

Arne Bohl

Kennlinien der Produkt- und Produktionskomplexität



Kennlinien der Produkt- und Produktionskomplexität

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Arne Bohl

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günter Schuh
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen

Tag der mündlichen Prüfung: 27. November 2014

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Arne Bohl

Kennlinien der Produkt- und Produktionskomplexität

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 8/2015


RWTHAACHEN

 **Fraunhofer**
IPT

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Arne Bohl:

Kennlinien der Produkt- und Produktionskomplexität

1. Auflage, 2015

Apprimus Verlag, Aachen, 2015
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-326-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Vorwort

Die Titelseite einer Dissertation trägt nur einen Namen. Tatsächlich steckt dahinter stets ein ganzes Team von Freunden, Förderern und Wegbegleitern. Diesen Menschen möchte ich an dieser Stelle danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Günter Schuh. Das von ihm geschaffene Arbeitsumfeld am Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabor WZL bildete eine wichtige Voraussetzung für meine persönliche Weiterentwicklung und das Gelingen der Promotion. Die Zusammenarbeit mit Herrn Professor Schuh, zum Beispiel im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik“, hat mir wichtige Impulse gegeben, die sich auf den nachfolgenden Seiten wiederfinden. Darüber hinaus danke ich Herrn Professor Jörg Feldhusen und Herrn Professor Stefan Pischinger für die Übernahme des Koreferates und des Vorsitzes meiner Promotionsprüfung.

Kern des Arbeitsumfelds am Lehrstuhl war eine Gruppe von Kollegen, mit dem ich nicht nur eine intensive Zusammenarbeit sondern auch dauerhafte Freundschaften erfahren durfte. Für ihr stets offenes Ohr möchte ich besonders Dr. Michael Lenders, Dr. Jens Arnoscht, Dr. Stefan Rudolf, Dr. Michael Schiffer, Dr. Kai Korthals, Michael Riesener und Stephan Schmitz hervorheben. Einen anderen, wichtigen Bestandteil des Arbeitsumfelds bildeten studentische Mitarbeiter, die ich begleiten durfte. Besonders bedanken möchte ich mich bei Tobias Diekmann, Tobias Harland, Constantin Blomberg und Korbinian Rauch.

Einen ebenfalls hohen Stellenwert nimmt der private Freundeskreis ein. Zur Unterstützung und zum Ausgleich konnte ich jederzeit auf meine Freunde Alice und Ingo Martin, Lisa Timmermann und Hermann Hoffmann, Nadine und Dominik Werner sowie Alicja und Martin Zekorn zählen.

Den wichtigsten Rückhalt, durch den der herausfordernde Promotionsprozess erst möglich wurde, habe ich von meiner Frau Anne Bohl und meinen Eltern Ulla und Horst Bohl erhalten – dafür danke ich Euch!

Aachen, im Dezember 2014

Arne Bohl



Diese Arbeit wurde im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Exzellenzclusters »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer« erstellt.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Verzeichnis der Abkürzungen | V |
| Verzeichnis der Formelzeichen | VII |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Motivation..... | 1 |
| 1.2 Ausgangssituation und Problemstellung | 3 |
| 1.3 Zielsetzung und Forschungsprogramm | 5 |
| 1.4 Lösungshypothese..... | 7 |
| 1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung | 10 |
| 1.6 Forschungsmethodischer Ansatz | 12 |
| 2 Grundlagen der Produkt- und Produktionskomplexität | 17 |
| 2.1 Produkt-Produktionssysteme..... | 17 |
| 2.2 Kennlinientheorie | 19 |
| 2.3 Economies of Scale und Economies of Scope..... | 21 |
| 2.4 Produkt- und Produktionskomplexität..... | 27 |
| 2.5 Produkt- und Produktionsstandardisierung..... | 31 |
| 3 Definition eines konstitutiven Ordnungsrahmens für Produkt-Produktionssysteme | 39 |
| 3.1 Teilsysteme eines Produkt-Produktionssystems..... | 40 |
| 3.2 Spannungsfeld Produktprogramm | 43 |
| 3.3 Spannungsfeld Produktarchitektur..... | 47 |
| 3.4 Spannungsfeld Produktionsstruktur | 51 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.5 | Spannungsfeld Supply-Chain | 55 |
| 3.6 | Synthese des Ordnungsrahmens | 58 |
| 3.7 | Zwischenfazit: Bewertungsmodell als konstitutiver Ordnungsrahmen..... | 59 |
| 4 | Bestehende Modelle komplexitätsbezogener Wirkbeziehungen | 61 |
| 4.1 | Anforderungen an die Modellentwicklung | 61 |
| 4.2 | Übergreifende Modelle der Komplexitätswirkbeziehungen | 63 |
| 4.2.1 | Nomogramme zur Variantenbewertung nach SCHUH | 64 |
| 4.2.2 | Kostentheorie der Variantenproduktion nach BRÄUTIGAM | 67 |
| 4.2.3 | Modularisierungs-Strategy-Map nach JUNGE | 70 |
| 4.2.4 | Wirkungszusammenhänge der Variantenvielfalt nach BUCHHOLZ..... | 72 |
| 4.2.5 | Zwischenfazit: Forschungslücke der übergreifenden Modelle | 74 |
| 4.3 | Partialmodelle der Komplexitätswirkbeziehungen | 76 |
| 4.3.1 | Empirisch-induktiv ermittelte Partialmodelle | 76 |
| 4.3.2 | Analytisch-deduktiv konstruierte Partialmodelle | 96 |
| 4.3.3 | Deduktiv-experimentell entwickelte Partialmodelle | 114 |
| 4.4 | Zwischenfazit: Bestehender Gesamtforschungsbedarf..... | 127 |
| 5 | Konzeption eines qualitativen Wirkbeziehungsmodells | 131 |
| 5.1 | Qualitativ-empirische Identifikation der Wirkbeziehungen | 131 |
| 5.2 | Quantitativ-empirische Identifikation der Wirkbeziehungen..... | 135 |
| 5.3 | Konzeption eines qualitativen Bezugsrahmens der Wirkbeziehungen..... | 141 |
| 5.3.1 | Wirkbeziehungen zwischen Produktprogramm und marktseitigem Absatz..... | 141 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.2 | Wirkbeziehungen der Variantenvielfalt auf Produkt- und Komponentenebene..... | 144 |
| 5.3.3 | Wirkbeziehungen zwischen Produktkomplexität und Produktionsstruktur..... | 148 |
| 5.3.4 | Wirkbeziehungen zwischen Produkt, Produktionsstruktur und Supply-Chain | 155 |
| 5.4 | Zwischenfazit: Qualitativer Bezugsrahmen als Grundlage der quantitativen Modellbildung..... | 161 |
| 6 | Entwicklung eines quantitativen Kennlinienmodells | 163 |
| 6.1 | Quantitativ-parametrisierte Modellierung der Kennlinien | 163 |
| 6.1.1 | Modellierung der Wirkbeziehungen zwischen Produktprogramm und marktseitigem Absatz | 164 |
| 6.1.2 | Modellierung der Wirkbeziehungen zwischen Variantenvielfalt auf Produkt- und Komponentenebene | 171 |
| 6.1.3 | Modellierung der Wirkbeziehungen zwischen Produktkomplexität und Produktionsstruktur | 178 |
| 6.1.4 | Modellierung der Wirkbeziehungen zwischen Produkt, Produktionsstruktur und Supply-Chain | 191 |
| 6.2 | Synthese der Teilmodelle zu einem integrierten Kennlinienmodell | 201 |
| 6.2.1 | Kopplung der spannungsfeldspezifischen Kennlinien-Teilmodelle | 201 |
| 6.2.2 | Anwendung des Kennliniensystems zur integrativen Standardisierung..... | 207 |
| 6.3 | Zwischenfazit: Kennlinienmodell als Basis integrativer Standardisierung..... | 210 |
| 7 | Empirische Validierung des Kennlinienmodells | 211 |
| 7.1 | Design der Modellvalidierung | 211 |
| 7.2 | Erste Feldstudie: Die SPECHT-Baureihe bei MAG IAS..... | 213 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.3 | Zweite Feldstudie: Laborgeräte bei der Labortechnik AG..... | 219 |
| 7.4 | Dritte Feldstudie: Fahrscheinautomaten der Verkehrstechnik GmbH..... | 223 |
| 7.5 | Vierte Feldstudie: Hydraulische Bremsen der Ortlinghaus -Werke | 228 |
| 7.6 | Zwischenfazit: Gesamtergebnis der Feldstudien | 232 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 235 |
| | Literaturverzeichnis..... | 239 |
| | Anhang | 269 |

Verzeichnis der Abkürzungen

| | |
|----------|---|
| AG | Aktiengesellschaft |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |
| AtO | Assemble to Order |
| Aufl. | Auflage |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CIRP | Internationale Akademie für Produktionstechnik |
| CtO | Configure to Order |
| DAX | Deutscher Aktienindex |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| drsn. | durchschnittliche |
| dt. | deutsch |
| EBIT | Operatives Ergebnis |
| et al. | und andere |
| EtO | Engineer to Order |
| f. | folgende Seite |
| ff. | folgende Seiten |
| FIFO | First in, first out |
| GE | Geldeinheiten |
| ggf. | gegebenenfalls |
| GmbH | Gesellschaft mit beschränkter Haftung |
| h | Stunden |
| Hrsg. | Herausgeber |
| i. A. a. | in Anlehnung an |
| i. e. | das ist |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |

| | |
|-------|--|
| IMVP | International Motor Vehicle Program |
| IT | Informationstechnik |
| Jg. | Jahrgang |
| M-BSC | Modular-Balanced-Scorecard |
| MFB | Materialflussbeziehung |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| Mrd. | Milliarde |
| MRP | Material Requirements Planning |
| MtO | Make to Order |
| MtS | Make to Stock |
| Nr. | Nummer |
| p. a. | jährlich |
| PIMS | Profit Impact of Marketing Strategies |
| REFA | Verband für Arbeitsgestaltung und Betriebsorganisation |
| RWTH | Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule |
| S. | Seite, Seiten |
| SMD | Surface-mounted Device |
| Stk. | Stück |
| TH | Technische Hochschule |
| TPS | Toyota Production System |
| TU | Technische Universität |
| u. a. | unter anderem, und andere |
| U.S. | Vereinigte Staaten von Amerika |
| Univ. | Universität |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure e.V. |
| vgl. | vergleiche |
| vs. | versus |
| VW | Volkswagen AG |
| WIP | Fertigungsbestände |
| z. B. | zum Beispiel |

Verzeichnis der Formelzeichen

| | |
|-------------------------------------|---|
| α_1 | Anschmiegungs-Parameter der C-Norm-Funktion |
| α_{WIP} | Streckfaktor für WIP-Bestände in der Produktion |
| α | Lagerfertigungsgrad |
| β | Bestandsniveau |
| ρ | Pearson-Korrelationskoeffizient |
| a | Anzahl Produktmerkmale |
| Abs_{ges} | Gesamtabsatz über alle Produktvarianten [Stk.] |
| Abs_i | Absatz der i -ten Produktvariante nach Absatzstärke [Stk.] |
| Abs_{max} | Absatz der absatzstärksten Produktvariante [Stk.] |
| Abs_{min} | Absatz der absatzschwächsten Produktvariante [Stk.] |
| b | Anzahl eingesetzter Ressourcentypen |
| B_{Bt} | Bestand an Bauteilen [Stk.] |
| B_{Pd} | Bestand an Produkten [Stk.] |
| B_{WIP} | Fertigungsbestände [Stk.] |
| BE_{SC} | Bestandseffizienz der Supply-Chain |
| $BI_{\text{min TL0S}}^{\text{WIP}}$ | Idealer Mindest-WIP-Bestand bei Transport von Teillosen [Stk.] |
| $BI_{\text{min}}^{\text{WIP}}$ | Idealer Mindest-WIP-Bestand [Stk.] |
| BL_0^k | Mittlerer Losbestand [Stk.] |
| BL_1^k | Praktisch minimaler Grenzbestand [Stk.] |
| BM_{FQi} | Frist- und qualitätsgerecht gelieferte Bestellmenge in Periode i [Stk.] |
| BM_{gesi} | Gesamte in Periode i auszuliefernde Bestellmenge [Stk.] |
| c | C_{norm} -Parameter |
| C_{BA}^k | Parameter der Bedarfsabweichung [Stk.] |
| C_{BE} | Aufschlagfaktor des relativen Bruttoergebnisses auf Herstellungskosten |
| C_{EB} | Parameter der Erklärungsbedüftigkeit (Kundenexpertise) |
| C_{EG} | Mittlerer Einbindungsgrad der Ressourcentypen |
| C_{EZ} | Aufschlagfaktor der Erholungs- und persönlichen Verteilzeit |

| | |
|----------------|---|
| C_{LA} | Parameter der Ausgangslosgröße [Stk.] |
| C_{LB}^k | Parameter des mittleren Losbestandes [Stk.] |
| C_{LG} | Lerngrad-Parameter der Grundzeit |
| C_{LS} | Lerngrad-Parameter der sachlichen Verteilzeit |
| C_{LW} | Parameter des Losgrößenwachstums |
| C_{MG} | Parameter der Marktgröße [Stk.] |
| C_{MH} | Parameter der Marktheterogenität |
| C_{MR} | Maximale Anzahl relevanter Ressourcentypen |
| C_{NV} | Möglicher Nivellierungsgrad der Ressourcenauslastung |
| C_{PL} | Parameter der Prozesskettenlänge |
| C_{QP} | Parameter der Qualität der Produktprogrammplanung |
| C_{RP}^k | Sensitivitätsparameter des Risk-Pooling-Effektes |
| c_s | Sensitivität der Ressourcenauslastung bzgl. Segmentierung der Produktionsstruktur |
| C_{SB} | Sensitivitätsparameter des Bestandes ggü. Prozesskommunalität |
| C_{SG} | Segmentierungsgrad der Produktionsstruktur |
| C_{TK} | Parameter der Technologiekommunalität in der Produktion |
| C_{VG} | Mittlerer Verfügbarkeitsgrad der Ressourcen |
| C_{VR} | Verregelungsgrad der Produktmerkmale |
| C_{VS} | Parameter der Varianzsensitivität des Absatzes |
| C_{VT} | Technologiebedingter Vernetzungsgrad der Ressourcentypen |
| $C_{WB\min}^k$ | Parameter der minimalen Wiederbeschaffungszeit |
| C_{WIP} | Parameter des Fertigungsbestandes |
| C_{WV} | Parameter der Wiederverwendung von Bauteilvarianten |
| C_{WW} | Bewertungsparameter für WIP-Bestände |
| C_{ZA}^k | Parameter der Zugangsabweichung [Stk.] |
| d | Anzahl Materialflussbeziehungen in Ressourcengrundkonfiguration |
| EV_{PP} | Erklärungsfähigkeit des Vertriebs |
| f | Anzahl Materialflussbeziehungen in der Produktionsstruktur |
| f_{opt} | Minimal mögliche Anzahl der Materialflussbeziehungen |

| | |
|----------------------|--|
| FL_{PA} | Flexibilität der Produktarchitektur |
| g | Mittlere Anzahl beeinflussender Produktmerkmale einer variablen Modulfamilie |
| g_{Indiv} | Mittlere Anzahl beeinflussender Produktmerkmale einer variablen Modulfamilie bei maximaler Flexibilität der Produktarchitektur |
| g_{Strd} | Mittlere Anzahl beeinflussender Produktmerkmale einer variablen Modulfamilie bei minimaler Flexibilität der Produktarchitektur |
| IV_{PP} | Individualisierung des Produktprogramms |
| k | Mittlere Anzahl von Bauteilen pro Modul [Stk.] |
| KM_{PA} | Kommunalität der Produktarchitektur |
| L | Durchschnittliche Losgröße [Stk.] |
| LF_{SC} | Leistungsfähigkeit der Supply-Chain |
| m | Anzahl eingesetzter Bauteilvarianten in Produktarchitektur |
| m_0 | Durchschnittliche Anzahl Bauteile pro Produkt [Stk.] |
| n | Anzahl real eingesetzter Modulvarianten |
| n_0 | Anzahl durchschnittlich erklärbarer Produktvarianten |
| n_{absth} | Theoretisch mögliche Anzahl abgesetzter Produktvarianten |
| n_{abs} | Anzahl abgesetzter Produktvarianten |
| n_{ang} | Anzahl angebotener Produktvarianten |
| $n_{\text{erkl}i}$ | Anzahl Varianten, die i -ter Vertriebsmitarbeiter erklären kann |
| n_{MkmStrd} | Anzahl vorgesehener, variabler Merkmale in standardisierter Produktarchitektur |
| n_{Mkmvar} | Anzahl aller variierten Merkmale |
| n_{strd} | Anzahl eingesetzter Standardmodule |
| n_{th} | Theoretisch benötigte Anzahl Modulvarianten |
| n_{var} | Anzahl benötigter Modulvarianten in variablen Modulfamilien |
| N_{var} | Anzahl variabler Modulfamilien |
| $n_{\text{varth}i}$ | Theoretisch benötigte Anzahl Modulvarianten in variablen Modulfamilien i |
| p | Durchschnittliche Produktionsstückzahl pro Bauteiltyp im Betrachtungszeitraum [Stk.] |

| | |
|----------------|--|
| PK_{PS} | Prozesskommunalität in der Produktionsstruktur |
| q_{ges} | Gesamte Produktionsmenge aller Bauteilvarianten [Stk.] |
| Q_{GK} | Brutto-Kapazitätsangebot der Ressourcengrundkonfiguration [h] |
| q_i | Produktionsmenge der Bauteilvariante i [Stk.] |
| Q_{NW} | Notwendiges Brutto-Kapazitätsangebot der Produktionsstruktur [h] |
| Q_{PS} | Brutto-Kapazitätsangebot der Produktionsstruktur [h] |
| r | Anzahl Ressourcen in der Produktionsstruktur |
| $r_{i,j}$ | Relation zwischen Modulfamilie i und Produktmerkmal j (entspricht i,j -Eintrag der Relationsmatrix R) |
| RA_{BR} | Brutto-Ressourcenauslastung |
| RA_{PS} | Ressourcenauslastung der Produktionsstruktur |
| s | Sensitivitätsparameter der Ressourcenauslastung |
| s_0 | Geometrisches Mittel der Anzahl abgesetzter Ausprägungen pro Merkmal |
| s_j | Anzahl abgesetzter Ausprägungen des Produktmerkmals j |
| SG_{SC}^{Bt} | Servicegrad bezogen auf unfertige Erzeugnisse (Bauteile) |
| SG_{SC}^{Pd} | Servicegrad bezogen auf fertige Erzeugnisse (Produkte) |
| T_B | Kapazitätsbedarf [h] |
| t | Laufvariable |
| t_e | Zeit je Einheit [h] |
| t_{g1} | Ausgangswert der Grundzeit je Einheit [h] |
| T_{gi} | Direkt wertschöpfend genutzte Zeit (Summe der Grundzeiten) der Ressource i innerhalb des betrachteten Zeitintervalls [h] |
| t_g | Durchschnittliche Grundzeit je Einheit [h] |
| t_h | Durchschnittliche Erholungs- und persönliche Verteilzeit je Einheit [h] |
| t_r | Durchschnittliche Rüstzeit je Einheit [h] |
| T_r | Durchschnittliche Rüstzeit pro Rüstvorgang [h] |
| t_{s1} | Ausgangswert der sachlichen Verteilzeit je Einheit [h] |
| t_s | Durchschnittliche sachliche Verteilzeit je Einheit [h] |
| u | Anzahl der Perioden in betrachtetem Zeitintervall |

| | |
|-----------|--|
| U_j | Umsatz der Produktvariante j in betrachtetem Zeitintervall [GE] |
| v | Gesamtmenge zu produzierender Bauteile [Stk.] |
| VM_{dj} | Durchschnittlicher Wert des direkt der Produktvariante j zuordnungsfähigen Vorratsvermögens über betrachtetes Zeitintervall [GE] |
| VM_{ij} | Durchschnittlicher Wert des indirekt, aufschlagmäßig der Produktvariante j zuordnungsfähigen Vorratsvermögens über betrachtetes Zeitintervall [GE] |
| w_{HK} | Wertfaktor der durchschn. Herstellkosten eines Produktes [GE/Stk.] |
| w_i | Wertanteil der Bauteilvariante i am Gesamtwert aller Bauteilvarianten |
| z | Mittlere Kapazität pro Ressource [h] |

1 Einleitung

*»There is the standardizing which marks inertia,
and the standardizing which marks progress.«* — Henry Ford¹

1.1 Motivation

Die Standardisierung von Produkten und Prozessen stellt einen zentralen Baustein der beiden industriellen Umbrüche des 20ten Jahrhunderts dar. So wurde die FORD'SCHE Erfindung der Fließbandmontage erst durch eine hochgradige Produktstandardisierung ermöglicht und befähigte zur ersten industriellen Massenproduktion und den damit verbundenen Skaleneffekten.² FORD postulierte zu diesem Zeitpunkt bereits die Notwendigkeit eines differenzierten Ansatzes zur Definition von Standards, der sowohl Kundenbedürfnisse als auch die Effizienz der Produktion berücksichtigt.³

Eine gleichbedeutend wichtige Rolle kommt der Standardisierung innerhalb des Toyota Production Systems (TPS) zu. Die prinzipielle Dichotomie des TPS zwischen Just-in-time-Produktion (so spät wie möglich) und Jidoka (keine Planabweichungen) kann hierbei erst durch die Standardisierung von Produkten und Prozessen gelöst werden. Standardisierung dient als Befähiger, Ansätze wie Continuous Flow, Taktung, Pull-Steuerung und kontinuierliche Verbesserung erfolgreich einzusetzen.⁴

Durch die Globalisierung der Märkte wird die Standardisierung von Produkten und Prozessen für produzierende Unternehmen in Hochlohnländern zunehmend erschwert. Diese stehen vor einem zentralen Dilemma: Einerseits müssen heterogene Kundenbedürfnisse am Markt durch Produktdifferenzierung und steigende Variantenvielfalt befriedigt werden, um ein aus Anbieterperspektive wirtschaftliches

¹ Ford, Crowther (1926) Greater Future, S.100

² Vgl. Pine (1993) Mass Customization, S.14ff.

³ Vgl. Ford, Crowther (1923) My Life and Work, S.49.

⁴ Vgl. Womack, Jones, Roos (1991) Machine that Changed the World, S.290.

Preisniveau der Produkte zu rechtfertigen.⁵ Andererseits limitiert der globale Preiswettbewerb mögliche Preisaufschläge und macht eine hochgradige Produktionseffizienz notwendig.⁶ Die Parallelität der Entwicklungen zwingt die betrachteten Unternehmen in steigendem Maße dazu, Differenzierungseffekte (Economies of Scope) und Skaleneffekte (Economies of Scale) gleichzeitig realisieren zu müssen, obwohl zwischen beiden Optimierungsrichtungen ein Zielkonflikt besteht.⁷ Differenzierungseffekte werden durch Adaption von Produkten an individuelle Kundenbedürfnisse realisiert und führen zu einer steigenden Anzahl der Produktvarianten. Die ausgelösten Komplexitätseffekte⁸ stehen möglichen Skaleneffekten entgegen, die auf einer Effizienzsteigerung durch zunehmende Stückzahlen und damit verbundener Standardisierung von Produkten und Prozessen beruhen.

Der Zielkonflikt zwischen Economies of Scale und Economies of Scope (Scale-Scope-Dilemma) erfordert eine strategische Positionierung eines Unternehmens zwischen diesen beiden Polen. Ausgehend von dieser Positionierung ist eine Abstimmung zwischen Teilsystemen des Unternehmens zu schaffen. Entsprechend bestehen zwei zentrale Handlungsfelder zur Bewältigung des Scale-Scope-Dilemmas: So ist zum einen für ein Unternehmen und dessen Randbedingungen ein geeigneter Standardisierungsgrad von Produkten und Prozessen, also die richtige Positionierung im Scale-Scope-Dilemma zu identifizieren.⁹ Zum anderen ist durch gegenseitige Abstimmung der strukturbildenden Elemente des Produkt-Produktionssystems¹⁰ eine Eliminierung komplexitätsbezogener Engpässe oder Überkapazitäten notwendig.¹¹ Ein Beispiel für einen solchen Engpass stellt beispielsweise ein Vertriebskanal dar, über den dem Kunden nicht die volle Bandbreite an Produktvarianten erklärt werden kann. Eine komplexitätsbezogene Überkapazität würde dagegen eine hochgradig variantenfähige Werkstattfertigung bei ei-

⁵ Vgl. Lancaster (1979) *Variety*, S.5 ff., S.26 ff.

⁶ Vgl. Schuh et al. (2011) *Integrative Assessment*, S.347; Lindemann, Reichwald, Zäh (2006) *Individualisierte Produkte*, S.2; Firchau (2003) *Variantenoptimierende Produktgestaltung*, S.7.

⁷ Vgl. Salvador, Forza, Rungtusanatham (2002) *Product Variety*, S.549; Porter (1998) *Competitive Strategy*, S.16, S.127 ff.; Treacy, Wiersema (1995) *Market Leaders*, S.5 ff.

⁸ Unter Komplexität wird hierbei vereinfacht die Variantenvielfalt auf Ebene von Produkten, Produktkomponenten, Prozessen und Ressourcen sowie deren Veränderungsdynamik verstanden. Siehe Kapitel 4.1 für eine detaillierte Definition des Komplexitätsbegriffes.

⁹ Vgl. Fisher, Ittner (1999) *Impact of Product Variety*, S.771.

¹⁰ Siehe Kapitel 2.1 zur Definition des Begriffes ‚Produkt-Produktionssystem‘.

¹¹ Vgl. Baud-Lavigne, Agard, Penz (2012) *Product Standardization*, S.53; Jacobs, Vickery, Droge (2007) *Product Modularity*, S.1063; Fine (2000) *Supply Chain Design*, S.218 ff.; Spring, Dalrymple (2000) *Product Customisation*, S.448 ff.; Fisher (1997) *Supply Chain*, S.106 ff.; Hoekstra et al. (1992) *Integral Logistic Structures*, S.1 ff.; Hayes, Wheelwright (1979) *Manufacturing Process*, S.134 ff.

nem standardisierten Produktprogramm darstellen. Die durchgängige Abstimmung zwischen den strukturbildenden Elementen eines Produkt-Produktionssystems mit dem Ziel der Eliminierung solcher Engpässe und Überkapazitäten wird im Folgenden als integrative Standardisierung bezeichnet.¹²

Um eine integrative Standardisierung zu ermöglichen, ist ein tiefgreifendes Verständnis der komplexitätsbedingten Interaktionen innerhalb eines Produkt-Produktionssystems notwendig.¹³ Erst das Verständnis der Interaktionen kann eine Prognose des komplexitätsbezogenen Verhaltens des Systems und der Auswirkungen von Produktvielfalt ermöglichen und zu einer systematischen Optimierung befähigen.¹⁴ Das benötigte Verständnis soll im Rahmen der Arbeit durch Modellbildung geschaffen werden.

1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Das wesentliche Hindernis einer abgestimmten Standardisierung der Elemente eines Produkt-Produktionssystems in der industriellen Anwendung liegt in den komplexen und schwer handhabbaren Interaktionsbeziehungen innerhalb des Systems. So hat beispielsweise die Reduktion von Komponentenvarianten eines Produktes Auswirkungen auf Auslastung, Prozessstandardisierung, Liefertermintreue und Bestände in der Wertschöpfungskette. Gleichzeitig wird der mögliche Grad der Produktindividualisierung beeinflusst. Im Weiteren soll die Vielzahl verknüpfter Variablen als Multidimensionalität der Interaktionsbeziehungen bezeichnet werden.

Für eine ansatzweise homogene Gruppe von Produkt-Produktionssystemen (52 deutsche Werkzeugbauunternehmen) wurde dieses Interaktionsgeflecht in Form einer empirischen Vorstudie betrachtet. Ergebnis ist eine teils hochgradige Interaktion zwischen Produktprogramm, Produktarchitektur, Produktionsstruktur und Supply-Chain.¹⁵

Übereinstimmend mit der Vorstudie lässt sich eine analytische Argumentation für das vermutete multidimensionale und hochgradig vernetzte Interaktionsgeflecht durch Falsifikation einer Gegenhypothese anführen. Eine solche Gegenhypothese

¹² Vgl. Schuh et al. (2011) Integrative Standardisation, S.1ff.; Ulrich et al. (1998) Managing Product Variety, S.193f.

¹³ Vgl. Souren, Buchholz (2013) Vielfalt von Produktvarianten, S.202.

¹⁴ Vgl. Hu et al. (2008) Manufacturing Complexity, S.45; Oscampo, Vandaele (2002) Product Heterogeneity Index, S.45.

¹⁵ Vgl. Schuh et al. (2011) Integrative Standardisation, S.4ff.; siehe auch Kapitel 5.2.

würde die Vermutung einer Near-Decomposability¹⁶ eines Produkt-Produktionssystems darstellen. Diese Gegenhypothese lässt sich jedoch unter Bezugnahme auf das ‚Requisite-Variety‘-Fundamentalsatzes der Kybernetik nach ASHBY¹⁷ falsifizieren. Dem Gesetz zufolge muss ein Handlungssystem (hier das betrachtete Produktionssystem) zumindest eine ebenbürtige Komplexität aufweisen wie das zu gestaltende Sachsystem (hier das Produkt), um es beherrschen zu können.¹⁸ Die gegenseitige Bedingung zwischen Handlungs- und Sachsystem bildet sich zwingend auf die Elemente eines Produkt-Produktionssystems ab und verursacht die beschriebenen Wechselwirkungen, die zu einer Untrennbarkeit in der Betrachtung führen.

Ein weiteres Hindernis einer abgestimmten Standardisierung von Produkt-Produktionssystemen liegt in der Nichtlinearität und Randbedingungsabhängigkeit der Interaktionsbeziehungen. So wurden von FISHER/ITTNER in einer Studie innerhalb der U.S.-amerikanischen und japanischen Automobilindustrie Indizien gefunden, nach denen Produktvielfalt bis zu einem bestimmten Grad vernachlässigbar geringe Auswirkungen auf die Prozesseffizienz hat, jenseits des kritischen Punktes jedoch einen maßgeblichen Effizienzabfall verursacht.¹⁹ Darüber hinaus wurde u. a. von MACDUFFIE/SETHURAMAN/FISHER eine Abhängigkeit der Interaktionsbeziehungen von Randbedingungen, wie dem implementierten Produktionskonzept, den genutzten Fertigungstechnologien, dem Grad des Einsatzes von Lean-Production-Ansätzen oder der Bevorratungsstrategie festgestellt.²⁰

Die Summe aus Multidimensionalität, Randbedingungsabhängigkeit und Nichtlinearität der Beziehungen sowie der Aufsplitterung der Auswirkungen von Komplexität über das gesamte Produkt-Produktionssystem²¹ verhindern bislang eine Beherrschbarkeit und somit die integrative Standardisierung. So werden in der industriellen Praxis die Auswirkungen der Komplexität systematisch fehlge-

¹⁶ Unter Near-Decomposability wird eine geringe Beziehungsstärke zwischen Teilsystemen eines Gesamtsystems in Relation zur Beziehungsstärke innerhalb der Teilsysteme verstanden. Angenähert können die Teilsysteme eines solchen Systems als autonom betrachtet werden, sodass eine Gesamtsystembetrachtung einen vernachlässigbar geringen Mehrwert gegenüber einer Teilsystembetrachtung bietet. Siehe Simon (1962) *Architecture of Complexity*, S.475f.

¹⁷ Vgl. Ashby (1956) *Introduction to Cybernetics*, S.206 ff.

¹⁸ Vgl. Ehrlenspiel (2009) *Integrierte Produktentwicklung*, S.46.

¹⁹ Vgl. MacDuffie, Sethuraman, Ittner (1996) *Product Variety*, S.365f.

²⁰ Vgl. Cachon, Olivares (2010) *Finished-Goods Inventory*, S.210ff.; Jacobs, Vickery, Droge (2007) *Product Modularity*, S.1049; Pil, Holweg (2004) *Product Variety*, S.394f.; Clark (1996) *Manufacturing Paradigm*, S.56; MacDuffie, Sethuraman, Fisher (1996) *Product Variety*, S.360 ff.

²¹ Vgl. Bayer (2010) *Variantenmanagement*, S.52 ff.; Schuh, Lenders, Nußbaum (2010) *Wirkungsgrad von Produktkomplexität*, S.473; Meyer (2007) *Komplexitätsmanagement*, S.31.

schätzt.²² Folge dieser Problematik sind Fehlabbildungen innerhalb eines Produkt-Produktionssystems. SCHEITER/SCHEEL/KLINK beziffern das Kostenvolumen der komplexitätsbedingten Fehlabbildungen mit 30 Mrd. Euro p.a. über alle DAX-Konzerne. Das entspricht einer durchschnittlichen EBIT-Reserve von ca. 4%.²³

Das Praxisdefizit lässt sich in Form einzelner Fallbeispiele belegen, die dem Autor der Arbeit im Rahmen der bisherigen Tätigkeiten begegnet sind. So steht beispielsweise ein Hersteller mechatronischer Produkte vor der Herausforderung, weltweit innerhalb weniger Tage lieferfähig zu sein. Trotz der Lieferzeitproblematik wurde in der Vergangenheit das Produktprogramm um eine Vielzahl von Varianten erweitert. Die Summe der Varianten kann aufgrund der Kapitalkosten nicht an jedem Vertriebsstandort mit ausreichenden Pufferbeständen bevorratet werden. Da die Wirkbeziehung zwischen Lieferfähigkeit und Variantenvielfalt nicht explizit bekannt ist, konnte hier bisher keine systematische Optimierung erfolgen.

Ein weiteres Beispiel für eine solche Fehlabbildung zeigt der Fall eines mittelständischen Herstellers von Maschinenelementen, bei dem ein Vertriebsmitarbeiter durchschnittlich nur ca. 20% der Varianten im Produktprogramm kennt und dem Kunden erklären kann. Produktentwicklung und Produktion sind allerdings so organisiert, dass die gesamte Bandbreite der Varianten abgebildet werden kann. Große Teile der vorgehaltenen Produktvielfalt stellen damit eine komplexitätsbezogene Überkapazität dar.

Ein drittes Beispiel stellt ein U.S.-amerikanischer Hersteller von Nutzfahrzeugen dar, der aufgrund des sehr umfangreichen Konfigurationsraumes deutliche Einschränkungen der Produktionseffizienz erfährt. Durch unterschiedliche Optionsumfänge treten signifikante Austaktungsverluste in der Montagelinie auf. Angegliedert an eine Taktmontage werden maßgebliche Anteile der Sonderausstattungen in einer werkstattähnlichen ‚Offline Area‘ bei geringer Prozessesstandardisierung montiert. Auch hier sind die vielfaltsbedingten Effekte auf Gesamtsystemebene bislang nicht quantifizierbar und keine systematische Verbesserung möglich.

1.3 Zielsetzung und Forschungsprogramm

Ausgehend von der beschriebenen Problemstellung gilt die Ermöglichung systematischer Optimierungsentscheidungen zur integrativen Standardisierung von Pro-

²² Vgl. Banker et al. (1990) Product and Process Complexity, S.270; Cooper, Kaplan (1987) Cost Accounting, S.213.

²³ Vgl. Scheiter, Scheel, Klink (2007) Complexity, S.1.

dukt-Produktionssystemen als Hauptziel der Arbeit. Konkret sind hierzu die komplexitätsbedingten Wirkbeziehungen innerhalb eines Produkt-Produktionssystems in ein Erklärungsmodell zu überführen, das gleichzeitig zu Prognosezwecken einsetzbar ist. Das zu entwickelnde Erklärungsmodell soll die Form eines Kennlinienmodells aufweisen. Somit leitet sich folgendes Hauptziel und eine korrespondierende Hauptforschungsfrage für die vorliegende Arbeit ab:

Hauptziel – Ermöglichung einer integrativen Standardisierung von Produkt-Produktionssystemen durch Schaffung eines zusammenhängenden Modells komplexitätsbezogener Wirkbeziehungen.

Hauptforschungsfrage – Wie kann mittels Kennlinientheorie das komplexitätsbezogene Verhalten eines Produkt-Produktionssystems erklärend modelliert und prognostiziert werden?

Das beschriebene Hauptziel kann in drei Teilziele strukturiert werden. Das erste Teilziel besteht darin, ein deskriptives und generisches Modell eines Produkt-Produktionssystems zu entwickeln, das die relevanten Elemente bzw. Dimensionen vor dem Hintergrund der Komplexitätsperspektive erfasst und durch Kennzahlen operationalisiert. Zur Zielerreichung stellt das integrative Bewertungsmodell für Produkt-Produktionssysteme nach NUFBAUM²⁴ eine wesentliche Grundlage dar.²⁵ Aus dem Teilziel folgt als erste Leitfrage:

Erste Leitfrage – Was sind strukturbildende und komplexitätsbezogene Elemente eines Produkt-Produktionssystems?

Das darauf aufbauende, zweite Teilziel ist die Entwicklung eines qualitativen, hypothesenbasierten Modells der komplexitätsbedingten Wirkbeziehungen der identifizierten Elemente eines Produkt-Produktionssystems sowie hiermit verbundener externer Einflussgrößen. Das Modell dient zur Koordination des weiteren Forschungsprozesses in Form eines qualitativen Bezugsrahmens. Entsprechend kann die zweite Leitfrage wie folgt formuliert werden:

Zweite Leitfrage – Welche prinzipiellen komplexitätsbezogenen Wirkbeziehungen bestehen zwischen den strukturbildenden Elementen eines Produkt-Produktionssystems?

Als letztes und umfangreichstes Teilziel ist das beabsichtigte Erklärungsmodell der komplexitätsbedingten Wirkbeziehungen innerhalb eines Produkt-Produktionssystems auf quantitativer Ebene zu entwickeln und auf Basis empirischer Betrachtungen

²⁴ Vgl. Nußbaum (2011) Wirkungsgrad von Produktkomplexität, S.105ff.

²⁵ Siehe Kapitel 3.

tungen zu validieren. Das Erklärungsmodell stellt eine abgesicherte Konkretisierung des zuvor erarbeiteten qualitativen Bezugsrahmens dar. Es ergibt sich folgende dritte Leitfrage:

Dritte Leitfrage – *Welcher Art und Form sind die komplexitätsbezogenen Wirkbeziehungen innerhalb eines Produkt-Produktionssystems und wie können diese quantitativ und parametrisiert modelliert werden?*

Anhand der beschriebenen Ziele sowie der Hauptforschungsfrage und der zugeordneten Leitfragen ist das Forschungsprogramm der Arbeit definiert. Im Folgenden soll eine Lösungshypothese beschrieben werden, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu konkretisieren und zu validieren ist.

1.4 Lösungshypothese

Beschriebener Kern der Arbeit ist die Modellierung der komplexitätsbezogenen Wirkbeziehungen innerhalb von Produkt-Produktionssystemen. Wie festgestellt, handelt es sich um Beziehungen multidimensionaler, randbedingungsabhängiger und nichtlinearer Art. Um die Beziehungen abzubilden und somit prognostizierbar zu machen, stehen grundsätzlich verschiedene Ansätze bereit. Sie gliedern sich in experimentelle Ansätze, wie die Simulation, deduktive Ansätze auf Basis rein analytischer Modellerleitung und hybride, experimentell-deduktive Ansätze, wie die Kennlinientheorie.²⁶

Die Nutzung experimenteller Ansätze steht im Konflikt zur festgestellten Multidimensionalität der Beziehungen. Die Anwendung eines rein experimentellen Ansatzes macht eine Vielzahl einzelner Experimente notwendig, innerhalb derer jeweils entlang einzelner Dimensionen Variationen am System erfolgen. Das hierdurch bedingte exponentielle Anwachsen des experimentellen Aufwandes soll als Grund dienen, diesen Ansatz für die vorliegende Arbeit zurückzustellen.²⁷ Die Durchführbarkeit eines rein deduktiven Ansatzes dagegen wird durch die Vielzahl notwendiger Annahmen und Vereinfachungen, um eine vollständige analytische Herleitbarkeit des Modells zu ermöglichen, sowie deren fehlender Verallgemeinerbarkeit begrenzt.²⁸ Durch Wahl des hybriden Ansatzes, also einer experimentell-deduktiven Modellbildung, können die genannten Einschränkungen kompensiert werden. Hierbei wird durch analytische Modellierung eine Plattform zur Integration von Einzelexperimenten zu einem Gesamtmodell geschaffen. Es werden sowohl

²⁶ Vgl. Nyhuis (2008) Produktionskennlinien, S.189f.

²⁷ Vgl. Kennemann et al. (2010) Produktionskennlinien, S.866.

²⁸ Vgl. Nyhuis (2008) Produktionskennlinien, S.189f.

der experimentelle Aufwand als auch die Anzahl notwendiger Annahmen auf ein angemessenes Niveau reduziert. Einen Vertreter dieser Gruppe von Ansätzen stellt die Kennlinientheorie dar, die als Grundlage der Dissertation dienen soll.²⁹

Als Kennlinie werden mathematisch-funktionale Zusammenhänge relevanter Kenngrößen sowie deren grafische Repräsentation in Form von Kurvenverläufen bezeichnet.³⁰ Im Speziellen betrachtet die Kennlinientheorie Produktionssysteme aus logistischer Perspektive.³¹ Maßgebliche produktionslogistische Kenngrößen sind Durchlaufzeiten, Bestände, Termintreue und Auslastung eines Produktionssystems. Analog zum skizzierten Dilemma der Produkt- und Produktionskomplexität besteht zwischen den logistischen Kenngrößen ein Spannungsfeld. Die Beziehungen der Kenngrößen untereinander werden im Rahmen der Kennlinientheorie als Kennlinien expliziert. Sie dienen der Positionierung und Optimierung eines Produktionssystems unter Vorgabe einer Zielpriorisierung.³²

Innerhalb bestehender Ansätze der Kennlinientheorie fehlt bisher eine Betrachtung der Einflüsse von Produkt- und Produktionskomplexität, obwohl die Kennlinientheorie als geeigneter Ansatz für die beabsichtigte Modellierung angesehen wird. Gründe für die Eignung bestehen in der Fähigkeit des Ansatzes, multidimensionale, randbedingungsabhängige und nichtlineare Zusammenhänge zu erfassen und zu modellieren. Dabei stellen die bestehenden Kennlinienmodelle einen Ausgangspunkt der Modellbildung dar, der um komplexitäts- und produktbezogene Aspekte zu erweitern ist. Aus dieser Erkenntnis heraus leitet sich die folgende Lösungshypothese ab, die dem geplanten Dissertationsvorhaben zugrunde liegt.

Lösungshypothese – Produkt- und Produktionskomplexität sowie deren Interaktionsbeziehungen untereinander können unter Nutzung der Kennlinientheorie erklärend modelliert und somit prognostiziert werden.

Die Lösungshypothese beinhaltet neben der zuvor begründeten Annahme der grundlegenden Eignung der Kennlinientheorie für das vorliegende Modellierungsziel weitere Elementarhypothesen. Diese Elementarhypothesen stellen fundamentale Annahmen für die Modellbildung dieser Arbeit dar. Im Gegensatz zur zentralen Lösungshypothese sind diese jedoch nicht einzeln durch empirische Versuche validier- oder falsifizierbar. Daher erfolgt hier eine Diskussion der jeweiligen Annahmeerlegitimierung.

²⁹ Vgl. Nyhuis (2008) Produktionskennlinien, S.190f.; Nyhuis (2008) Theorien der Logistik, S.13f.

³⁰ Vgl. Inderfurth, Schulz (2008) Lagerkennlinie, S.158.

³¹ Siehe Kapitel 2.2 und 4.3.3 für eine vertiefende Betrachtung der logistischen Kennlinientheorie.

³² Vgl. Kennemann et al. (2010) Produktionskennlinien, S.865.

Die erste der Elementarhypothesen besteht in der Annahme, dass das (zumindest teilweise) stochastische Verhalten eines Produkt-Produktionssystems durch ein deterministisches Modell, wie das der Kennlinientheorie, annähernd genau beschrieben werden kann. Beispielsweise könnten einzelne Produktvarianten unterschiedlich ausgeprägte Auswirkungen auf ein Produktionssystem besitzen.³³ Eine solche stochastische Auswirkungsvariabilität wird durch eine Erwartungswert- bzw. Mittelwertbildung innerhalb der Modellierung angenähert. Hierbei wird, analog zur Lernkurventheorie³⁴, ein stochastisches System zu einem quasi-deterministischen bzw. nicht-probabilistischen Modell vereinfacht. Ein solches Vorgehen entspricht der Methodik der logistischen Kennlinientheorie, bei der stochastische Prozesse anhand ihres Erwartungswertverlaufes modelliert werden. Für eine ausreichend große Gesamtheit an Betrachtungsfällen bzw. einen ausreichend großen Betrachtungszeitraum führt die logistische Kennlinientheorie trotz der konzeptionellen Vereinfachung zu ausreichend präzisen Ergebnissen.³⁵ Eine analoge Abstraktion von der Einzelfall- auf eine Gesamtsystemebene gilt als Voraussetzung und Einschränkung der Modellbildung dieser Arbeit. Eine Übertragung der Modellprognosen auf die Einzelfallebene ist daher nur bedingt möglich und nicht Ziel der Arbeit.

Eine zweite, verwandte Elementarhypothese betrifft die generelle Modellierbarkeit von Produkt-Produktionssystemen, als Folge nur unscharf prognostizierbaren menschlichen Handelns. Ein Beispiel für eine solche Unschärfe wäre die Präferenz eines Konstrukteurs im Gegensatz zu einem anderen Mitarbeiter, häufig Gleichteile für verschiedene Produktvarianten zu verwenden. Auf diese Weise können unterschiedlich starke Auswirkungen der Produktvielfalt auftreten. Diese Unschärfe korrespondiert mit einem grundlegenden Problem der Sozialwissenschaften, das von der Handlungstheorie adressiert wird.³⁶ Diese untersucht das (individuelle) Verhalten von Personen in Entscheidungssituationen. Innerhalb der Handlungstheorie stellt die Annahme rationalen Handelns („Rational-Choice-Theory“) eine verbreitete Modellgrundlage dar.³⁷ Auf dieser Basis wird hier als Elementarhypothese angenommen, dass eine Glättung einzelner Irrationalitäten über die Mittelwertbildung der Ergebnisse einer Vielzahl von Individualentscheidungen innerhalb eines Produkt-Produktionssystems die Unschärfeproblematik kompensiert.

³³ Vgl. Buchholz (2012) Theorie der Variantenvielfalt, S.101 ff.

³⁴ Vgl. Hieber (1991) Lern- und Erfahrungskurveneffekte, S.33 f.

³⁵ Vgl. Nyhuis (2008) Produktionskennlinien, S.205.

³⁶ Vgl. z.B. Miebach (2010) Handlungstheorie, S.17 ff.

³⁷ Vgl. z.B. Opp (2004) Theorie rationalen Handelns, S.43 ff.

Eine dritte Elementarhypothese ist, dass das beabsichtigte Erklärungsmodell gleichzeitig als Prognosemodell genutzt werden kann. Während ein Erklärungsmodell der Erläuterung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen dient, zielt ein Prognosemodell auf die Vorhersage von Auswirkungen ab. Die Hypothese erscheint jedoch als abgesichert, da bereits von HEMPEL eine generelle Strukturidentität zwischen Erklärungsmodellen und Prognosemodellen belegt wurde.³⁸ So können die modellierten Ursache-Wirkungs-Beziehungen eines Erklärungsmodells typischerweise zur Prognose von Auswirkungen genutzt werden. Ein Beispiel für eine solche Strukturidentität stellen die Modelle der Elastomechanik dar, die das Versagen einer mechanischen Konstruktion im Belastungsfall sowohl erklären als auch prognostizieren können.

Nachfolgend werden die drei Elementarhypothesen, die der Arbeit zugrunde liegen, sowie die Begründungen, die für die vorläufige Annahme der Hypothesen sprechen, zusammengefasst. Aufgrund der zentralen Rolle der Elementarhypothesen für die Zulässigkeit der Modellbildung müssen diese bezogen auf ihre Gültigkeit geprüft werden. Die Prüfung erfolgt durch den Versuch einer Falsifizierung anhand empirischer Daten realer Produkt-Produktionssysteme.³⁹

Erste Elementarhypothese – *Abbildbarkeit stochastischer Zusammenhänge innerhalb eines Produkt-Produktionssystems durch ein quasi-deterministisches Modell*

Annahmelegitimierung – *Mittelwertbetrachtung auf Gesamtsystemebene analog zur logistischen Kennlinientheorie*

Zweite Elementarhypothese – *Modellierbarkeit menschlichen Handelns in der Gestaltung und Steuerung eines Produkt-Produktionssystems*

Annahmelegitimierung – *Voraussetzung rationalen Handelns bei der Gestaltung und Steuerung des Produkt-Produktionssystems*

Dritte Elementarhypothese – *Nutzbarkeit des erarbeiteten Erklärungsmodells zur Prognose von Komplexitätsauswirkungen im Produkt-Produktionssystem*

Annahmelegitimierung – *Strukturidentität von Erklärungsmodellen und Prognosemodellen nach HEMPEL*

1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Die gestellte Forschungsfrage zielt auf eine Erklärung empirisch beobachtbarer und nachweisbarer Wirkzusammenhänge ab. Aus diesem Grund kann die Arbeit

³⁸ Vgl. Hempel (1965) *Scientific Explanation*, S.331 ff., Oeser (1979) *Strukturidentität*, S.43 ff.

³⁹ Siehe Kapitel 7.