagelogistik messbar zu machen. Die Anwendung dieser erfordert aber umfassende Vorbereitungsarbeit seitens des Anwenders insbesondere in Datenbeschaffung und statistischer Auswertung.

Zusammenfassend konnte im Rahmen der durchgeführten Analysen Transparenz über die komplexitätstreibenden Faktoren in einem Montagewerk, ihre gegenseitigen Abhängigkeiten und Effekte auf Logistikkennzahlen geschaffen werden. Durch das Einflussportfolio wurden zudem jene kritischen und aktiven Komplexitätstreiber identifiziert, welche das größte Beeinflussungspotenzial im Rahmen eines zielgerichteten Komplexitätsmanagements ausweisen. Die Erkenntnisse wurden jedoch nicht mit konkreten Maßnahmen zur Komplexitätsbeherrschung hinterlegt, was Potenzial für eine Weiterentwicklung der Methodik bietet.

9.3 Ausblick

Der rasante Komplexitätsanstieg im externen sowie internen Unternehmensumfeld ist nicht zu vernachlässigen und öffnet weitere Handlungsfelder. Aufgrund der wachsenden Bedeutung von Komplexität insbesondere für produzierende und weit vernetzte Unternehmen spielt die Komplexitätsforschung auch in Zukunft eine bedeutende Rolle in verschiedensten Gebieten. Während in dieser Arbeit ein Bewertungsansatz für Logistikkomplexität entwickelt und in einer prototypischen Anwendung bei einem deutschen OEM validiert wurde, stellt der nächste Schritt eine Ausweitung auf weitere Praxispartner dar. Denkbar ist hier ein Einsatz der Methodik sowohl im selben Unternehmen als auch bei anderen OEM. Im selben Unternehmen könnte die Methodik bspw.

für weitere Technologien mit hohem Komplexitätsbezug, wie etwa der Montageplanung, eingesetzt werden. Im zweiten Fall würde der Ansatz ebenso zur Bewertung der Logistikkomplexität eines zweiten OEM dienen. In beiden Szenarien müsste allerdings im Rahmen einer qualitativen-explorativen Vorgehensweise der Komplexitätstreiberkatalog um firmen- und kontextspezifische Einflussfaktoren ergänzt werden. Außerdem würde durch die vergrößerte Samplegröße eine höhere Repräsentativität erreicht werden. Hierin zeigt sich auch der Vorteil des vektoriellen Ansatzes, da eine Integration weiterer Treiber leicht zu realisieren ist. Denkbar ist außerdem, das Vektormodell für weitere, schwer messbare Konstrukte wie beispielsweise Flexibilität anzuwenden. Auch hier sind im Vorhinein weiterführende Literaturanalysen oder explorative Studien notwendig, um die individuellen Indikatoren zu bestimmen.

Ein Kriterium zur Auswahl des PLS-Ansatzes anstatt des Kovarianz-analytischen Ansatzes für das SGM war die Eignung für Prognosen. Durch eine Vergrößerung und damit einhergehende Verbesserung der Datengrundlage könnten die entwickelten Modelle dazu dienen, konkrete Szenarien hinsichtlich Kosten oder Versorgungsleistung zu bewerten. Bisher ist die Datenerhebung und Modellpflege mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden, durch eine automatisierte Datensammlung und Neuberechnung der Effektstärken würde dies erheblich vereinfacht werden. Denkbar ist auch eine Umsetzung von Machine-Learning-Algorithmen, die aufgrund von Mustern in IST-Daten Prognosen hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen den Komplexitätstreibern und Logistikkennzahlen liefern könnten. Die Implementierung einer solchen Softwarelösung ist jedoch nur im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung der jeweiligen Unternehmenssysteme möglich, da ein unternehmensweiter, konsistenter Datenbackbone notwendig wäre, auf den der Algorithmus zugreift. Beim Praxispartner der Forschungsarbeit ist dies zum Zeitpunkt der Entstehung der Arbeit nicht der Fall, da mehrere, eigenständige Insellösungen existieren.

Während diverser Diskussionen mit dem Praxispartner wurde des Öfteren die Frage nach einem Komplexitätsoptimum gestellt. Bisher existiert kein Optimalwert für Logistikkomplexität in einem Werk, mit welchem die ermittelte Komplexitätszahl eines Werks verglichen werden kann. Die vorliegende Arbeit erlaubt lediglich einen werksübergreifenden Vergleich anhand einer Ordinalskala, es kann aber keine Aussage darüber getroffen werden, wann ein Werk ein „gutes“ Komplexitätsniveau erreicht hat. Denn ein gewisses Maß an interner Komplexität wird immer notwendig sein, um in dem von Dynamik und Unsicherheit geprägten Unternehmensumfeld bestehen zu können.

Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen können außerdem unternehmensspezifische Maßnahmen zur Beherrschung von Komplexität und damit für ein gelungenes Komplexitätsmanagement implementiert werden. Insbesondere liefern die statistisch nachgewiesenen Zusammenhänge zwischen der Anzahl an SNR und Logistikkosten einen Anreiz bzw. Argument für das Variantenmanagement, diese nachhaltig zu reduzieren. Der aktive Charakter der Anzahl SNR im Einflussportfolio unterstützt diese Aussage zusätzlich. Auch im Rahmen einer Werkebelegungsentscheidung könnten wesentliche Erkenntnisse der Arbeit in Erwägung gezogen werden. Eine Segmentierung und Spezialisierung der Werke in die einzelnen Produktlinien und Plattformen würde einen positiven Einfluss auf die Strukturkomplexität sowie die Produktkomplexität haben. Denn durch den wesentlich höheren Kommunalitätsgrad innerhalb eines Werks sinkt die Gesamtanzahl an Sachnummern. Diese Beispiele sollen Denkanstöße bieten, welche Überlegungen anhand der erarbeitenden Ergebnisse im Rahmen eines ganzheitlichen Komplexitätsmanagements

angestoßen werden sollten und welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um Komplexität langfristig zu vermeiden, zu reduzieren und zu beherrschen.

Literaturverzeichnis

- [Ada98] Adam, Dietrich: *Komplexitätsmanagement*. Wiesbaden: Gabler, 1998 – ISBN 9783409179386
- [Alb07] Albers, Sönke: *Handbuch Produktmanagement: Strategieentwicklung - Produktplanung - Organisation - Kontrolle*. 3., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2007 – ISBN 3834902683
- [Arn08] Arndt, Holger: *Supply Chain Management: Optimierung logistischer Prozesse*. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2008 – ISBN 3322945278
- [AIK⁺08] Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2008 – ISBN 978-3-540-72929-7
- [Ash56] Ashby, William Ross: *An introduction to cybernetics*. London: Chapman & Hall, 1956. – ISBN 0-416-68300-2
- [BEP⁺16] Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber, Rolf: *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 14. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016 – ISBN 3662460769
- [BW07] Backhaus, Klaus; Weiber, Rolf: *Forschungsmethoden der Datenauswertung*. In: Köhler, Richard (Hrsg.): *Handwörterbuch der Betriebswirtschaft*. 6., vollst. neu gestaltete Aufl. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 2007 – ISBN 3791080512, S. 524–535
- [Bae74] Baetge, Jörg: *Betriebswirtschaftliche Systemtheorie: Regelungstheoretische Planungs-Überwachungsmodelle für Produktion, Lagerung und Absatz*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1974. – ISBN 978-3-322-85437-7
- [Bal81] Balzert, Helmut: *Quantitative Ansätze zur Bestimmung der Komplexität von Software-Systemen*, Bd. 50. In: Brauer, Wilfried (Hrsg.): 3rd Conference of the European Cooperation in Informatics. Berlin, Heidelberg : Springer, 1981,– ISBN 978-3-540-10884-9, S. 170–190
- [Bar94] Bartuschat, Martin: *Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der Serienfertigung*. Essen: Vulkan-Verl., 1994 – ISBN 978-3802786211
- [Bar97] Bar-Yam, Yaneer: *Dynamics of complex systems*. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1997 (Studies in nonlinearity). – ISBN 978-0201557480
- [BHV14] Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-658-04682-8
- [BB14] Baur, Nina; Blasius, Jörg: *Methoden der empirischen Sozialforschung*. In: Baur, Nina (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden : Springer VS, 2014
- [Bay10] Bayer, Tobias: *Integriertes Variantenmanagement: Variantenkostenbewertung mit faktorenanalytischen Komplexitätstreibern*. München: Hampp Verlag, 2010 – ISBN 3866185545

- [BMW14] Becker, Till; Meyer, Mirja; Windt, Katja: *A manufacturing systems network model for the evaluation of complex manufacturing systems*. In: International Journal of Productivity and Performance Management 63 (2014), Nr. 3, S. 324–340. – DOI 10.1108/IJPPM-03-2013-0047
- [Bec04] Beckmann, Holger: *Supply Chain Management: Grundlagen, Konzept und Strategien*. In: Beckmann, Holger (Hrsg.): *Supply Chain Management : Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen*. Berlin: Springer, 2004. – ISBN 978-3-642-17057-7, S. 1–97
- [BD08] Bick, Werner; Drexl-Wittbecker, Susanne: *Komplexität reduzieren: Konzept. Methoden. Praxis*. Stuttgart: LOG X, 2008. – ISBN 978-3932298349
- [Bie71] Biegert, Hansjörg: *Die Baukastenbauweise als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip*. Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe, Fak. f. Geistes- u. Sozialwiss., 1971
- [Bie04] Bierwirth, Thomas: *Virtuelle Logistikplanung für die Automobilindustrie: Methoden und Modelle im Rahmen der digitalen Fabrik*. Aachen: Shaker, 2004 – ISBN 9783832211455
- [BKM05] Blecker, Thorsten; Kersten, Wolfgang; Meyer, Christian: *Development of an Approach for Analyzing Supply Chain Complexity*. In: Mass Customization. Concepts – Tools – Realization. Proceedings of the International Mass Customization Meeting, 2005, S. 47–59
- [Ble11] Bleicher, Knut: *Das Konzept Integriertes Management: Visionen - Missionen - Programme*. 8. Aufl. Frankfurt am Main: Campus, 2011. – ISBN 3593394405
- [Bli05] Bliemel, Friedhelm: *Handbuch PLS-Pfadmodellierung: Methode, Anwendung, Praxisbeispiele*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2005. – ISBN 9783791023601
- [Bli00] Bliss, Christoph: *Management von Komplexität: Ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2000. – ISBN 978-3-663-10720-0
- [Blu06] Blum, Hannes Stephan: *Logistik-Controlling: Kontext, Ausgestaltung und Erfolgswirkungen*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006 – ISBN 3835090925
- [Bog10] Bogaschewsky, Ronald: *Supply Management Research: Aktuelle Forschungsergebnisse 2010*. Wiesbaden: Gabler, 2010 – ISBN 978-3-8349-2262-5
- [Boh98] Bohne, Fabian: *Komplexitätskostenmanagement in der Automobilindustrie: Identifizierung und Gestaltung vielfaltsinduzierter Kosten*. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl, 1998 – ISBN 978-3824468560
- [BD02] Bortz, Jürgen; Döring, Nicola: *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler*. 3., überarbeitete Aufl. Heidelberg: Springer, 2002 – ISBN 3540333061
- [Bog09] Bogner, Alexander: *Experteninterviews: Theorie, Methoden, Anwendungsfelder*. Wiesbaden: Verl. für Sozialwiss., 2009 – ISBN 3531162594
- [Bos92] Bossel, Hartmut: *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1992 – ISBN 3322836584

- [Bou97] Boutellier, Roman: *Plattformen - ein Erfolgsfaktor im Wettbewerbsdruck*. In: TR Transfer 89 (1997), Nr. 37, S. 58–61
- [BWF⁺09] Bozarth, Cecil C.; Warsing, Donald P.; Flynn, Barbara B.; Flynn, E. James: *The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance*. In: Journal of Operations Management 27 (2009), Nr. 1, S. 78–93 – DOI 10.1016/j.jom.2008.07.003
- [Bre16] Bretzke, Wolf-Rüdiger: *Die Logik der Forschung in der Wissenschaft der Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016
- [Bri04] Brink, Stefan: *Gemeinwohl und Verantwortung: Festschrift für Hans Herbert von Arnim zum 65. Geburtstag*. Berlin: Duncker & Humblot, 2004 – ISBN 3-428-11603-8
- [Bro01] Browning, T. R.: *Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions*. In: IEEE Transactions on Engineering Management 48 (2001), Nr. 3, S. 292–306. – DOI 10.1109/17.946528
- [BZ02] Bühl, Achim; Zöfel, Peter: *Erweiterte Datenanalyse mit SPSS: Statistik und Data Mining*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2002 – ISBN 332289603X
- [CET02] Chatelin, Yves Marie; Esposito Vinzi, Vincenzo; Tenenhaus, Michel: *State-of-art on PLS Path Modeling through the available software*. Paris: Groupe HEC, 2002
- [Chi98] Chin, Wynne W.: *The partial least squares approach to structural equation modeling*. In: Marcoulides, G. A. (Hrsg.): *Modern methods for business research*. Mahwah: Lawrence Erlbaum, 1998, S. 295–358
- [CG09] Christophersen, Timo; Grape, Christian: *Die Erfassung latenter Konstrukte mit Hilfe formativer und reflektiver Messmodelle*. In: Albers, Sönke; Klapper, Daniel; Konradt, Udo; Walter, Achim; Wolf, Joachim (Hrsg.): *Methodik der empirischen Forschung*. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2009 – ISBN 978-3-8349-1703-4, S. 103–118
- [Cle15] Cleff, Thomas: *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse: Eine computer-gestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015 – ISBN 3834947482
- [CS08] Corbin, Juliet M.; Strauss, Anselm L.: *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory*. 3. Aufl. Los Angeles: Sage Publications, 2008. – ISBN 1412997461
- [CW05] Cornelsen, Claudia; Walter, Henry: *Handbuch Führung: Der Werkzeugkasten für Vorgesetzte*, 3. aktuel. u. erweit. Aufl. Frankfurt am Main: Campus Verlag GmbH, 2005 – ISBN 9783593377605
- [Cor95] Corsten, H.: *Wettbewerbsstrategien - Möglichkeiten einer simultanen Strategieverfolgung*. In: Corsten, H.; Reiß, M. (Hrsg.): *Handbuch der Unternehmensführung*. Wiesbaden : Gabler, 1995, S. 341–353
- [Cyr07] Cyrus Shahabi, Farnoush Banaei-Kashani: *Modelling P2P data networks under complex system theory*. In: Int. J. of Computational Science and Engineering (2007), Nr. 3, S. 238–243
- [Deh01] Dehler, Markus: *Entwicklungsstand der Logistik: Messung -- Determinanten -- Erfolgswirkungen*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2001 – ISBN 3663084671
- [DGE⁺12] Dekkers, Rob; Gerschberger, Markus; Engelhardt-Nowitzki, Corinna; Kummer, Sebastian; Staberhofer, Franz: *A model to determine complexity in supply networks*.

- In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 23 (2012), Nr. 8, S. 1015–1037 – DOI 10.1108/17410381211276853
- [DP09] Denk, Christine; Pfneissl, Thomas: *Komplexitätsmanagement: Konzeption, Erfolgspotentiale, Praxisfälle*, 1. Aufl. Wien: Linde Verlag, 2009 – ISBN 978 3 7143 0163 2
- [DWH⁺15] Deuse, Jochen; Weisner, Kirsten; Hengstebeck, André; Busch, Felix: *Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0*. In: Botthof, Alfons; Hartmann, Ernst Andreas (Hrsg.): *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2015 – ISBN 978-3-662-45914-0, S. 99–109
- [Dex11] Dexheimer, A.: *Forschung in der Sozialen Arbeit: ein Beitrag zu einem mehrdimensionalen methodologischen Fundament*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 2011 – ISBN 9783781518155
- [DIN02] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN199-T1*. Berlin, 2002
- [DRM08] Doch, Stefan; Rösch, Florian; Mayer, Axel: *Logistikmanagement im Anlauf*. In: Schuh, Günther; Stölzle, Wolfgang; Straube, Frank (Hrsg.): *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008 – ISBN 978-3-540-78406-7, S. 143–149
- [DS08] Dombrowski, Uwe; Schulze, Sven: *Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement – Neue Herausforderungen durch innovationsstarke Bauteile in langlebigen Primärprodukten*. In: Nyhuis, Peter (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008 – ISBN 978-3-540-75642-2, S. 439–462
- [DB13] Donner-Banzhoff, Norbert; Bösner, Stefan: *Innovationen verbreiten, optimieren und evaluieren: Ein Leitfaden zur interventionellen Versorgungsforschung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013 – ISBN 3642320406
- [Dor03] Doran, Desmond: *Supply chain implications of modularization*. In: *International Journal of Operations & Production Management* 23 (2003), Nr. 3, S. 316–326 – DOI 10.1108/01443570310462785
- [Dre97] Dreher, Dirk: *Logistik-Benchmarking in der Automobil-Branche: Ein Führungsinstrument zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit*. Köln: Eul Verlag, 1997 – ISBN 978-3890125206
- [Dul13] Duller, Christine: *Einführung in die Statistik mit EXCEL und SPSS: Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch*, überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2013 – ISBN 3642378595
- [EFS98] Ebeling, Werner; Freund, Jan; Schweitzer, Frank: *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*. Stuttgart: Teubner, 1998 – ISBN 9783815430323
- [Ebe00] Eberle, Rudolf: *Varianten-Controlling in der Automobil-Industrie Rudolf Eberle*. In: *Controlling und Management* 44 (2000), Nr. 6, S. 343–350 – DOI 10.1007/BF03249566
- [EKL07] Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo: *Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007 – ISBN 978-3540251651
- [ES09] Eigner, Martin; Stelzer, Ralph: *Product Lifecycle Management*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009 – ISBN 978-3-540-44373-5

- [ECH⁺10] Esposito Vinzi, Vincenzo; Chin, Wynne W.; Henseler, Jörg; Wang, Huiwen: *Handbook of Partial Least Squares*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010 – ISBN 978-3-540-32825-4
- [FKP⁺03] Fahrmeir, Ludwig; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard: *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. Vierte, verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003 – ISBN 366222657X
- [FHS16] Feldhütter, Veronika; Hawer, Sven; Steck, Corinna: *Impacts of product-driven complexity on the success of logistics in the automotive sector*. In: Roberto Teti (Hrsg.): *Procedia CIRP : 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16*, 2016
- [Fit06] Fitzek, Daniel: *Anlaufmanagement in Netzwerken: Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie*. Bern [u.a.]: Haupt, 2006 – ISBN 9783258069975
- [For22] Ford, Henry: *My life and work*. New York: Doubleday, 1922
- [Fre06] Fredriksson, Peter: *Operations and logistics issues in modular assembly processes: cases from the automotive sector*. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 17 (2006), Nr. 2, S. 168–186 – DOI 10.1108/17410380610642250
- [FW95] Frizelle, G.; Woodcock, E.: *Measuring complexity as an aid to developing operational strategy*. In: *International Journal of Operations & Production Management* 15 (1995), Nr. 5, S. 26–39 – DOI 10.1108/01443579510083640
- [Fro08] Frohm, Jörgen: *Levels of automation in production systems*. Dissertation. Göteborg: Chalmers Univ. of Technology, 2008
- [Fro12] Fromm, Sabine: *Datenanalyse mit SPSS für Fortgeschrittene 2: Multivariate Verfahren für Querschnittsdaten*. 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2012 – ISBN 3531187945
- [Gar12] Gartzzen, Thomas: *Diskrete Migration als Anlaufstrategie für Montagesysteme*. 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl, 2012 – ISBN 978-3863591007
- [GH07] Gehr, Frank; Hellingrath, Bernd: *Logistik in der Automobilindustrie: Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007 – ISBN 9783540681144
- [Gel96] Gell-Mann, Murray: *Das Quark und der Jaguar: Vom Einfachen zum Komplexen ; die Suche nach einer neuen Erklärung der Welt*. Unveränd. Taschenbuchausg. München, Zürich: Piper, 1996 – ISBN 978-3492222969
- [Gie13] Giereth, Sandra: *Innovationsblockaden in kleinen und mittelständischen Unternehmen: Einflussfaktoren und Lösungsansätze*. 1. Aufl. Hamburg: Disserta Verlag, 2013 – ISBN 3954252562
- [Gie10] Gießmann, M.: *Komplexitätsmanagement in der Logistik: kausalanalytische Untersuchung zum Einfluss der Beschaffungskomplexität auf den Logistikerfolg*. Lohmar: Eul, 2010. – ISBN 9783899369649
- [GL10a] Gießmann, Marco; Lasch, Rainer: *Der Einfluss der Beschaffungskomplexität auf den Logistikerfolg*. In: Bogaschewsky, Ronald (Hrsg.): *Supply Management Research : Aktuelle Forschungsergebnisse 2010*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2010 – ISBN 978-3-8349-2262-5, S. 149–196

- [Gil00] Gillham, Bill: *Case study research methods*. London: Continuum, 2000 – ISBN 1441159061
- [GL10b] Gläser, Jochen; Laudel, Grit: *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse: Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. 4. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwiss., 2010. – ISBN 9783531156842
- [Gol14] Golz, Jenny: *Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014 – ISBN 978-3-658-04067-3
- [GP95] Gomez, Peter; Probst, Gilbert: *Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens: Vernetzt denken, unternehmerisch handeln, persönlich überzeugen*. Bern: P. Haupt, 1995 – ISBN 3258051879
- [GBC92] Gopal, Abhijit; Bostrom, Robert P.; Chin, Wynne W.: *Applying Adaptive Structuration Theory to Investigate the Process of Group Support Systems Use*. In: *Journal of Management Information Systems* 9 (1992), Nr. 3, S. 45–69 – DOI 10.1080/07421222.1992.11517967
- [Göp12a] Göpfert, Ingrid: *Automobillogistik: Stand und Zukunftstrends*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012 – ISBN 978-3-8349-7081-7
- [Göp12b] Göpfert, Ingrid: *Trends in der Automobillogistik*. In: Göpfert, Ingrid; Braun, David; Schulz, Matthias (Hrsg.): *Automobillogistik : Stand und Zukunftstrends*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012 – ISBN 978-3-8349-7081-7, S. 1–28
- [GS12] Göpfert, Ingrid; Schulz, Matthias: *Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie*. In: Göpfert, Ingrid (Hrsg.): *Logistik der Zukunft: Logistics for the future*. 6., aktualisierte und überarb. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2012 – ISBN 3834968269
- [Göt07] Götz, A.: *Zukunftsstandort Deutschland*. In: *Automobil Produktion* (2007), Nr. 2, S. 16–19
- [GL04] Götz, Oliver; Liehr-Gobbers, Kerstin: *Analyse von Strukturgleichungsmodellen mit Hilfe der Partial-Least-Squares(PLS)-Methode*. In: *Die Betriebswirtschaft* (2004), Nr. 64, S. 714–738
- [Gro01] Große Entrup, Norbert: *Komplexitätsmanagement erfordert Varianten- und Kostentransparenz*. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb (Hrsg.): *Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2001, S. 23–37
- [GW04] Große-Heitmeyer, Volker; Wiendahl, Hans-Peter: *Einführung*. In: Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef; Keunecke, Lars (Hrsg.): *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004 – ISBN 978-3-642-18947-0, S. 3–17
- [Gro92] Grossmann, Christoph: *Komplexitätsbewältigung im Management: Anleitungen, integrierte Methodik und Anwendungsbeispiele*. Winterthur: Verl. GNC, 1992 – ISBN 9783952034101
- [Gro10] Grotkamp, Stefanie: *Bewertung von Produktstrukturkonzepten im Variantenmanagement*. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2010 – ISBN 978-3868536249
- [Grü04] Grünz, Lothar: *Ein Modell zur Bewertung und Optimierung der Materialbereitstellung*. Aachen: Shaker, 2004 – ISBN 9783832228811

- [GT07] Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst: *Produktion und Logistik*. 7., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007 – ISBN 3540741526
- [Gün08] Günthner, W. A.: *Ereignisorientierte Logistik : Ein neuer Ansatz zur Steuerung von Logistiksystemen*. In: Nyhuis, Peter (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008 – ISBN 3540756426, S. 373–390
- [Gut83] Gutenberg, Erich: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. 24., unveränd. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 1983 – ISBN 9783540056942
- [HRS11] Hair, Joe F.; Ringle, Christian M.; Sarstedt, Marko: *PLS-SEM: Indeed a Silver Bullet*. In: *The Journal of Marketing Theory and Practice* 19 (2011), Nr. 2, S. 139–152 – DOI 10.2753/MTP1069-6679190202
- [Hai14] Hair, Joseph F.: *A primer on partial least squares structural equations modeling (PLS-SEM)*. Los Angeles: SAGE, 2014 – ISBN 1452217440
- [Hau05] Hausen, Tobias: *Elektronischer Handel: Einbettung in Geschäftsbeziehungen und Supply Chains*. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2005 – ISBN 3-8350-0008-X
- [HBF16] Hawer, Sven; Braun, Hanna; Feldhütter, Veronika: *Modelling Production Systems with Methods from Structural Complexity Management: A new Complexity Management Tool*. In: Müller, Egon; Bullinger-Hofmann, Angelika (Hrsg.): *Vernetzt Planen und Produzieren 2016 Chemnitz: Smarte Fabrik & Smarte Arbeit - Industrie 4.0 gewinnt Kontur*, 2016
- [Hel14] Helfferich, Cornelia: *Leitfaden- und Experteninterviews*. In: Baur, Nina; Blasius, Jörg (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden : Springer, 2014 – ISBN 978-3-531-17809-7, S. 559–574
- [Hen05] Henseler, Jörg: *Einführung in die PLS-Pfadmodellierung*. In: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 34 (2005), Nr. 2, S. 70–75 – DOI 10.15358/0340-1650-2005-2-70
- [Her10] Herrmann, Christoph: *Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010 – ISBN 978-3-642-01421-5
- [Hir14] Hirsch-Kreinsen, Hartmut: *Wandel von Produktionsarbeit - "Industrie 4.0"*. In: *Soziologische Arbeitspapiere* (2014), Nr. 38, S. 421–429
- [Hoh00] Hohl, Joechim: *Das qualitative Interview*. In: *Journal of Public Health* 8 (2000), Nr. 2, S. 142–148 – DOI 10.1007/BF02962637
- [HD98] Homburg, Christian; Dobratz, A.: *Iterative Modellselektion in der Kausalanalyse*. In: Hildebrandt, Lutz; Homburg, Christian (Hrsg.): *Die Kausalanalyse : Ein Instrument der empirischen betriebswirtschaftlichen Forschung*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1998 – ISBN 9783791012100, S. 447–474
- [HH98] Homburg, Christian; Hildebrandt, Lutz: *Die Kausalanalyse: Bestandsaufnahme, Entwicklungsrichtungen, Problemfelder*. In: Hildebrandt, Lutz; Homburg, Christian (Hrsg.): *Die Kausalanalyse : Ein Instrument der empirischen betriebswirtschaftlichen Forschung*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1998 – ISBN 9783791012100, S. 15–43
- [HKP08] Homburg, Christian; Klarmann, Martin; Pflesser, Christian: *Konfirmatorische Faktorenanalyse*. In: Herrmann, Andreas (Hrsg.): *Handbuch Marktforschung : Methoden*,

- Anwendungen, Praxisbeispiele*. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden : Springer Gabler, 2008 – ISBN 3834903426, S. 271–304
- [HF08] ten Hompel, Michael; Follert, Guido: *Internet der Dinge - Autonomie in einem serviceorientierten Materialfluss*. In: Pfohl, Hans-Christian (Hrsg.): *Wissenschaft und Praxis im Dialog : Robuste und sichere Logistiksysteme*. Hamburg : Dt. Verkehrs-Verl., 2008 – ISBN 3871543810, S. S.178-193
- [HH11] ten Hompel, Michael; Heidenblut, Volker: *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. 3., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011 – ISBN 9783642199448
- [HH14] ten Hompel, Michael; Henke, Michael: *Logistik 4.0*. In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik : Anwendung, Technologien und Migration*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 – ISBN 978-3-658-04682-8, S. 615–624
- [HB08] Hüttenrauch, Mathias; Baum, Markus: *Effiziente Vielfalt: Die dritte Revolution der Automobilindustrie*. Berlin: Springer, 2008 – ISBN 3540721169
- [Ihm06] Ihme, Joachim: *Logistik im Automobilbau: Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*. München: Carl Hanser Verlag, 2006
- [JL13] Janssen, Jürgen; Laatz, Wilfried: *Statistische Datenanalyse mit SPSS: Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests*. 8. Aufl. Berlin u.a.: Springer Gabler, 2013 – ISBN 978-3-642-32507-6
- [JMP03] Jarvis, Cheryl Burke; Mackenzie, Scott B.; Podsakoff, Philip M.: *A Critical Review of Construct Indicators and Measurement Model Misspecification in Marketing and Consumer Research*. In: *Journal of consumer research; an interdisciplinary bimonthly* 30, 2003, S. 199–218
- [Jes97] Jeschke, Andrea: *Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion*, Dissertation, Braunschweig: Techn. Univ., 1997
- [JSH⁺11] Jonsson, Patrik; Stäblein, Thomas; Holweg, Matthias; Miemczyk, Joe: *Theoretical versus actual product variety: how much customisation do customers really demand?* In: *International Journal of Operations & Production Management* 31, 2011, Nr. 3, S. 350–370 – DOI 10.1108/01443571111111955
- [Jun05] Junge, Michael: *Controlling modularer Produktfamilien in der Automobilindustrie: Entwicklung und Anwendung der Modularisierungs-balanced-Scorecard*. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2005 – ISBN 9783824482269
- [JO08] Jürgen Jost, Jürgen; Olbrich, Eckehard: *Luhmanns Gesellschaftstheorie: Anregung und Herausforderung für eine allgemeine Theorie komplexer Systeme*. In: Baecker, Dirk (Hrsg.): *Zehn Jahre danach: Niklas Luhmanns "Die Gesellschaft der Gesellschaft"*. Stuttgart : Lucius & Lucius, 2008 – ISBN 978 3 8282 0449 2
- [Kag14] Kagermann, Henning: *Chancen von Industrie 4.0 nutzen*. In: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik : Anwendung, Technologien und Migration*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 – ISBN 978-3-658-04682-8, S. 603–614

- [Kai06] Kairies, Peter: *Professionelles Produkt Management für die Investitionsgüterindustrie: Praxis und moderne Arbeitstechniken ; mit zahlreichen Checklisten*. 8. Aufl. Renningen: Expert-Verl., 2006 – ISBN 9783816926160
- [Kai95] Kaiser, Andreas: *Integriertes Variantenmanagement mit Hilfe der Prozesskostenrechnung*. Dissertation, Hochschule Sankt Gallen, 1995
- [Kai14] Kaiser, Robert: *Qualitative Experteninterviews: Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung*. Wiesbaden: Springer, 2014 – ISBN 3658024798
- [Kan94] Kant Rao Richard R. Young: *Global Supply Chains*. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 24, 1994, Nr. 6, S. 11–19 – DOI 10.1108/09600039410066141
- [KR92] Karp, Aharon; Ronen, Boaz: *Improving shop floor control: an entropy model approach*. In: International Journal of Production Research 30, 1992, Nr. 4, S. 923–938 – DOI 10.1080/00207543.1992.9728465
- [Kel14] Kelle, Udo: *Mixed Methods*. In: Baur, Nina (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden : Springer VS, 2014
- [Kel16] Keller, Daniela: *Statistische Datenanalyse - die Grundlagen*. URL <https://www.statistik-und-beratung.de/wp-content/uploads/2018/05/E-Book-Grundlagen-180502.pdf>, Abrufdatum 22.06.2018
- [Kel77] Keller, Günter: *Über das Denken in Modellen: Ein Beitrag zur Didaktik der Chemie*. Frankfurt a.M: Diesterweg-Salle, 1977 – ISBN 9783425070278
- [Kes09] Kessler, Johannes: *Der Mythos vom globalen Dorf: Zur räumlichen Differenzierung des Globalisierungsniveaus*. In: Kessler, Johannes; Steiner, Christian (Hrsg.): *Facetten der Globalisierung : Zwischen Ökonomie, Politik und Kultur*. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, 2009 – ISBN 353191703X
- [KS03] Kirchhof, Robert; Specht, Dieter: *Ganzheitliches Komplexitätsmanagement: Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2003 – ISBN 978-3824477425
- [Kir08] Kirst, Phillip: *Lieferantenintegration im Produktentstehungsprozess*. In: Schuh, Günther; Stölzle, Wolfgang; Straube, Frank (Hrsg.): *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen: Ein Leitfaden für die Praxis*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008 – ISBN 978-3-540-78407-4, S. 93–105
- [Klu10] Klug, Florian: *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Berlin: Springer Verlag, 2010
- [Koe07] Koether, Reinhard: *Technische Logistik*. 3. Aufl. München: Hanser, 2007 – ISBN 3-446-40761-8
- [Koh97] Kohlhase, Nils: *Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen: Strategien, Methoden, Instrumente*. Düsseldorf: VDI-Verl., 1997 – ISBN 9783183275014
- [Kös98] Köster, Oliver: *Komplexitätsmanagement in der Industrie: Kundennähe und Effizienz in der Leistungserstellung*. Wiesbaden: DUV, Dt. Univ.-Verl., 1998 – ISBN 9783824404018

- [KSM00] Kota, Sridhar; Sethuraman, Kannan; Miller, Raymond: *A Metric for Evaluating Design Commonality in Product Families*. In: *Journal of Mechanical Design* 122 (2000), Nr. 4, S. 403 – DOI 10.1115/1.1320820
- [Kra13] Krallmann, Hermann: *Systemanalyse im Unternehmen: Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik*. 6., vollständig überarbeitete Auflage. München: Oldenbourg, 2013 – ISBN 3486717685
- [KFG02] Krallmann, Hermann; Frank, Helmut; Gronau, Norbert: *Systemanalyse im Unternehmen: Vorgehensmodelle, Modellierungsverfahren und Gestaltungsoptionen*. 4., vollst. überarb. Aufl. München, Wien: Oldenbourg, 2002 – ISBN 9783486272031
- [Kuc08] Kuckartz, Udo: *Qualitative Evaluation: Der Einstieg in die Praxis*. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Verl. für Sozialwiss., 2008 – ISBN 3531910833
- [Kuc10] Kuckartz, Udo: *Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten*. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, 2010 – ISBN 3531921266
- [Küp93] Küpper, H. U.: *Controlling-Konzept für die Logistik*. In: Männel, W. (Hrsg.): *Logistik-Controlling*. Wiesbaden : Gabler Verlag, 1993, S. 39–57
- [Kur04] Kurek, Rainer: *Erfolgsstrategien für Automobilzulieferer: Wirksames Management in einem dynamischen Umfeld*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004 – ISBN 9783642620645
- [Lam12] Lammers, Thorsten: *Komplexitätsmanagement für Distributionssysteme: Konzeption eines strategischen Ansatzes zur Komplexitätsbewertung und Ableitung von Gestaltungsempfehlungen*. 1. Aufl. Lohmar, Köln: Eul Verlag, 2012 – ISBN 3844101918
- [Lec12] Lechner, Annika: *Modellbasierter Ansatz zur Bewertung vielfaltsinduzierter Logistikkomplexität in der variantenreichen Serienfertigung der Automobilindustrie*. Dortmund: Verl. Praxiswissen, 2012 – ISBN 3869750618
- [Lin09] Lindemann, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009 – ISBN 9783642014222
- [LMB09] Lindemann, Udo; Maurer, Maik; Braun, Thomas: *Structural complexity management: An approach for the field of product design*. Berlin: Springer, 2009 – ISBN 978-3-540-87889-6
- [Lin94] Lingnau, Volker: *Variantenmanagement: Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie*. Berlin: E. Schmidt, 1994 – ISBN 9783503036196
- [LW12] Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. In: *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012
- [Lüb07] Lübke, Ekkehard: *Lebenszyklusorientiertes Produktstrukturmanagement: Eine theoretische und empirische Untersuchung*. Dissertation. München, Techn. Univ., 2007 – ISBN 9783937236650
- [LBM07] Lucko, Andreas; Brockmeyer, Henrich; Mantwill, Frank: *Frühzeitige Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im automobilen Karosseriebau-Das Projekt Pro2Kar*. In: *Proceedings of the 18th Symposium on Design for X*, 2007, S. 53 – 64

- [LF97] Luczak, H.; Fricker, A.: *Komplexitätsmanagement - ein Mittel der strategischen Unternehmensgestaltung*. In: Schuh, Günther; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Komplexität und Agilität: Steckt die Produktion in der Sackgasse?* Berlin, Heidelberg : Springer, 1997 – ISBN 978-3-642-60841-4, S. 309–323
- [Lud01] Ludwig, Bjørn: *Management komplexer Systeme: Der Umgang mit Komplexität bei unvollkommener Information: Methoden, Prinzipien, Potentiale*. Berlin: Ed. Sigma, 2001 – ISBN 978-3894049546
- [Luh84] Luhmann, Niklas: *Soziale Systeme: Grundriss einer allgemeinen Theorie*. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1984 – ISBN 9783518577004
- [Mal96] Malik, Fredmund: *Strategie des Managements komplexer Systeme: Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme*. 5. Aufl. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt, 1996 – ISBN 978-3-258-07396-5
- [Mar07] Marti, Michael: *Complexity Management: Optimizing Product Architecture of Industrial Products*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2007 – ISBN 9783835054356
- [Mas10] Masak, Dieter: *Der Architekturreview: Vorgehensweise, Konzepte und Praktiken*. Berlin: Springer, 2010 – ISBN 3642016588
- [Mau07] Maurer, Maik S.: *Structural awareness in complex product design*. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2007 – ISBN 3899636325
- [May00] Mayer, Alexander G.: *Strategische Unternehmensnetzwerke und Marketing: Aufbau und Management von marktorientierten strategischen Interorganisationsbeziehungen*. Regensburg: Roderer, 2000 – ISBN 9783897832008
- [May07] Mayer, Axel: *Modularisierung der Logistik: ein Gestaltungsmodell zum Management von Komplexität in der industriellen Logistik*. 1. Aufl.: Berlin : Univ.-Verl. der Techn. Univ, 2007 – ISBN 3798320543
- [May10] Mayring, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. 11., aktual. u. überarb. Aufl. Weinheim: Beltz, 2010 – ISBN 3407291426
- [May15] Mayring, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. 12., Neuausgabe, 12., vollständig überarbeitete und aktualisierte Aufl. Weinheim, Beltz, 2015 – ISBN 3407257309
- [MS07] Meepetchdee, Yongyut; Shah, Nilay: *Logistical network design with robustness and complexity considerations*. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 37 (2007), Nr. 3, S. 201–222 – DOI 10.1108/09600030710742425
- [MBK13] Meffert, Heribert; Burmann, Christoph; Kirchgeorg, Manfred: *Marketing: Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung; Konzepte - Instrumente - Praxisbeispiele*. 11., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2013 – ISBN 3834927600
- [Mei09] Meissner, Sebastian: *Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung*. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, 2009 – ISBN 978-3981181999

- [MLP⁺11] Meyen, Michael; Löblich, Maria; Pfaff-Rüdiger, Senta; Riesmeyer, Claudia: *Qualitative Forschung in der Kommunikationswissenschaft: Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / Springer Fachmedien, 2011 – ISBN 3531928295
- [Mey07] Meyer, Christian Martin: *Integration des Komplexitätsmanagements in den strategischen Führungsprozess der Logistik*. 1. Aufl. Bern [u.a.]: Haupt, 2007 – ISBN 9783258071978
- [Mil01] Milgate, Michael: *Supply chain complexity and delivery performance: an international exploratory study*. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 6 (2001), Nr. 3, S. 106–118 – DOI 10.1108/13598540110399110
- [MSG07] Mößmer, H. E.; Schedlbauer, M.; Günthner, W. A.: *Die automobile Welt im Umbruch*. In: Günthner, Willibald A (Hrsg.): *Neue Wege in der Automobillogistik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007 – ISBN 978-3-540-72404-9, S. 3–15
- [Mot09] Motus, Daniel: *Referenzmodell für die Montageplanung in der Automobilindustrie*. München: Utz, 2009 – ISBN 978-3-8316-0860-7
- [Mül07] Müller, Dirk: *Moderatoren und Mediatoren in Regressionen*. In: Albers, Sönke: *Methodik der empirischen Forschung*, Berlin Heidelberg: Springer, 2007
- [Nic79] Nicolai, Manfred: *Rechnerunterstützte Variantenkonstruktion von Baugruppen: Vom Lösungskonzept zur Programmstruktur*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1979 – ISBN 978-3184004163
- [NPR87] Nicolis, G.; Prigogine, I.; Rebhan, Eckhard: *Die Erforschung des Komplexen: Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften*. München: Piper Verlag, 1987 – ISBN 9783492030755
- [NM] North, Michael J.; Macal, Charles M.: *Managing business complexity: Discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulation*. Oxford u.a.: Oxford Univ. Press, 2007 – ISBN 978-0-19-517211-9
- [OB05] Olbrich, Rainer; Battenfeld, Dirk: *Variantevielfalt und Komplexität — kostenorientierte vs. marktorientierte Sicht*. In: *der Markt* 44 (2005), 3-4, S. 161–173 – DOI 10.1007/BF03032078
- [PBF⁺05] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2005 – ISBN 364229569X
- [Pat82] Patzak, Gerold: *Systemtechnik -- Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982 – ISBN 3642818935
- [Paw07] Pawellek, Günther: *Produktionslogistik: Planung - Steuerung - Controlling : mit 42 Übungsfragen*. München: Hanser, 2007 – ISBN 3446410570
- [Pep06] Pepels, Werner: *Produkt- und Preismanagement im Firmenkundengeschäft*. 1. Aufl. München: Oldenbourg, 2006 – ISBN 978-3486578799
- [Pfe97] Pfeifer, Wolfgang: *Etymologisches Wörterbuch des Deutschen*. 2. Aufl. München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1997 – ISBN 978-3423033589
- [Pfo10] Pfohl, Hans-Christian: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8., neu bearb. u. aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010 – ISBN 3642041620

- [PH84] Pfohl, Hans-Christian; Hoffmann, H.: *Logistik-Controlling*. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft Ergänzungsheft 2 (1984), S. 42–69
- [PH04] Pil, Frits K.; Holweg, Matthias: *Linking Product Variety to Order-Fulfillment Strategies*. In: Interfaces 34 (2004), Nr. 5, S. 394–403 – DOI 10.1287/inte.1040.0092
- [Pil98] Piller, Frank Thomas: *Kundenindividuelle Massenproduktion: Die Wettbewerbsstrategie der Zukunft*. München, Wien: Hanser, 1998 – ISBN 978-3446193369
- [PW99] Piller, Frank Thomas; Waringer, Daniela: *Modularisierung in der Automobilindustrie: Neue Formen und Prinzipien; modular sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitätsmanagements*. Aachen: Shaker, 1999 – ISBN 9783826558276
- [Plü03] Plümer, Thomas: *Logistik und Produktion*. München, Wien: Oldenbourg, 2003 – ISBN 3-486-27470-8
- [Por13] Porter, Michael E.: *Wettbewerbsstrategie: Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*. Frankfurt: Campus Verlag, 2013
- [Rap99] Rapp, Thomas: *Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, Gabler, 1999 – ISBN 9783824470105
- [Rat93] Rathnow, Peter J.: *Integriertes Variantenmanagement: Bestimmung, Realisierung und Sicherung der optimalen Produktvielfalt*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1993 – ISBN 9783525125694
- [Rau99] Raufeisen, Michael: *Konzept zur Komplexitätsmessung des Auftragsabwicklungsprozesses: Eine empirische Untersuchung*. München: TCW-Transfer-Centrum, 1999 – ISBN 9783931511814
- [Rei92] Reibnitz, Ute von: *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 1992 – ISBN 9783409134316
- [Rei14] Reichertz, Jo: *Empirische Sozialforschung und soziologische Theorie*. In: Baur, Nina (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer VS, 2014, S. 65–80
- [Ren07] Rennemann, Thomas: *Logistische Lieferantenauswahl in globalen Produktionsnetzwerken: Rahmenbedingungen, Aufbau und Praxisanwendung eines kennzahlenbasierten Entscheidungsmodells am Beispiel der Automobilindustrie*, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2007
- [Ren07] Renner, Ingo: *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*. München: Verl. Dr. Hut, 2007 – ISBN 3899635671
- [RBW⁺06] Ringle, Christian M.; Boysen, Nils; Wende, Sven; Will, Alexander: *Messung von Kausalmodellen mit dem Partial-Least-Squares-Verfahren*. In: Das Wirtschaftsstudium: wisu ; Zeitschrift für Ausbildung, Prüfung, Berufseinstieg und Fortbildung (2006), Nr. 35, S. 81–88
- [Rop09] Ropohl, Günter: *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe Universitätsbibliothek, 2009
- [ROS07] Rosen, Robert: *Complexity as a system property*. In: International Journal of General Systems 3 (2007), Nr. 4, S. 227–232 – DOI 10.1080/03081077708934768

- [RK09] Rossiter Hofer, Adriana; Knemeyer, A. Michael: *Controlling for logistics complexity: Scale development and validation*. In: The International Journal of Logistics Management 20 (2009), Nr. 2, S. 187–200 – DOI 10.1108/09574090910981288
- [Sch95a] Schäfer, Jutta: *Glossar qualitativer Verfahren*. Berlin: BFPH, 1995
- [Sch05a] Schlott, S.: *Wahnsinn mit Methode*. In: Automobil Produktion 1 (2005), S. 38–42.
- [Sch90] Schmidt, Thomas B.: *Die Bestimmung der optimalen Sortimentstiefe für einen Konsumgüterhersteller*. Dissertation. Universität Köln, 1990
- [Sch08] Schneider, Markus: *Logistikplanung in der Automobilindustrie: Konzeption eines Instruments zur Unterstützung der taktischen Logistikplanung vor "Start-of-Production" im Rahmen der Digitalen Fabrik*. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2008 – ISBN 3834999008
- [Sch10] Schoeller, Nicolas: *Internationales Komplexitätsmanagement in der Automobilindustrie: Strategische Ausrichtung im Bezugsrahmen - Komplexitätsreduzierung durch Kommunalitäten - Einsatz von Produkt-, Technologie- und Designkommunalitäten*. neue Ausg. Saarbrücken: Suedwestdeutscher Verlag fuer Hochschulschriften, 2010 – ISBN 978-3838114217
- [Sch14] Schoeneberg, Klaus-Peter: *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2014
- [SPB+06] Scholz-Reiter, Bernd; Philipp, Thorsten; Beer, Christoph de; Windt, Katja; Freitag, Michael: *Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen*. In: Pfohl, Hans-Christian (Hrsg.): *Wissenschaft und Praxis im Dialog : Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung*. Hamburg : Deutscher Verkehrs-Verlag, 2006 – ISBN 3-8715-4340-3, S. 11–25
- [SL15] Schöttl, Florian; Lindemann, Udo: *Quantifying the Complexity of Socio-technical Systems – A Generic, Interdisciplinary Approach*. In: Procedia Computer Science 44 (2015), S. 1–10 – DOI 10.1016/j.procs.2015.03.019
- [SAB+10] Schuh, G.; Arnoscht, J.; Bender, D.; Schiffer, M.: *Produktkomplexität managen: Arbeitskreis am WZL gibt neue Denkanstöße. Die Industrie hat das Potenzial inzwischen erkannt*. URL <http://industrieanzeiger.industrie.de/management/die-industrie-hat-das-potenzial-inzwischen-erkannt/> – Überprüfungsdatum 2017-03-20
- [SLN10] Schuh, G.; Lenders, M.; Nußbaum, C.: *KOMPLEXITÄTSMANAGEMENT - Maximaler Wirkungsgrad von Produktkomplexität*. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010), S. 473–477
- [Sch88] Schuh, Günther: *Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten: Ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten*. Dissertation. Aachen, RWTH Aachen. Dissertation, 1988
- [Sch05b] Schuh, Günther: *Produktkomplexität managen: Strategien; Methoden; Tools*. 1. Aufl., München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2005 – ISBN 3446443541
- [SKA13] Schuh, Günther; Krumm, Stephan; Amann, Wolfgang: *Chefsache Komplexität: Navigation für Führungskräfte*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013 – ISBN 978-3-658-01614-2

- [SSS08] Schuh, Günther; Stölzle, Wolfgang; Straube, Frank: *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008 – ISBN 978-3-540-78406-7
- [Sch92] Schulte, Christof: Komplexitätsmanagement. In: Schulte, Christof (Hrsg.): *Effektives Kostenmanagement : Methoden und Implementierung*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 1992 – ISBN 3820206876
- [Sch09] Schulte, Christof: *Logistik: Wege zur Optimierung der supply chain*. 5. Aufl. München: Vahlen, 2009 – ISBN 9783800635160
- [Sch95b] Schulte, Christoph: *Komplexitätsmanagement*. In: Corsten, H.; Reiß, M. (Hrsg.): *Handbuch der Unternehmensführung*. Wiesbaden : Gabler, 1995, S. 757–765
- [See10] Seeck, Stephan: *Erfolgsfaktor Logistik: Klassische Fehler erkennen und vermeiden*. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien, 2010. – ISBN 3834989843
- [See04] Seel, Andrea: *Einführung in die qualitative Forschung*. unveröffentlichte Vortragsunterlage vom 15.03.2004, Graz
- [Sha48] Shannon, C. E.: *A Mathematical Theory of Communication*. In: Bell System Technical Journal 27 (1948), Nr. 3, S. 379–423 – DOI 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- [Sin14] Sinha, Kaushik: *Structural Complexity and its Implications for Design of Cyber-Physical Systems*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2014
- [SEC+06] Sivadasan, S.; Efstathiou, J.; Calinescu, A.; Huatuco, L. Huaccho: *Advances on measuring the operational complexity of supplier–customer systems*. In: European Journal of Operational Research 171 (2006), Nr. 1, S. 208–226 – DOI 10.1016/j.ejor.2004.08.032
- [Sta08] Stabenau, Hanspeter: *Zukunft braucht Herkunft! - Entwicklungslinien und Zukunftsperspektiven der Logistik*. In: Baumgarten, Helmut (Hrsg.): *Das Beste der Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008 – ISBN 978-3-540-78404-3
- [Stä11] Stäblein, Thomas: *Vorlesung 2 - The impact of Product Variety on Manufacturing Operations. Operations & Research Planning in the Automotive Industry*. Vorlesungsskript, München, 2011
- [Sta73] Stachowiak, Herbert: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer-Verlag, 1973 – ISBN 978-3211811061
- [Ste14] Stein, Petra: *Forschungsdesigns für die quantitative Sozialforschung*. In: Baur, Nina (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer VS, 2014, S. 135–151
- [TS01] Tang, Victor; Salminen, Vesa: *Towards a theory of complicatedness: Framework for complex systems analysis and design*. In: 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001
- [Tar13] Tarride, Mario Iván: *The complexity of measuring complexity*. In: Kybernetes 42 (2013), Nr. 2, S. 174–184 – DOI 10.1108/03684921311310558
- [TE11] Tücks, Gregor; Eilers, Jan: *Komplexitätsbeherrschung durch wandlungsfähige Produktion*. In: Complexity Management Journal (2011), S. 4–9

- [Ulr70] Ulrich, Hans: *Die Unternehmung als produktives soziales System : Grundlagen der allgemeinen Unternehmungslehre*. 2. Aufl. Bern [u.a.]: Haupt, 1970
- [UP95] Ulrich, Hans; Probst, Gilbert J. B.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte*. 4. Aufl. Bern [u.a.]: Haupt, 1995 – ISBN 3258051828
- [VS05] Vahrenkamp, R.; Siepermann, C.: *Logistik. Management und Strategien*. Oldenbourg: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005
- [VDI76] VDI/REFA (Hrsg.): *Elektronische Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung und -steuerung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1976 – ISBN 3184030776
- [Wag07] Wagenitz, Axel: *Modellierungsmethode zur Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität Dortmund, 2007
- [WW05] Wallenburg, CarlMarcus; Weber, Jürgen: *Structural equation modeling as a basis for theory development within logistics and supply chain management research*. In: Kotzab, Herbert; Seuring, Stefan; Müller, Martin; Reiner, Gerald (Hrsg.): *Research Methodologies in Supply Chain Management* : Physica-Verlag HD, 2005 – ISBN 978-3-7908-1583-2, S. 171–186
- [WZW*11] Wang, He; Zhu, Xiaowei; Wang, Hui; Hu, S. Jack; Lin, Zhongqin; Chen, Guanlong: *Multi-objective optimization of product variety and manufacturing complexity in mixed-model assembly systems*. In: *Journal of Manufacturing Systems* 30 (2011), Nr. 1, S. 16–27 – DOI 10.1016/j.jmsy.2011.03.002
- [Wan14] Wannenwetsch, Helmut: *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung*. 5., neu bearb. Aufl. 2014. Berlin: Springer Vieweg, 2014 – ISBN 3642450237
- [Web93] Weber, Jürgen: *Praxis des Logistik-Controlling*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993 – ISBN 3-7910-0643-6
- [WKP06] Weiber, Rolf; Kollmann, Tobias; Pohl, Alexander: *Das Management technologischer Innovationen*. In: Kleinaltenkamp, Michael; Plinke, Wulff; Jacob, Frank; Sö, Albrecht (Hrsg.): *Markt- und Produktmanagement* : Gabler, 2006 – ISBN 978-3-8349-0091-3, S. 83–207
- [WM14a] Weiber, Rolf; Mühlhaus, Daniel: *Strukturgleichungsmodellierung: Eine anwendungsorientierte Einführung in die Kausalanalyse mit Hilfe von AMOS, SmartPLS und SPSS*. 2., erw. und korr. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2014 – ISBN 3642350127
- [WM14b] Weiber, Rolf; Mühlhaus, Daniel: *Methoden der Strukturgleichungsanalyse (SGA)*. In: Weiber, Rolf; Mühlhaus, Daniel (Hrsg.): *Strukturgleichungsmodellierung : Eine anwendungsorientierte Einführung in die Kausalanalyse mit Hilfe von AMOS, SmartPLS und SPSS*. 2., erw. und korr. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg : Springer Gabler, 2014 – ISBN 3642350127, S. 21–81
- [Wer07] Werth, D.: *Modellierung unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse: (Modelle, Notationen und Vorgehen für prozessorientierte Unternehmensverbände)*. Hamburg: Salzwasser-Verlag, 2007 – ISBN 9783867410731
- [WK01] Westphal, Jan R.; Kummer, Sebastian: *Komplexitätsmanagement in der Produktionslogistik: ein Ansatz zur flussorientierten Gestaltung und Lenkung heterogener Produktionssysteme*. 1. Aufl.: Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl, 2001 – ISBN 3824474751

- [WG04] Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef: *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004 – ISBN 978-3-642-18947-0
- [Wie48] Wiener, Norbert: *Cybernetics or the control and communication in the animal and the machine*. Boston: MIT Press, 1948
- [Wil98] Wildemann, Horst: *Komplexitätsmanagement durch Prozeß- und Produktgestaltung*. In: Adam, Dietrich (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement*. Wiesbaden : Gabler, 1998 – ISBN 9783409179386, S. 47–68
- [Wil08a] Wildemann, Horst: *Komplexitätsmanagement: In Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion*. 9. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum, 2008 – ISBN 978-3-931511-30-2
- [Wil08b] Wildemann, Horst: *Produktordnungssysteme: Leitfaden zur Standardisierung und Individualisierung des Produktprogramms durch intelligente Plattformstrategien*. 7. Aufl. München: TCW, 2008 – ISBN 3934155405
- [Wil08c] Wildemann, Horst: *Variantenmanagement: Leitfaden zur Komplexitätsbeherrschung*. 16. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum-Verl, 2008 – ISBN 978-3-929918-17-5
- [Wil09] Wildemann, Horst: *Produkte und Services entwickeln und managen: Strategien, Konzepte, Methoden*. 1. Auflage. München: TCW Transfer-Centrum-Verl, 2009
- [Wil10] Wildemann, Horst: *Logistik Prozeßmanagement: Organisation und Methoden*. 5. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum-Verl., 2010 – ISBN 978-3-934155-61-9
- [WV11] Wildemann, Horst; Voigt, Kai-Ingo: *Komplexitätsindex-Tool: Entscheidungsgrundlagen für die Produktprogrammgestaltung bei KMU*. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag, 2011 – ISBN 9783941967090
- [WBA06] Wilding, Richard; Blecker, Thorsten; Abdelkafi, Nizar: *Complexity and variety in mass customization systems: analysis and recommendations*. In: *Management Decision* 44 (2006), Nr. 7, S. 908–929 – DOI 10.1108/00251740610680596
- [WPB08] Windt, K.; Philipp, T.; Böse, F.: *Complexity cube for the characterization of complex production systems*. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21 (2008), Nr. 2, S. 195–200 – DOI 10.1080/09511920701607725
- [Wol88] Wolfram, S.: *Complex systems theory*. In: *Emerging Synthesis in Science, 1988*, S. 183–189
- [Wyc09] Wycisk, Christine: *Flexibilität durch Selbststeuerung in logistischen Systemen: Entwicklung eines realoptionsbasierten Bewertungsmodells*. Wiesbaden: Gabler, 2009
- [Zen06] Zenner, Christian: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung*. Dissertation. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM, 2006 – ISBN 978-3-930429-66-0
- [Zie06] Zielowski, Christian: *Managementkonzepte aus Sicht der Organisationskultur*. 1. Aufl. s.l.: Wiesbaden: DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 2006.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|---|
| AKL | Automatisches Kleinteilelager |
| AVE | Average Variance Extracted |
| BL | Blocklager |
| CAD | Computer-aided Design |
| CAE | Computer-aided Engineering |
| CAM | Computer-aided Manufacturing |
| CPS | Cyber-physisches-System |
| DSM | Design Structure Matrix |
| EHB | Elektrohängebahn |
| EM | Expectation Maximization |
| FMEA | Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse |
| GROMA | Großmarkt |
| HRL | Hochregallager |
| JIS | Just in Sequence |
| KLT | Kleinladungsträger |
| KMU | Kleine und mittlere Unternehmen |
| KSG | Kovarianzstrukturgleichungsanalyse |
| LCI | Life Cycle Impulse |
| LV | Latente Variable |
| MGS | Messgleichungssystem |
| MILP | Mixed Integer linear Programming |
| MV | Manifeste Variable |
| OEM | Original Equipment Manufacturer |
| PEP | Produktentstehungsprozess |
| PLS | Partial Least Squares |
| PLS-SGM | Partial-Least-Squares-Strukturgleichungsmodellierung |
| QFD | Quality Function Deployment |
| REFA | Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung |

| | |
|------|----------------------------------|
| RFID | Radio-frequency Identification |
| RL | Regallager |
| SA | Sonderausstattung |
| SCM | Supply Chain Management |
| SGA | Strukturgleichungsanalyse |
| SGM | Strukturgleichungsmodell |
| SGS | Strukturgleichungssystem |
| SNR | Sachnummer |
| SOP | Start of Production |
| SUMA | Supermarkt |
| TF | Teilefamilie |
| VSG | Varianzstrukturgleichungsanalyse |
| WIP | Work in Progress |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abb. 1.1: Bedeutung der Logistik für einzelne Wirtschaftsbereiche (nach [Göp12b], S. 7) ..1 | |
| Abb. 1.2: Vorgehensmodell zur Beantwortung der Forschungsfragen inkl. verwendeter Forschungsmethoden.....6 | 6 |
| Abb. 1.3: Aufbau der Arbeit | 8 |
| Abb. 2.1: Funktionelle Abgrenzung von Logistiksystemen nach den Phasen des Güterflusses am Beispiel eines Industrieunternehmens (nach [Pfo10], S. 19).....11 | 11 |
| Abb. 2.2: Planungsumfänge der Logistik im PEP (nach [DRM08], S. 145; [Klu10], S. 79)14 | 14 |
| Abb. 2.3: Innovationszyklen in der Automobilindustrie (nach [Sch10], S. 3).....17 | 17 |
| Abb. 3.1: Begriffsdefinition Komplexität (nach [Ren07], S. 21) | 22 |
| Abb. 3.2: Vier grundsätzliche Systemtypen (nach [UP95], S. 61) | 24 |
| Abb. 3.3: Kybernetischer Regelkreis (nach [Her10], S. 103; [Bae74], S. 27) | 25 |
| Abb. 3.4: Interne und externe Komplexität (nach [Sch05b], S. 13) | 27 |
| Abb. 3.5: Quellen der Unsicherheiten bei Automobilherstellern (nach [Lec12], S. 25).....29 | 29 |
| Abb. 3.6: Aspekte der Komplexität in der Produktentwicklung (nach [LMB09], S. 5) | 31 |
| Abb. 3.7: Kostenstruktur eines Automobilherstellers (nach [Wil08c], S. 226) | 32 |
| Abb. 3.8: Auswirkungen von Komplexität auf Unternehmen.....33 | 33 |
| Abb. 3.9: Das optimale Komplexitätsniveau (nach [Boh98], S. 52).....35 | 35 |
| Abb. 3.10: Der Teufelskreis der Komplexität (nach [Wil08c], S. 13).....35 | 35 |
| Abb. 3.11: Aktivitätsfelder im Rahmen eines Komplexitätsmanagements | 37 |
| Abb. 3.12: Theoretische Varianz ausgewählter Fahrzeuge (nach [PH04], S. 395).....40 | 40 |
| Abb. 3.13: Kostenwirksamkeit der Variantenbildung (nach [Klu10], S. 56).....43 | 43 |
| Abb. 3.14: Kostenbeeinflussungspotenzial und kumulierte Kostenentstehung (nach [EKL07], S. 10).....44 | 44 |
| Abb. 3.15: Strategien und Methoden des Variantenmanagements | 45 |
| Abb. 3.16: Haupt- und Submodule eines Automobils (nach [HB08], S. 136).....48 | 48 |
| Abb. 3.17: Volkswagen Plattform PQ35 (nach [Stä11], S. 27; [Wan14], S. 413).....50 | 50 |
| Abb. 3.18: Einsparpotenziale der Plattformstrategie (nach [MBK13], S. 1332) | 51 |
| Abb. 3.19: Drei Komplexitätsdimensionen | 53 |
| Abb. 3.20: Unternehmenskomplexität in Anlehnung an [Gie10] | 54 |
| Abb. 4.1: Komplexitätswürfel, nach [WPB08].....59 | 59 |
| Abb. 4.2: Struktureller Komplexitätsvektor für Produktionssysteme (nach [SPB ⁺ 06]).....60 | 60 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 4.3: Netzwerkverbindungen | 62 |
| Abb. 4.4: Baumdiagramm mit Systemkomponenten (nach [Bal81]) | 63 |
| Abb. 5.1: Beispiel für einen Boxplot, in Anlehnung an [Kel16] | 77 |
| Abb. 5.2: Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade ([Fro12], S. 86) | 80 |
| Abb. 5.3: Beispiel für ein Pfadmodell, in Anlehnung an ([GL04], S. 716) | 82 |
| Abb. 5.4: Methoden der Strukturgleichungsanalyse [WM14b] | 83 |
| Abb. 5.5: Zentrale Unterschiede zwischen dem kovarianzanalytischen und dem varianzanalytischen Ansatz zur Kausalanalyse (nach [WM14a], S. 74; [Gie10], S. 170) | 84 |
| Abb. 5.6: Vergleich von formativem und reflektivem Messmodell an einem Beispiel, in Anlehnung an [RBW ⁺ 06]. | 85 |
| Abb. 5.7: Darstellung einer Moderatorbeziehung. Unterschiedliche Niveaus und Steigungen für verschiedene Gruppen, in Anlehnung an ([Mül07], S. 246). | 88 |
| Abb. 5.8: Systematischer Prozess der PLS-Strukturgleichungsmodellierung, in Anlehnung an ([Hai14], S. 25) | 89 |
| Abb. 6.1: Literaturübersicht der Komplexitätstreiber | 91 |
| Abb. 6.2: Ausschnitt aus der qualitativen Inhaltsanalyse in Microsoft Excel | 99 |
| Abb. 6.3: Systemtheoretische Einordnung der Produktkomplexität (in Anlehnung an [GL10a], S. 162) | 100 |
| Abb. 6.4: Systemtheoretische Einordnung der strukturellen Komplexitätstreiber (in Anlehnung an [GL10a], S. 162) | 103 |
| Abb. 6.5: Systemtheoretische Einordnung der Netzwerkkomplexität (in Anlehnung an [GL10a], S. 162) | 107 |
| Abb. 7.1: Finale Auswahl der Komplexitätstreiber für die Kausalanalyse | 113 |
| Abb. 7.2: Auswahl logistischer Kennzahlen für die Kausalanalyse | 114 |
| Abb. 7.3: Histogramm für die Variable Anzahl_Anläufe (aus <i>SPSS Statistics</i>) | 116 |
| Abb. 7.4: Boxplot der Variable Einheiten_pro_Stunde (aus <i>SPSS Statistics</i>) | 116 |
| Abb. 7.5: Auszug der Korrelationsmatrix nach Spearman | 118 |
| Abb. 7.6: Vollständiges Pfaddiagramm für Produktkomplexität inkl. Hypothesen (nach [FHS16]) | 125 |
| Abb. 7.7: Vollständiges Pfadmodell für Netzwerkkomplexität inkl. Hypothesen | 126 |
| Abb. 7.8: Vollständiges Pfadmodell für Struktur- und Prozesskomplexität inkl. Hypothesen | 127 |
| Abb. 7.9: Einflussportfolio nach Lindemann ([Lin09], S. 77) | 143 |
| Abb. 7.10: Einflussmatrix der Komplexitätstreiber nach paarweisem Vergleich (nach [HBF16], S. 8) | 144 |
| Abb. 7.11: Einflussportfolio der Komplexitätstreiber (nach [HBF16], S. 9) | 146 |

| | |
|---|-----|
| Abb. 8.1: Dimensionen des Komplexitätsvektors (eigene Darstellung)..... | 151 |
| Abb. 8.2: Realisierung der Berechnungslogik in Excel am Bsp. von Strukturkomplexität für Werk A im Jahr 2015 (in Anlehnung an [FHS16]) | 159 |
| Abb. 8.3: Werkevergleich Produktkomplexität..... | 160 |
| Abb. 8.4: Werkevergleich Netzwerkkomplexität | 161 |
| Abb. 8.5: Werkevergleich Strukturkomplexität | 162 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tab. 1.1: Anforderungssystem für das zu entwickelnde Bewertungsinstrument..... | 5 |
| Tab. 3.1: Ansätze zur Klassifikation der Komplexität | 27 |
| Tab. 3.2: Variantenarten (nach [Gro10], S. 5; [Nic79], S. 5; [Sch88], S. 10 f.; [Bar94], S. 48 f.; [Zen06], S. 79 ff.) | 39 |
| Tab. 3.3: Technische Maßnahmen zur Verringerung der Teilevielfalt (nach [Sch05b], S. 125 ff.; [Boh98], S. 241 ff.)..... | 46 |
| Tab. 5.1: Skalenniveaus der Untersuchungsvariablen, in Anlehnung an ([FKP ⁺ 03], S. 15) .. | 69 |
| Tab. 5.2: Merkmale reaktiver Verfahren, in Anlehnung an ([MLP ⁺ 11], S. 60) | 70 |
| Tab. 5.3: Statistische Grundbegriffe, in Anlehnung an ([FKP ⁺ 03], S 15; [Cle15], S. 19) | 74 |
| Tab. 5.4: Korrelationsintensität, in Anlehnung an ([WM14a], S. 15)..... | 79 |
| Tab. 5.5: Entscheidungskriterien zur Identifikation von reflektiven und formativen Messmodellen, in Anlehnung an ([JMP], S. 203). | 85 |
| Tab. 6.1: Kriterien zur Bestimmung der Befragungsart mit jeweiliger Ausprägung in Bezug auf die Forschungsfragen dieser Arbeit, in Anlehnung an ([MLP ⁺ 11], S. 86)..... | 93 |
| Tab. 6.2: Übersicht der Experteninterviews | 94 |
| Tab. 6.3: Entstandene Kategorien der qualitativen Inhaltsanalyse | 97 |
| Tab. 7.1: Fehlende Werte der Variablen in Prozent | 117 |
| Tab. 7.2: Hypothesensystem für Produktkomplexität | 120 |
| Tab. 7.3: Hypothesensystem für Netzwerkkomplexität | 122 |
| Tab. 7.4: Hypothesensystem für Struktur-/Prozesskomplexität..... | 122 |
| Tab. 7.5: Schätzergebnisse der Messmodelle für Produktkomplexität | 128 |
| Tab. 7.6: Schätzergebnisse der Messmodelle für Netzwerkkomplexität..... | 129 |
| Tab. 7.7: Schätzergebnisse der Messmodelle für Struktur-/Prozesskomplexität..... | 130 |
| Tab. 7.8: Gesamteffekte des PLS-Pfadmodells für Produktkomplexität..... | 131 |
| Tab. 7.9: Gesamteffekte des PLS-Pfadmodells für Netzwerkkomplexität | 133 |
| Tab. 7.10: Gesamteffekte des PLS-Pfadmodells für Struktur-/Prozesskomplexität | 134 |
| Tab. 7.11: Gütemaße der Messmodelle für Produktkomplexität | 136 |
| Tab. 7.12: Gütemaße der Messmodelle für Netzwerkkomplexität | 137 |
| Tab. 7.13: Gütemaße der Messmodelle für Struktur-/Prozesskomplexität..... | 137 |
| Tab. 7.14: Bestimmtheitsmaß der endogenen Konstrukte für Produktkomplexität | 138 |
| Tab. 7.15: Bestimmtheitsmaß der endogenen Konstrukte für Struktur-/Prozesskomplexität..... | 139 |

| | |
|---|-----|
| Tab. 7.16: Bestimmtheitsmaß der endogenen Konstrukte für Netzwerkkomplexität | 140 |
| Tab. 8.1: Parameterzuordnung der latenten endogenen Variablen..... | 156 |
| Tab. 8.2: Parameterzuordnung der latenten exogenen Variablen für Strukturkomplexität Werk A..... | 156 |
| Tab. 9.1: Abgleich der Ergebnisse mit den Anforderungen aus Abschnitt 1.3 | 166 |

Anhang

A Leitfäden für Experteninterviews

A.1 Produktkomplexität

Interviewteil A Einleitung

Vielen Dank, dass Sie mir die Gelegenheit für dieses Interview geben. Ich schreibe derzeit meine Dissertation im Bereich Komplexität in der Montagelogistik. Ich möchte in meiner Arbeit die wichtigsten Komplexitätstreiber in der Logistik identifizieren, speziell diejenigen, welche sich auf das Produkt beziehen

→ Produktkomplexität.

Vorstellung des Dissertationsvorhabens:

- Einführung und Definition der Begriffe „Komplexität“ und "Produktkomplexität"

- Ziele der Arbeit:

- In der Literatur vorhandene interne Komplexitätstreiber in der Logistik durch Experten-gespräche validieren und weitere Treiber identifizieren
- Analyse der kausalen Zusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg
- Erarbeitung einer Methodik zur Bewertung von Logistikkomplexität in Montagewerken

- Ziele der Befragung:

- Ermittelte Einflussfaktoren zur Diskussion stellen
- Aufdeckung erster Möglichkeiten zur Messung der genannten Faktoren
- Neue Sichtweise integrieren/weitere Faktoren finden

Das Interview wird ca. 45-60 Minuten in Anspruch nehmen. Ich werde das Aufnahmegerät während des Gesprächs mitlaufen lassen, falls das für Sie in Ordnung ist? Dies dient rein zur Kontrolle meiner Mitschrift. Die Aufnahme-datei wird streng vertraulich behandelt und nach Fertigstellung meiner Dissertation gelöscht.

Das Interview ist in 3 Kategorien gegliedert:

1. Persönlicher Komplexitätsbezug im Arbeitsumfeld
2. Diskussion zu den identifizierten Treibern

3. Fragen zu Persönlichkeit und beruflicher Erfahrung

Interviewteil B Interview

1. Persönlicher Komplexitätsbezug im Arbeitsumfeld

1.1 Wo bzw. wie kommen Sie in Ihrer aktuellen Position mit Produktkomplexität in Berührung? Was bedeutet für Sie in diesem Zusammenhang Produktkomplexität?

1.2 Bemerken Sie eine Veränderung von Produktkomplexität in den letzten Jahren, evtl. anhand von konkreten logistischen Kennzahlen? (z. B. weil sich die Aufgabenschwerpunkte stark verändert haben/ der Termindruck größer geworden ist/ die Fehlerhäufigkeit gestiegen ist/ die Qualität der Aufgaben in der Logistik gesunken ist/ mehr Mitarbeiter eingestellt wurden bzw. benötigt werden, um die Menge an Aufgaben zu erfüllen/ die Programme zur Logistikplanung veraltet und nicht mehr den Aufgaben entsprechend sind etc.)

1.3 Was sind Ihrer Meinung nach die Haupteinflussfaktoren für die Produktkomplexität? (z. B. Variantenzahl aufgrund gestiegener Kundenanforderungen)

2. Diskussion zu den identifizierten Treibern

Ich werde Ihnen nun nacheinander die bereits ermittelten Treiber der Produktkomplexität aufzeigen und kurz erläutern. Bevor ich Ihnen konkrete Fragen dazu stelle, möchte ich gerne jeweils Ihre persönliche Reaktion und Meinung abwarten. Bitte erzählen Sie mir alles, was Ihnen in dem Moment zum Thema einfällt und ob Sie den genannten Treiber jeweils auch als Haupttreiber wahrnehmen.

2.1 Anzahl Derivate

2.2 Zusätzliche Produktinhalte (Sonderausstattungen usw.) und Anzahl Varianten

2.3 Bündelungsstrategien (Anzahl Plattformen, Modellreihen)

2.5 Anzahl Anläufe pro Jahr

2.6 Produktvolumenschwankungen und Produktmixschwankungen

2.7 Modelljahresmaßnahmen

2.8 Sonderfahrzeuge

2.9 Fällt Ihnen nun noch ein bzw. mehrere Treiber der Produktkomplexität ein und wenn ja, können Sie diese bitte begründen?

2.10 Welcher der oben genannten Komplexitätstreiber ist Ihrer Meinung nach der Stärkste? Warum ist es so?

2.11 Welcher der oben genannten Komplexitätstreiber ist Ihrer Meinung nach der Schwächste? Warum ist es so?

2.12 Wie könnte man die Produktkomplexität aus den Treibern messbar machen? (Falls Bedarf, jeden einzelnen Treiber durchsprechen)

3. Fragen zu Persönlichkeit und beruflicher Erfahrung

3.1 Könnten Sie mir bitte Ihre aktuelle Position und Ihre Aufgaben grob erläutern?

3.2 Wie lange sind Sie bereits in dem Umfeld der Logistik/Produktionsplanung (o. a. je nach o. g. Tätigkeitsbereich) tätig und könnten Sie mir bitte, falls abweichend zu oben, Ihren jeweiligen Aufgabenfokus nennen?

3.3 Wie lange sind Sie bereits im aktuellen Unternehmen in dem genannten Umfeld tätig? Bei welchen Unternehmen waren Sie zuvor in diesem Bereich tätig?

Interviewteil C Verabschiedung

Möchten Sie Punkte ergänzen, die wir in unserem bisherigen Gespräch nicht abgedeckt haben?

Haben Sie weitere Wünsche oder Anregungen, die das Vorhaben betreffen?

Vielen Dank für Ihre Zeit und die ausführliche Beantwortung meiner Fragen. Sie unterstützen mich damit sehr, meinen Zielen der Arbeit näher zu kommen.

A.2 Netzwerkkomplexität

Interviewteil A Einleitung

Vielen Dank, dass Sie mir die Gelegenheit für dieses Interview geben. Ich schreibe derzeit meine Dissertation im Bereich Komplexität in der Montagelogistik. Ich möchte in meiner Arbeit die wichtigsten Komplexitätstreiber in der Logistik identifizieren, speziell diejenigen, welche sich auf das Netzwerk beziehen

→Netzwerkkomplexität.

Vorstellung des Dissertationsvorhabens:

- Einführung und Definition der Begriffe „Komplexität“ und "Netzwerkkomplexität"

- Ziele der Arbeit:

- In der Literatur vorhandene interne Komplexitätstreiber in der Logistik durch Expertengespräche validieren und weitere Treiber identifizieren
- Analyse der kausalen Zusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg
- Erarbeitung einer Methodik zur Bewertung von Logistikkomplexität in Montagewerken

- Ziele der Befragung:

- Ermittelte Einflussfaktoren zur Diskussion stellen

- Aufdeckung erster Möglichkeiten zur Messung der genannten Faktoren
- Neue Sichtweise integrieren/weitere Faktoren finden

Das Interview wird ca. 45-60 Minuten in Anspruch nehmen. Ich werde das Aufnahmegerät während des Gesprächs mitlaufen lassen, falls das für Sie in Ordnung ist? Dies dient rein zur Kontrolle meiner Mitschrift. Die Aufnahme datei wird streng vertraulich behandelt und nach Fertigstellung meiner Dissertation gelöscht.

Das Interview ist in 3 Kategorien gegliedert:

1. Persönlicher Komplexitätsbezug im Arbeitsumfeld
2. Diskussion zu den identifizierten Treibern
3. Fragen zu Persönlichkeit und beruflicher Erfahrung

Interviewteil B Interview

1. Persönlicher Komplexitätsbezug im Arbeitsumfeld

1.1 Wo bzw. wie kommen Sie in Ihrer aktuellen Position mit Netzwerkkomplexität in Berührung? Was bedeutet für Sie in diesem Zusammenhang Netzwerkkomplexität?

1.2 Bemerken Sie eine Veränderung von Netzwerkkomplexität in den letzten Jahren, evtl. anhand von konkreten logistischen Kennzahlen? (z.B. weil sich die Aufgabenschwerpunkte stark verändert haben/ der Termindruck größer geworden ist/ die Fehlerhäufigkeit gestiegen ist/ die Qualität der Aufgaben in der Logistik gesunken ist/ mehr Mitarbeiter eingestellt wurden bzw. benötigt werden, um die Menge an Aufgaben zu erfüllen/ die Programme zur Logistikplanung veraltet und nicht mehr den Aufgaben entsprechend sind etc.)

1.3 Was sind Ihrer Meinung nach die Haupteinflussfaktoren für die Netzwerkkomplexität? (z.B. erhöhte Lieferantenentfernung durch Globalisierung)

2. Diskussion zu den identifizierten Treibern

Ich werde Ihnen nun nacheinander die bereits ermittelten Treiber der Netzwerkkomplexität aufzeigen und kurz erläutern. Bevor ich Ihnen konkrete Fragen dazu stelle möchte ich gerne jeweils Ihre persönliche Reaktion und Meinung abwarten. Bitte erzählen Sie mir alles, was Ihnen in dem Moment zum Thema einfällt und ob Sie den genannten Treiber jeweils auch als Haupttreiber wahrnehmen.

2.1 Anzahl Lieferanten

2.2 Lieferantenentfernung

2.3 Lieferantenqualifikation

2.5 Wertschöpfungstiefe

2.6 IT-Systeme

2.7 Handlungsschritte

2.8 Anlieferart

2.9 Fällt Ihnen nun noch ein bzw. mehrere Treiber der Netzwerkkomplexität ein und wenn ja, können Sie diese bitte begründen?

2.10 Welcher der oben genannten Komplexitätstreiber ist Ihrer Meinung nach der Stärkste? Warum ist es so?

2.11 Welcher der oben genannten Komplexitätstreiber ist Ihrer Meinung nach der Schwächste? Warum ist es so?

2.12 Wie könnte man die Netzwerkkomplexität aus den Treibern messbar machen? (Falls Bedarf, jeden einzelnen Treiber durchsprechen)

3. Fragen zu Persönlichkeit und beruflicher Erfahrung

3.1 Könnten Sie mir bitte Ihre aktuelle Position und Ihre Aufgaben grob erläutern?

3.2 Wie lange sind Sie bereits in dem Umfeld der Logistik/Produktionsplanung (o. a. je nach o. g. Tätigkeitsbereich) tätig und könnten Sie mir bitte, falls abweichend zu oben, Ihren jeweiligen Aufgabenfokus nennen?

3.3 Wie lange sind Sie bereits im aktuellen Unternehmen in dem genannten Umfeld tätig? Bei welchen Unternehmen waren Sie zuvor in diesem Bereich tätig?

Interviewteil C Verabschiedung

Möchten Sie Punkte ergänzen, die wir in unserem bisherigen Gespräch nicht abgedeckt haben?

Haben Sie weitere Wünsche oder Anregungen, die das Vorhaben betreffen?

Vielen Dank für Ihre Zeit und die ausführliche Beantwortung meiner Fragen. Sie unterstützen mich damit sehr, meinen Zielen der Arbeit näher zu kommen.

A.3 Strukturkomplexität

Interviewteil A Einleitung

Vielen Dank, dass Sie mir die Gelegenheit für dieses Interview geben. Ich schreibe derzeit meine Dissertation im Bereich Komplexität in der Montagelogistik. Ich möchte in meiner Arbeit die wichtigsten Komplexitätstreiber in der Logistik identifizieren, speziell diejenigen, welche sich auf die Werksstruktur und Prozesse beziehen

--> Struktur-/Prozesskomplexität.

Vorstellung des Dissertationsvorhabens:

- Einführung und Definition der Begriffe „Komplexität“ und " Struktur-/Prozesskomplexität "
- Ziele der Arbeit:
 - In der Literatur vorhandene interne Komplexitätstreiber in der Logistik durch Expertengespräche validieren und weitere Treiber identifizieren
 - Analyse der kausalen Zusammenhänge zwischen Logistikkomplexität und Logistikerfolg
 - Erarbeitung einer Methodik zur Bewertung von Logistikkomplexität in Montagewerken
- Ziele der Befragung:
 - Ermittelte Einflussfaktoren zur Diskussion stellen
 - Aufdeckung erster Möglichkeiten zur Messung der genannten Faktoren
 - Neue Sichtweise integrieren/weitere Faktoren finden

Das Interview wird ca. 45-60 Minuten in Anspruch nehmen. Ich werde das Aufnahmegerät während des Gesprächs mitlaufen lassen, falls das für Sie in Ordnung ist? Dies dient rein zur Kontrolle meiner Mitschrift. Die Aufnahme datei wird streng vertraulich behandelt und nach Fertigstellung meiner Dissertation gelöscht.

Das Interview ist in 3 Kategorien gegliedert:

1. Persönlicher Komplexitätsbezug im Arbeitsumfeld
2. Diskussion zu den identifizierten Treibern
3. Fragen zu Persönlichkeit und beruflicher Erfahrung

Interviewteil B Interview**1. Persönlicher Komplexitätsbezug im Arbeitsumfeld**

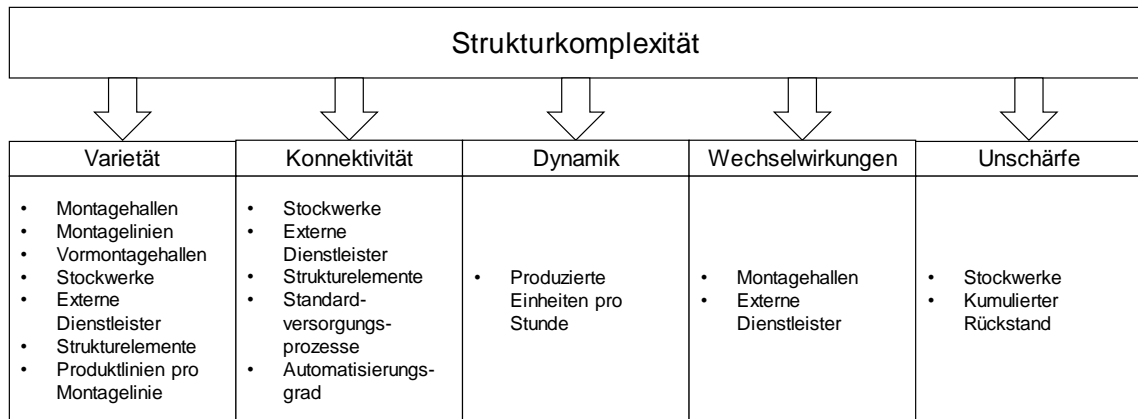
1.1 Wo bzw. wie kommen Sie in Ihrer aktuellen Position mit Struktur-/Prozesskomplexität in Berührung? Was bedeutet für Sie in diesem Zusammenhang Struktur-/Prozesskomplexität?

1.2 Bemerken Sie eine Veränderung von Struktur-/Prozesskomplexität in den letzten Jahren, evtl. anhand von konkreten logistischen Kennzahlen? (z.B. weil sich die Aufgabenschwerpunkte stark verändert haben/ der Termindruck größer geworden ist/ die Fehlerhäufigkeit gestiegen ist/ die Qualität der Aufgaben in der Logistik gesunken ist/ mehr Mitarbeiter eingestellt wurden bzw. benötigt werden, um die Menge an Aufgaben zu erfüllen/ die Programme zur Logistikplanung veraltet und nicht mehr den Aufgaben entsprechend sind/ Prozesse komplizierter geworden sind/ Strukturen unübersichtlicher etc.)

1.3 Was sind Ihrer Meinung nach die Haupteinflussfaktoren für die Struktur-/Prozesskomplexität? (z.B. höhere Anzahl an Montagelinien in einem Werk)

2. Diskussion zu den identifizierten Treibern

Ich werde Ihnen nun nacheinander die bereits ermittelten Treiber der Struktur-/Prozesskomplexität aufzeigen und kurz erläutern. Bevor ich Ihnen konkrete Fragen dazu stelle, möchte ich gerne jeweils Ihre persönliche Reaktion und Meinung abwarten. Bitte erzählen Sie mir alles, was Ihnen in dem Moment zum Thema einfällt und ob Sie den genannten Treiber jeweils auch als Haupttreiber wahrnehmen.



2.1 Anzahl Montagehallen und Vormontagehallen

2.2 Anzahl Montagelinien

2.3 Automatsierungsgrad

2.5 Anzahl Stockwerke

2.6 Anzahl externe Dienstleister

2.7 Anzahl Strukturelemente

2.8 Anzahl Standardversorgungsprozesse

2.9 Fällt Ihnen nun noch ein bzw. mehrere Treiber der Struktur-/Prozesskomplexität ein und wenn ja, können Sie diese bitte begründen?

2.10 Welcher der oben genannten Komplexitätstreiber ist Ihrer Meinung nach der Stärkste? Warum ist es so?

2.11 Welcher der oben genannten Komplexitätstreiber ist Ihrer Meinung nach der Schwächste? Warum ist es so?

2.12 Wie könnte man die Struktur-/Prozesskomplexität aus den Treibern messbar machen? (Falls Bedarf, jeden einzelnen Treiber durchsprechen)

3. Fragen zu Persönlichkeit und beruflicher Erfahrung

3.1 Könnten Sie mir bitte Ihre aktuelle Position und Ihre Aufgaben grob erläutern?

3.2 Wie lange sind Sie bereits in dem Umfeld der Logistik/Produktionsplanung (o. a. je nach o. g. Tätigkeitsbereich) tätig und könnten Sie mir bitte, falls abweichend zu oben, Ihren jeweiligen Aufgabenfokus nennen?

3.3 Wie lange sind Sie bereits im aktuellen Unternehmen in dem genannten Umfeld tätig? Bei welchen Unternehmen waren Sie zuvor in diesem Bereich tätig?

Interviewteil C Verabschiedung

Möchten Sie Punkte ergänzen, die wir in unserem bisherigen Gespräch nicht abgedeckt haben?

Haben Sie weitere Wünsche oder Anregungen, die das Vorhaben betreffen?

Vielen Dank für Ihre Zeit und die ausführliche Beantwortung meiner Fragen. Sie unterstützen mich damit sehr, meinen Zielen der Arbeit näher zu kommen.

B Partial-Least-Squares-Algorithmus

Nach *Chatelin et al.* und *Henseler* erfolgt die Schätzung des Pfadmodells in zwei Schritten. Zunächst wird das Messmodell bestimmt, woraufhin das Strukturmodell geschätzt wird. In der folgenden Abbildung wird die Vorgehensweise stichpunktartig beschrieben [CET02], [Hen05].

| A. Bestimmung des Messmodells | |
|---|---|
| Vorbereitung: Standardisierung | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Die manifesten Variablen werden standardisiert (Mittelwert = 0, Varianz = 1), wenn diese nicht vergleichbar sind. Standardisierte Größen sind zentriert und besitzen keine Einheit mehr, wodurch Vergleichbarkeit erreicht wird. • Standardisierung mit der sogenannten z-Transformation Lohninger 2012: <ul style="list-style-type: none"> ○ $z_i = (x_i - \bar{x}) / s$ | <ul style="list-style-type: none"> z_i z-transformierte Stichprobenwerte x_i Originalwerte der Stichprobe \bar{x} Mittelwert der Stichprobe s Standardabweichung der Stichprobe |
| Schritt 0: Initialisierung | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung eines ersten äußeren Schätzwerts Y_j für jede latente Variable ξ_j. <ul style="list-style-type: none"> ○ Theoretisch sind beliebige Linearkombinationen möglich. ○ Möglichkeit: Setzen des Gewichts des ersten Indikators x_{j1} jeder latenten Variable gleich 1, alle übrigen Indikatoren gleich 0. | |

- $\forall j: Y_j := x_{j1}$

Schritt 1: Ermittlung des inneren Schätzwerts Y_j

- Schritt 1a:

- Schätzung der inneren Gewichte e_{ji} nach einem der drei Schemata:
 - Zentroidschema:
Die inneren Gewichte e_{ji} sind gleich dem Vorzeichen der Korrelation zwischen Y_i und Y_j , falls eine Korrelation existiert, ansonsten gleich 0.
 - Faktorgewichtungsschema:
Die inneren Gewichte e_{ji} werden gleich der Korrelation zwischen Y_i und Y_j gesetzt, falls eine Korrelation existiert, ansonsten gleich 0.
 - Pfadgewichtungsschema:
Unterscheidung zwischen Vorgängern (latente Variablen, von denen aus ein Pfeil auf eine andere latente Variable zeigt) und Nachfolgern (latente Variablen, auf die ein von einer anderen latenten Variable ausgehender Pfeil zeigt)
 - Vorgänger ξ_j : Multiple Regression:
Unabhängige Variablen = alle Vorgänger
abhängige Variable = ξ_j
Regressionskoeffizient b_{ji} = innere Gewichte e_{ji}
 - Nachfolger: nach Faktorgewichtungsschema

- Schritt 1b:

- Innere Schätzung der latenten Variablen:
 - Gewichtete Summe aller übrigen latenten Variablen ist Schätzwert Z_j für die latente Variable ξ_j :
 - Faktor Φ_j standardisiert Z_j .
 - $Z_j := \Phi_j * \sum e_{ji} Y_i$

Schritt 2: Ermittlung des äußeren Schätzwerts Z_j

- Schritt 2a:

- Schätzung der äußeren Gewichte π_{jh}
 - Reflektive Modelle: $\pi_{jh} := \text{cov}(x_{jh}, Z_j)$
 - Formative Modelle: Vektor π_j der Gewichte π_{jh} ist der Regressionskoeffizient der multiplen Regression:
abhängige Variable = Z_j ,
unabhängige Variablen = manifeste Variablen x_{jh} der latenten Variable ξ_j .

- Schritt 2b:

- Äußere Schätzung der latenten Variablen:
 - Ermittlung der äußeren Schätzwerte Y_j als Linearkombinationen der manifesten Variablen.
 - Faktor f_j standardisiert Y_j .

$$\blacksquare Y_j := f_j \sum \pi_{jh} X_{jh}$$

Wiederholung der Schritte 1a bis 2b bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird. Üblicherweise: Summe der Änderung der Gewichte von einer Iteration zur nächsten, z.B. Abbruch, wenn Summe der quadrierten Differenzen der Gewichte 10^{-5} unterschreitet.

B. Schätzung des Strukturmodells

Multiple Regression:

Abhängige Variable: ξ_j ,

unabhängige Variable: alle Vorgänger ξ_i

Die Regressionskoeffizienten sind die Pfadwerte β_{ji}

