

Bewertung von Komplexität in Materialflusssystemen der Prozessindustrie am Beispiel der Stahl- und Feuerfestindustrie

Dissertation

von

Dipl. Ing. Barbara Krenn

am

Lehrstuhl Industrielogistik
der Montanuniversität Leoben

Leoben, im Juli 2008

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Danksagung

Frau **Prof. Dr. Corinna Engelhardt-Nowitzki**, Leiterin des Lehrstuhls für Industrielogistik, danke ich für die Betreuung der Arbeit und für die wertvollen Anregungen und Diskussionen über das Themengebiet.

Herrn **Prof. Siegfried Augustin** danke ich für die kurzfristige Bereitschaft die Zweitbetreuung der Arbeit zu übernehmen und für die hilfreichen Feedbacks.

Meinem Kollegen **Dr. Helmut Zsifkovits** danke ich für die ständige Bereitschaft Anregungen und Hilfestellungen zu geben sowie Industriekontakte zu vermitteln. Er war eine große Inspirationshilfe und kritischer Prüfer zugleich.

Herrn **Dipl.-Inf. Christian Savu-Krohn** danke ich für seine große Geduld und Hilfe bei der Entwicklung von Ideen, der Formulierung mathematischer Zusammenhänge und seine Unterstützung während dieser oft stressigen Zeit.

Meinen Industriekontakten danke ich auch herzlich für die vielen hilfreichen Diskussionen und für das bereitgestellte Datenmaterial.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für Ihre Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung - Herausforderungen für die Gestaltung und Steuerung von Materialflüssen in der Prozessindustrie	1
2	Charakterisierung der Heterogenität in der Prozessindustrie	7
2.1	Definition und Charakterisierung der Prozessindustrie.....	7
2.1.1	Klassifizierung der Stahlindustrie	11
2.1.2	Klassifizierung der Feuerfestindustrie.....	12
2.2	Die Typologie der Prozessindustrie	13
3	Herausforderungen und Vereinfachungsregeln für Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie	23
3.1	Definitionen und Grundformen des Materialflusses	23
3.2	Materialflusstruktur und Anforderungen in der Stahlindustrie.....	29
3.2.1	Innerbetriebliche Materialflussabläufe in der Stahlindustrie	29
3.2.2	Schwierigkeiten im Materialflusssystem der Stahlindustrie.....	33
3.3	Materialflusstruktur und Anforderungen in der Feuerfestindustrie	40
3.3.1	Innerbetriebliche Materialflussabläufe in der Feuerfestindustrie	40
3.3.2	Schwierigkeiten im Materialflusssystem der Feuerfestindustrie	41
3.4	Logistische Herausforderungen im Materialflusssystem in der Stahl- und Feuerfestindustrie	47
3.4.1	Herausforderungen im Materialfluss der Beschaffung.....	48
3.4.2	Herausforderungen im Materialfluss der Produktion	50
3.4.3	Herausforderungen im Materialfluss der Distribution	55
3.4.4	Herausforderungen im Materialfluss der Entsorgung	56
3.5	Regeln zur Vereinfachung von Flüssen in der Stahl- und Feuerfestindustrie	57
3.5.1	Vereinfachung von Materialflüssen nach Towill.....	57
3.5.2	Die Umsetzbarkeit genereller Optimierungsregeln für den Materialfluss in der Stahl- und Feuerfestindustrie	64
3.5.3	Empfehlungen zum Materialflussmanagement in der Stahl- und Feuerfestindustrie.....	72
4	Komplexitätsausprägungen im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie	77
4.1	Definition Komplexität und System	77
4.2	Abgrenzung komplexes versus kompliziertes System	80
4.3	Eigenschaften komplexer Systeme	83
4.4	Komplexitätsarten im Unternehmen.....	86
4.4.1	Strukturelle Komplexität.....	87
4.4.2	Funktionale Komplexität.....	88
4.5	Vergleich komplexer Systeme mit Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie	89
4.5.1	Komplexe Eigenschaften im Materialfluss	90
4.5.2	Komplexitätsarten und -treiber im Unternehmen	93
4.6	Komplexitätsmanagement im Materialflusssystem	97
4.6.1	Komplexität und Varietät	98
4.6.2	Methoden zur Vermeidung, Beherrschung und Reduzierung von Komplexität	100
4.6.3	Maßnahmen in der Stahl- und Feuerfestindustrie um Komplexitätstreibern entgegenzuwirken	103
4.7	Komplexitätskosten und ihre Ausprägungen.....	107
4.7.1	Definition und Arten von Komplexitätskosten	108
4.7.2	Komplexitätsbedingte Kosten im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie.....	114

5	Konzept zur Bewertung von Komplexität in der Prozessindustrie	125
5.1	Messung und Abbildung von Komplexität.....	125
5.2	Bewertung von Komplexität im Materialflusssystem der Feuerfestindustrie.....	128
5.3	Beurteilung der Komplexität von Variantenkombinationen anhand eines konkreten Beispiels	141
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	165
	Literaturverzeichnis	169
	Anhang	187
	Gesprächsprotokolle.....	187
	Auswertungen der Komplexitätsberechnungen.....	191
	Beispiele zum Vergleich der Formeln zur Berechnung der durchschnittlichen Schrittzahl und der Schrittzahl bei durchschnittlicher Produktionsmenge	206

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2: Typologie der Industriebranchen nach Taylor	14
Abbildung 3: Typologie der Branchen der Prozessindustrie nach Fransoo und Rutten.....	15
Abbildung 4: Prozessindustrie und diskrete Fertigung: Verhältnis Input/Output	18
Abbildung 5: Klassifizierung der Branchen nach Prozesstypen (Eigendarstellung)	20
Abbildung 6: Materialflussverlauf in der Wertschöpfungskette	26
Abbildung 7: Linearer Materialfluss	27
Abbildung 8: Konvergierender Materialfluss.....	28
Abbildung 9: Divergierender Materialfluss	28
Abbildung 10: Zyklischer Flussverlauf	28
Abbildung 11: Genereller Flussverlauf	29
Abbildung 12: Verfahrenswege für die Herstellung von Stahl.....	30
Abbildung 13: Materialflussverlauf in einem integrierten Hüttenwerk	31
Abbildung 14: Produktionsstruktur in der Stahlindustrie	32
Abbildung 15: Materialflussverläufe in der Feuerfestindustrie (Eigendarstellung in Anlehnung an BMLFUW)	41
Abbildung 16: Morphologischer Kasten Charakteristika Prozessindustrie (eigene Darstellung).....	47
Abbildung 17: Die durchschnittlichen Prozentsätze der Umsetzung der 12 Regeln in der Praxis	63
Abbildung 18: Reihung der 12 Regeln nach Towill für die Stahl- und Feuerfestindustrie	64
Abbildung 19: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung I.....	65
Abbildung 20: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung II	67
Abbildung 21: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung III	68
Abbildung 22: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung IV.....	70
Abbildung 23: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung (Regel 17-18)	71
Abbildung 24: Abhängigkeiten und Synonyme in den Materialflussgrundsätzen	73
Abbildung 25: Umsetzbarkeit, Nützlichkeit der Regeln für die Stahl- und Feuerfestindustrie zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung	74
Abbildung 26: Komplexe Systeme und ihre Einflussfaktoren	81
Abbildung 27: Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungskomplexität	89
Abbildung 28: Mögliche Komplexitätstreiber im Unternehmen	95
Abbildung 29: Supply Chain Komplexitätsmanagement Strategien	101
Abbildung 30: Maßnahmen und Ansätze zum Komplexitätsmanagement.....	102
Abbildung 31: Veränderung des langfristigen Stückkostenverlaufs durch das Auftreten von Komplexitätskosten	110
Abbildung 32: Komplexitätskostenkategorien	112
Abbildung 33: Auswirkungen einer Variantenverdopplung auf die Stückkosten	119

Abbildung 34: Produktionsablauf bei geformten, ungebrannten Steinen (Eigendarstellung in Anlehnung an BMLFUW)	130
Abbildung 35: Abkürzungsverzeichnis	131
Abbildung 36: Grafische Darstellung der Schwankungsbreiten an produzierten Mengen einzelner Varianten (eigene Darstellung, beispielhaft)	132
Abbildung 37: Unterschiede geformte, ungebrannte Produktlinie zu gebrannten Produkten (Eigendarstellung in Anlehnung an BMLFUW)	142
Abbildung 38: Übersicht über das Fassungsvermögen/die Anzahl an Aggregaten und die benötigte Zeit	146
Abbildung 39: Übersicht über die Schwankungsbreite der Produktionsmengen der Varianten	146
Abbildung 40: Durchschnittliche Produktionsmenge der Varianten im Zeitraum 2007	148
Abbildung 41: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl	149
Abbildung 42: Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl	150
Abbildung 43: Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen	151
Abbildung 44: Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen ohne Berücksichtigung der Variante 9	153
Abbildung 45: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl ohne Berücksichtigung der Variante 9	154
Abbildung 46: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl ohne Berücksichtigung der Variante 9	154
Abbildung 47: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl	155
Abbildung 48: Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl	156
Abbildung 49: Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen	157
Abbildung 50: Reduktion der Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen durch Erhöhung des Fassungsvermögens der Pressen	158
Abbildung 51: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten	160
Abbildung 52 Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten	161
Abbildung 53: Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen mit Berücksichtigung von Kosten	162

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Characteristics of process/flow versus batch/mix businesses.....	15
Tabelle 2: Übereinstimmende Merkmale der Stahlindustrie und der Feuerfestindustrie.....	45
Tabelle 3: Die sechs Gesetze der Fertigungssysteme	58
Tabelle 4: Regeln zur Vereinfachung des Flusses.....	59
Tabelle 5: „Muss“-Regeln zur Vereinfachung von Flüssen in der Stahl- und Feuerfestindustrie.....	75
Tabelle 6: „Kann“ Regeln zur Materialflussvereinfachung in der Stahl- und Feuerfestindustrie	75
Tabelle 7: Definitionsübersicht zum Begriff Komplexität	79
Tabelle 8: Komplexitätsdiagnosetabelle für Materialflusssysteme	90
Tabelle 9: Komplexitätstreiber im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie	103
Tabelle 10: Komplexitätskostenursachen bei steigender Variantenvielfalt	114
Tabelle 11: Kostenwirkungen der Komplexitätstreiber im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie (eigene Darstellung)	117
Tabelle 12: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „worst case“	150
Tabelle 13: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „best case“	151
Tabelle 14: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen	152
Tabelle 15: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen ohne Variante 9.....	153
Tabelle 16: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „worst case“	155
Tabelle 17: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „best case“	156
Tabelle 18: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen	157
Tabelle 19: Schwankungsbreite der Schrittzahl für die Variantenkombinationen.....	159
Tabelle 20: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „worst case“ mit Berücksichtigung von Kosten	160
Tabelle 21: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „best case“ mit Berücksichtigung von Kosten	161
Tabelle 22: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen mit Berücksichtigung von Kosten	162
Tabelle 23: Anzahl an möglichen Variantenkombinationen	193
Tabelle 24: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl	194
Tabelle 25: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl	196
Tabelle 26: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen.....	197
Tabelle 27: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen ohne Variante 9	199
Tabelle 28: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl	200
Tabelle 29: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl	200
Tabelle 30: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen.....	201

Tabellenverzeichnis

Tabelle 31: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten	203
Tabelle 32: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten	204
Tabelle 33: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen mit Berücksichtigung von Kosten.....	206

1 Einleitung - Herausforderungen für die Gestaltung und Steuerung von Materialflüssen in der Prozessindustrie

Die Prozessindustrie ist eine durch sehr divergente Industriezweige geprägte Branche, deren Gemeinsamkeiten auf den ersten Blick nicht offensichtlich sind. Zu den typischen Vertretern der Prozessindustrie zählen sowohl die Papier- als auch die Stahl- und Pharmaindustrie. Obwohl die genannten Industrien ein breites Spektrum an Produkten abdecken und eine Ähnlichkeit derselben auf den ersten Blick nicht offensichtlich gegeben scheint, zeichnen sie sich doch alle durch das gemeinsame Prinzip der Umwandlung von Rohstoffen in Produkte durch chemische und/oder physikalische Prozesse aus. Zwar existieren grundsätzlich ähnliche Charakteristika mit bestimmten Zweigen der Stückgutindustrie, dennoch ist das Geschäft in den einzelnen Branchen in der Regel sehr spezifisch und durch heterogene Anforderungen an die Logistik, speziell an den Materialfluss, gekennzeichnet. Dies spiegelt sich auch in den unterschiedlichen Definitionen in der Literatur wider.¹

Diese Heterogenität der Branchen hat wesentliche Implikationen für den Materialfluss: Der Materialflussverlauf ist in der Prozessindustrie vor allem geprägt durch verfahrenstechnische Bedingungen, wozu z. B. zeitliche Mindest- bzw. Maximalabstände zwischen der Bearbeitung von Aufträgen, begrenzte Puffer- und Lagermöglichkeiten, verschiedenartig ausgeprägte Materialflussverläufe und in der Fertigung einzuhaltende Temperaturbereiche zählen. Die Standpunkte zum Materialflussverlauf in der Prozessindustrie sind teilweise sehr unterschiedlich, die Einstufung reicht von einfach bis komplex.² Eine einheitliche Betrachtung des Materialflusses in der Prozessindustrie ist schwierig, unter anderem aufgrund der heterogenen Anforderungen in den einzelnen Branchen. Durch diese Heterogenität ist auch eine eindeutige Definition dieser Industrie mit Problemen behaftet, dies zeigt sich auch in dem Umstand, dass sich in der wissenschaftlichen Literatur im Feld Logistik nur sehr wenige Quellen finden, die sich eingehend mit der Prozessindustrie befassen. Eine Vereinheitlichung der Materialflussspezifika sich ähnlicher Zweige der Prozessindustrie kann aber vorgenommen werden und erscheint sinnvoll, wie diese Arbeit zeigen wird, in Hinblick auf die Entwicklung und Nutzung gemeinsamer methodischer Ansätze für die Planung und Steuerung der Materialflüsse.

Intern und extern optimale gestaltete und gesteuerte Flüsse sind unbedingte Voraussetzung für Produktivität und Konkurrenzfähigkeit einer Unternehmung in Zeiten eines starken, zunehmend internationalisierten Wettbewerbsdrucks. Durch Transparenz der Herausforderun-

¹ Vgl. Cox et al. (1992), Schönsleben (2000), Dennis, Meredith (2000a, b) oder Loos (1997)

² Vgl. Dennis, Meredith (2000a, b), Schönsleben (2000), Cox et al. (1992), Taylor et al. (1981), Fransoo, Rutten (1994)

gen im Materialflusssystem und Wissen um die Gestaltungs- und Steuerungsmöglichkeiten kann ein deutlich effizienterer und reibungsloserer Ablauf der Flüsse in der Prozessindustrie erzielt werden.

Aufgrund der immer stärker fragmentierten Abläufe und der in einer zunehmenden Unbeständigkeit der Rahmenbedingungen begründeten Dynamik steigt die Komplexität in den Unternehmen an.³ Variantenvielfalt ist z. B. ein typischer Komplexitätstreiber, der den Planungs- und Steuerungsaufwand in der Prozessindustrie in die Höhe treibt. In der Literatur sind nur wenige Methoden zur Komplexitätsbewertung im Fertigungsbetrieb beschrieben.⁴ Die meisten entwickelten Methoden zur Komplexitätsbewertung⁵ in der Fertigung basieren auf informationstheoretischen Ansätzen, sind auf die diskrete Fertigung ausgelegt und daher vielfach nicht in der Prozessindustrie anwendbar. Zur Quantifizierung der komplexitätsbedingten Kosten ist der Begriff der Komplexitätskosten entstanden. Komplexitätskosten sind wie Komplexität ebenfalls sehr unterschiedlich definiert⁶ und auch Konzepte zur Bestimmung bzw. Zuordnung von Komplexitätskosten in der Kostenrechnung sind kaum zu finden.⁷

Zur Lösung der geschilderten Probleme besteht folgender Handlungsbedarf: Eine konkrete Analyse der Materialflussverläufe und -probleme bzw. der logistischen Herausforderungen in der Prozessindustrie (bzw. in einem Branchencluster) muss durchgeführt werden, um zielführende logistische Steuerungs- oder Optimierungsmaßnahmen entwickeln zu können. Die Informationen zu Materialflussverläufen sind sehr unterschiedlich und sollten in eine einheitliche Form gebracht werden, um generelle Maßnahmen und Methoden zur Materialflussvereinfachung und -optimierung ableiten zu können. Ob und in welcher Weise das Materialflusssystem durch Komplexität gekennzeichnet und beeinflusst wird, muss im spezifischen Kontext der Prozessindustrie beschrieben werden, um anschließend wirksame Mittel zur Vermeidung, Reduzierung bzw. Beherrschung erarbeiten zu können. Eine Methode zur einfachen, praktische durchführbaren Bewertung von Komplexität im Produktionsablauf der Prozessindustrie wäre wertvoll, um mehr Transparenz in die Zusammenhänge zwischen Materialflussverläufen und Komplexität zu bringen und so zur Entscheidungsfindung in der Produktionsplanung beizutragen. In dieser Arbeit soll ein Ansatz vorgestellt werden, der in Anlehnung an die Größe der Laufzeitkomplexität (Informatik) ein neues Maß zur Komplexitätsbeurteilung in der Prozessindustrie liefert. Damit können gezielt Maßnahmen zum angemessenen Umgang mit Komplexität in diesen Materialflusssystemen abgeleitet werden.

³ Vgl. Nedeß et al. (2006), S. 239

⁴ Vgl. Frizelle und Woodcock (1995), Deshmukh et al. (1998), Calinescu et al. (2000), Sivadasan et al. (2002)

⁵ Vgl. Frizelle und Woodcock (1995), Deshmukh et al. (1998), Calinescu et al. (2000), Sivadasan et al. (2002)

⁶ Vgl. Becker (1992), Gutenberg (1979), Becker (2001), Pfeiffer et al. (1992), Ahlbach (1988), Adam, Rollberg (1959)

⁷ Vgl. Reiners, Sasse (1999), S. 222

Aufgrund dieses Handlungsbedarfes ist es das Ziel dieser Arbeit, Komplexitätsausprägungen im Materialflusssystem zu identifizieren, Maßnahmen zur Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung zu entwickeln und so eine neue Art der Evaluierung von Komplexität im Produktionsablauf der Prozessindustrie zu entwickeln. Eine detaillierte Analyse der Materialflusssysteme, ihrer logistischen Herausforderungen, ihrer Komplexität und der damit verbundenen Kosten sind Basisvoraussetzungen zur Erfüllung dieser Aufgabenstellung. Neben der Identifikation von Komplexitätsarten und -treibern im Materialflusssystem werden auch Möglichkeiten zur Vereinfachung von Flüssen aufgezeigt, um Komplexität zu reduzieren. Es werden hierzu zwei spezielle Branchen ausgewählt, welche ähnlichen Charakteristika unterliegen und zu denen ein guter Zugang möglich ist: Einerseits die Stahl- und andererseits die Feuerfestindustrie.

Folgende Forschungsfragen werden im Rahmen der Arbeit beantwortet:

- Wie lassen sich die Branchen der Prozessindustrie in ein bestimmtes Cluster einteilen, können die Stahl- und Feuerfestindustrie als ein solches, in sich hinreichend homogenes Cluster betrachtet werden?
- Welche Charakteristika weisen Materialflusssysteme in der Stahl- und Feuerfestindustrie auf und ist für den Kontext dieser Arbeit eine gemeinsame Betrachtung sinnvoll?
- Welche logistischen Herausforderungen ergeben sich in den Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie und welche Möglichkeiten zur Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung gibt es?
- Welche Arten und Eigenschaften von Komplexität sind in diesen Materialflusssystemen identifizierbar und wie können Komplexitätskosten daraus abgeleitet werden?
- Wie ist Komplexität im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie bewertbar?

Die Arbeit besteht aus sechs Teilen, die im Folgenden dargestellt (Abbildung 1) und erläutert werden.

Nach der Einführung in das Themengebiet und der Definition der Zielsetzung widmet sich das in die Prozessindustrie einführende zweite Kapitel der Definition, der Diskussion der Gemeinsamkeiten und Heterogenitäten der Prozessindustrie sowie einer genaueren Charakterisierung des Branchenclusters Stahl- und Feuerfestindustrie. Dabei werden der allgemeine Begriff und die Typologie der Prozessindustrie untersucht sowie eine Differenzierung der dazugehörigen Sparten vorgenommen.

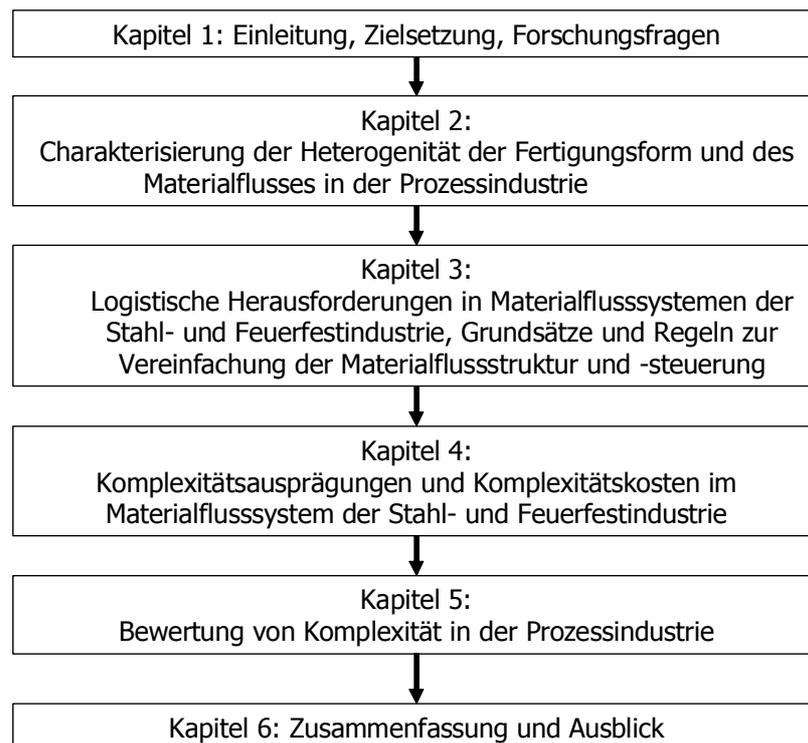


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Um die Herausforderungen für die Gestaltung und Steuerung von Materialflüssen in der Prozessindustrie aufzuzeigen, soll eine Untersuchung der Stahl- sowie der Feuerfestindustrie Rückschluss auf die Charakteristika des Materialflusses bzw. auf die spezifischen logistischen Anforderungen geben und mögliche Unterscheidungsmerkmale zur diskreten Fertigung aufzeigen. Daher stellt Kapitel drei die Verläufe und Eigenschaften des Materialflusses in den diesen Branchen gegenüber und erläutert ihre Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede und die damit verbundenen logistischen Herausforderungen. Detailliert wird dabei auf die Charakteristika der Materialflüsse in der Beschaffung, Produktion, Distribution und Entsorgung eingegangen. In Form eines morphologischen Kastens werden Merkmalsausprägungen in einzelnen Bereichen dargestellt. Im Anschluss werden Möglichkeiten zur Vereinfachung der Materialflusstruktur, -planung und -steuerung für die Stahl- und Feuerfestindustrie vorgestellt und diskutiert. Anschließend werden Empfehlungen für die Planung, Steuerung und Optimierung von Materialflüssen abgegeben.

Nach Analyse der Gegebenheiten im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie wird eine Untersuchung hinsichtlich der Komplexität in den Materialflusstrukturen vorgenommen. Es wird dabei erläutert, welchen Arten bzw. Eigenschaften von Komplexität die Materialflüsse in der Stahl- und Feuerfestindustrie unterliegen. Komplexitätstreiber werden identifiziert sowie Maßnahmen zur Senkung der Komplexität erläutert. Da sich Komplexität

auch in den Kosten widerspiegelt, sollen in Kapitel vier die durch Komplexitätstreiber in diesen Branchen hervorgerufenen Komplexitätskosten behandelt werden, um mehr Transparenz in die Gebiete der Komplexität und der Komplexitätskosten zu bringen.

Die Entwicklung einer neuen Methode zur Bewertung von Komplexität für die Produktion wird anschließend aufgezeigt. Anhand eines Produktionsmodells in einer Sparte der Feuerfestindustrie wird aufgezeigt, wie sich die Komplexität von Varianten beurteilen lässt und welche Schlüsse hinsichtlich Planung und Steuerung des Materialflusses daraus gezogen werden können (Kapitel fünf).

Die Arbeit schließt im sechsten Kapitel mit der Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse und einem Ausblick.

2 Charakterisierung der Heterogenität in der Prozessindustrie

Materialflüsse in der Prozessindustrie sind durch heterogene Rahmenbedingungen gekennzeichnet. Notwendige Voraussetzung zur Beantwortung der Forschungsfragen ist daher eine Aufarbeitung möglicher Definitionen der Prozessindustrie sowie eine anschließende Abgrenzung des Untersuchungsfeldes für die vorliegende Arbeit. Dies erfolgt im Abschnitt 2.1. Ergänzend nimmt Abschnitt 2.2 eine Klassifizierung nach Branchen vor, um anhand materialflussbezogener Kriterien die Heterogenität der Prozessindustrie aufzuzeigen, und das Untersuchungsfeld der vorliegenden Arbeit in ein Cluster einzuordnen.

2.1 Definition und Charakterisierung der Prozessindustrie

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Definitionen für den Begriff „Prozessindustrie“, die im Folgenden diskutiert werden. Dies geschieht, um die Breite der Anschauungen und die Schwierigkeiten einer allgemein gültigen Begriffserklärung für alle der Prozessindustrie zurechenbaren Branchen aufzuzeigen:

Die American Production and Inventory Control Society (APICS) definiert Prozessindustrie wie folgt: "Process industries are businesses that add value to materials by mixing, separating, forming and/or performing chemical reactions". Processes may be either continuous or batch and generally require rigid process control and high capital investment (Cox et al.⁸)

Eine ähnliche Definition findet sich bei Trautmann⁹: In Industriezweigen der Prozessindustrie wie der Chemie-, Pharma-, Nahrungsmittel-, Mineralöl- und Hüttenindustrie geschieht die Produktion verschiedener Enderzeugnisse durch Ausführung nacheinander ablaufender chemischer und physikalischer Transformationsschritte.

Nach Schönsleben¹⁰ umfasst die Prozessindustrie die Produzenten von chemischen Erzeugnissen, Papier, Lebensmitteln, Mineralöl, Gummi, Stahl und weitere. Er bezeichnet die Prozessindustrie als grundstoffverarbeitende Industrie und schließt sich der weiterführenden Definition nach Cox et al an.

Schönsleben spricht in Verbindung mit der Prozessindustrie auch von einer kontinuierlichen Fließfertigung, die eine extreme Form der Fließfertigung darstellt, da diese losgrößenlos produziert¹¹ und „[...] ganze Sequenzen von Arbeitsgängen unmittelbar nacheinander durchge-

⁸ Vgl. Cox et al. (1992), S. 38

⁹ Vgl. Trautmann (2000), S. 5

¹⁰ Vgl. Schönsleben (2004), S. 383

¹¹ Vgl. Schönsleben (2000), S. 118

führt werden müssen“¹². Cox et al.¹³ sprechen in dem Zusammenhang auch von „[...] a production approach with minimal interruptions in actual processing in any one production run or between production runs of similar products“.

Loos¹⁴ spricht von der Prozessindustrie als verfahrenstechnische Industrie.

Dennis und Meredith¹⁵ charakterisieren die Prozessindustrie in folgender Weise: “Process industries share characteristics resulting from their use of non-discrete materials and are typically contrasted from the discrete industries as a whole. They also generally produce homogenous products – products that cannot be separated or disassembled into component parts without some chemical process.”

Neumann et al. definieren Prozessindustrie wie folgt: “Process industries are characterized by using large amounts of heat and energy to physically or chemically transform materials“.¹⁶ Auch in dieser Definition findet sich der Bezug zu physikalischen/chemischen Transformationsprozessen wieder.

Der Überblick aus der Literatur zeigt, dass eine allgemein gültige Definition für die Prozessindustrie nicht vorhanden ist. Es gibt zahlreiche Ansätze, die Prozessindustrie über das Herstellungsverfahren charakterisieren.¹⁷

Typische Vertreter der Prozessindustrie, welche durch das EU-Projekt PRIMA identifiziert wurden, das die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Prozessindustrie fördern soll, sind:¹⁸

- Chemische Industrie
- Erdölverarbeitende Industrie
- Nahrungsmittelindustrie
- Pharmazeutische Industrie
- Elektrizitätsbetriebe
- Stahlindustrie
- Papierindustrie

Es lässt sich feststellen, dass ein oft in der Literatur genanntes Charakteristikum der Prozessindustrie¹⁹, die vorwiegende Verwendung von Verfahren zur Stoffumwandlung, durch die physikalische und chemische Eigenschaften der eingesetzten Stoffe verändert werden, auch weitere Industriezweige erfüllen. Dies sind z. B. die Bergbauindustrie, die Kunststoffindustrie und die Feuerfestindustrie, welche in Verbindung mit der Prozessindustrie jedoch nur selten

¹² Vgl. Schönsleben (2000), S. 283

¹³ Cox et al. (1992), S. 37

¹⁴ Vgl. Loos (1997), S. 3

¹⁵ Dennis, Meredith (2000a), S. 1085f.

¹⁶ Neumann et al. (2005), S. 495

¹⁷ Vgl. Cox et al. (1992), S. 37; Dennis, Meredith (2000a), S. 1085f.

¹⁸ Vgl. Loos (1997), S. 3

¹⁹ Vgl. Dennis and Meredith (2000b), Cox et al. (1992), Schönsleben (2000), Trautmann (2000)

genannt werden (vgl. EU-Projekt PRIMA²⁰). Industrien wie die Pharma-, Chemie- und Lebensmittelunternehmen dagegen werden sehr häufig mit dem Begriff der Prozessindustrie verbunden.²¹

Da der Übergang zwischen Prozessindustrie und Stückgutindustrie (diskreter Fertigung) teilweise oft fließend ist, ist eine eindeutige Zuordnung einzelner Branchen zur Prozessindustrie erschwert. Die Aufzählung der einzelnen Industriesparten dieser Industrieform ist daher in der Literatur nicht einheitlich.²² Somit sind eine Widerspruchsfreiheit und Eindeutigkeit der Branchen in der Prozessindustrie nicht unbedingt gegeben. Im Folgenden soll kurz auf den Unterschied Stückgutindustrie (diskrete Fertigung) und Prozessindustrie (kontinuierliche Fertigung) zur besseren Differenzierung eingegangen werden:

„Der Grad der Kontinuität der Bearbeitung, der Handhabung und des Transportes des Aktionsobjektes“²³ differenziert die Fertigungsformen in diskrete und kontinuierliche. „Sind die Funktionselemente eines Materialflusssystemes verkettet und im Sinne des Flussprinzips aufeinander abgestimmt, wird der Materialfluss als kontinuierlich bezeichnet“²⁴, der typischerweise in der Prozessindustrie oft vertreten ist.

Die Prozessindustrie produziert in den meisten Fällen Erzeugnisse in fixen Losgrößen aufgrund von Prozessbedingungen, Aggregatsgrößen etc. Die Produkte werden in festgelegten Einheiten wie Tonnen und Litern gemessen. Es wird nicht von Stückgut wie in der diskreten Fertigung (Stückgutfertigung) gesprochen.²⁵

Folgende Definitionen erläutern den Begriff des Stückgutes: „Stückgüter sind einzeln transportier- und erfassbare Guteinheiten. Diese können aus einem Einzelstück oder aus mehreren, zu einer Fördereinheit zusammengefassten Einzelteilen bestehen“²⁶. „Als Stückgut werden [...] alle Gegenstände bezeichnet, die ohne Rücksicht auf Form und Gewicht während des Förderns als Einheit zu sehen sind“²⁷. Das ist bei den meisten Gütern der Prozessindustrie wie z. B. bei Gas, Öl, Rohstahl, Schmelzen etc. nicht möglich.

Nichtdiskrete Einheiten werden ab einem bestimmten Punkt im Herstellungsprozess diskretisiert (Vereinzelungszeitpunkt). Daher stellt der betrachtete Zeitpunkt in der Produktion ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen Prozess- und Stückgutindustrie dar. Dieser

²⁰ Vgl. Loos (1997), S. 3

²¹ Vgl. Trautmann (2000), S. 5; Schönsleben (2004), S. 383

²² Vgl. Trautmann (2000), S. 5; Schönsleben (2004), S. 383, Loos (1997), S. 3

²³ Pawellek (2007), S. 83

²⁴ Pawellek (2007), S. 83

²⁵ Die Problematik der Einheitenzuordnung in der Prozessindustrie greift detailliert Appoo (1987), S. 79ff. auf.

²⁶ Dangelmeier (2001), S. 672

²⁷ Axmann (1993), S. 1

Übergangspunkt von der kontinuierlichen zur diskreten Fertigung kann sehr unterschiedlich und fließend in den einzelnen Branchen sein.

Viele Industrien sind daher hybride Formen, d. h. sie weisen sowohl Charakteristika der kontinuierlichen als auch Eigenschaften der diskreten Fertigung auf – nur zu verschiedenen Zeitpunkten in der Produktion²⁸. Man spricht auch in der Prozessindustrie von einer semi-kontinuierlichen Produktion, wenn entweder der Materialzugang kontinuierlich und der Abgang diskret oder der Zugang diskret und der Abgang kontinuierlich erfolgt.²⁹

Durch die schwierige Differenzierung des Übergangs zwischen Stückgutindustrie und Prozessindustrie mangelt es in der Literatur an einer einheitlichen Festlegung der Branchen der Prozessindustrie. Es ergeben sich aber auch Schwierigkeiten bei der generellen Anwendbarkeit von Methoden, Instrumenten für die Planung, Steuerung, etc. in der Prozessindustrie, da es keine einheitliche Definition und Abgrenzung zur Stückgutindustrie gibt. Bevor eine gemeinsame Betrachtung der Stahl- und Feuerfestindustrie möglich ist, muss im Vorfeld, aufgrund der mangelnden einheitlichen Definitionen, eine Klassifizierung beider Branchen getätigt werden.

Die vorliegende Arbeit orientiert sich an der Definition nach APICS, da diese Definition der Prozessindustrie die wesentlichen Merkmale dieser Branche wie die physikalischen und/oder chemischen Prozessschritte sowie die hohen Investitionskosten vereint: *Die Wertschöpfung in der Prozessindustrie erfolgt durch physikalische und/oder chemische Prozessschritte. Die Produktion erfolgt entweder kontinuierlich oder in Chargen and erfordert üblicherweise starre Prozesssteuerung und hohe Investitionskosten.*

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt aus mehreren Gründen im Branchencluster Stahl- und Feuerfestindustrie: Beide Branchen weisen große Ähnlichkeiten im Materialflusssystem und den möglichen Anforderungen an die Flussteuerung auf, der Grad der Kontinuität des Verlaufes ist in beiden Industriesparten ähnlich etc., d.h. aufgrund der recht homogenen Situation ist für die Clusterung Machbarkeit gegeben. Ein hohes Wachstum ist sowohl in der Feuerfestindustrie als auch in der Stahlindustrie zu verzeichnen, u. a. durch den Wirtschaftsboom in Südostasien³⁰ und den damit steigenden Anforderungen an die taktisch-operative Planung zur effizienten Materialflussteuerung und -optimierung. Transparenz in den logistischen Anforderungen und Komplexitätsausprägungen im Materialflusssystem aufzuzeigen, ist bei der Planung und Steuerung dieser Systeme von Vorteil. Die Montanuniversität Leoben ist durch ihre Forschung und Lehre der Stahlindustrie und der Feuerfestindustrie eng verbun-

²⁸ Vgl. Dennis and Meredith (2000b), S. 687

²⁹ Vgl. Günther (2004), S. 326

³⁰ Ameling (2006), S. 57

den. Aufgrund der guten fachlichen Durchdringung beider Industrien und dem großen Vorwissen um Materialflussabläufe und -probleme ergibt sich eine gute Basis für die Betrachtung der gewählten Industriesparten.

2.1.1 Klassifizierung der Stahlindustrie

Zur Charakterisierung der Stahlindustrie in Österreich bietet die Österreichische Systematik der Wirtschaftstätigkeiten, kurz ÖNACE, eine nach wirtschaftsstatistischen Kriterien erstellte Definition. ÖNACE ist die österreichische Version der NACE (Nomenclature générale des activités économiques dans les communautés européennes). Um die Besonderheiten des österreichischen Wirtschaftsgeschehens adäquater abbilden zu können, wurde jedoch von der ÖNACE eine weitere hierarchische Ebene, die der nationalen Unterklassen (6-Steller) eingeführt. Bis auf 4-Steller sind NACE und ÖNACE völlig ident. In dieser Einführung wird auf die bis zur dritten Stelle reichenden Einteilung nach ÖNACE zurückgegriffen, die der Einteilung nach NACE vollständig entspricht.

So wird nach der ÖNACE Klassifizierung die Stahlindustrie in die Kategorie der Sachgütererzeugung eingeordnet, mit den Bereichen 27 der Metallerzeugung und -bearbeitung und 28 der Herstellung von Metallerzeugnissen. Die Kategorie 27 wird folgendermaßen definiert: Dieser Bereich umfasst die Tätigkeiten des Schmelzens und Legierens von Eisenmetallen und Nichteisen (NE)-Metallen aus Erz, Roheisen oder Schrott mittels elektrometallurgischer und anderer metallurgischer Verfahren und Prozesse. Weiters beinhaltet diese Sparte die Produktion von Metalllegierungen und Superlegierungen durch Zugabe anderer chemischer Elemente zu reinen Metallen. Die nach dem Schmelzen und Legieren üblicherweise in Blockform zur Weiterverarbeitung bereiten Erzeugnisse werden durch Walz-, Zieh und Extrusionsverfahren zu Blech, Bandstahl, Stabstahl, Stangen oder Draht bzw. in geschmolzener Form zu Gussprodukten und anderen Grundmetallerzeugnissen verarbeitet³¹. Der Bereich 28 fokussiert sich die Herstellung reiner Metallerzeugnisse die üblicherweise statisch und unbeweglich sind wie z. B. Bauelemente und Behälter.³²

Folgende Teilbereiche weist die Metallerzeugung und -bearbeitung und Herstellung von Metallerzeugnissen auf:

- Abteilung 27: Metallerzeugung und -bearbeitung
 - 27.1: Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen
 - 27.2: Herstellung von Rohren
 - 27.3: Sonstige erste Bearbeitung von Eisen und Stahl
 - 27.4: Erzeugung und erste Bearbeitung von NE-Metallen

³¹ ÖNACE (2003), S. 79

³² ÖNACE (2003), S. 84

- 27.5: Gießereiindustrie
- Abteilung 28: Herstellung von Metallerzeugnissen
 - 28.1: Stahl- und Leichtmetallbau
 - 28.2: Kessel- und Behälterbau
 - 28.3: Herstellung von Dampfkesseln
 - 28.4: Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen
 - 28.5: Oberflächenveredelung, Wärmebehandlung und Mechanik
 - 28.6: Herstellung von Schneidwaren, Werkzeugen, Schlössern und Beschlägen
 - 28.7: Herstellung von sonstigen Eisen-, Blech- und Metallwaren

In der Unterkategorie 28 Herstellung von Metallerzeugnissen lassen sich die meisten Bereiche (28.1-28.4, sowie 28.6 und 28.7) der diskreten Fertigung (Stückgutindustrie) zuordnen.

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Untersuchung von Charakteristika kontinuierlicher, allenfalls quasi-diskretisierter Materialflüsse liegt, werden diese der Stückgutindustrie zuzurechnenden Sparten nicht in die Betrachtungen einfließen.

2.1.2 Klassifizierung der Feuerfestindustrie

Die Feuerfestindustrie stellt Feuerfeststeine und -formen einschließlich ungeformter Erzeugnisse und Funktionskeramiken her. Die Steine, Formen und Massen werden zur Zustellung von z. B. Hochöfen und Zinköfen, Abfallverbrennungsanlagen, Glaswannen, Pfannen und anderen Behälter im Stahlwerk etc. verwendet. Funktionskeramiken wie Spülsteine finden oft Einsatz in der Stahlindustrie und der glasverarbeitenden Industrie.

Ebenfalls nach der ÖNACE Klassifizierung³³, welche auch an dieser Stelle nur die ersten drei Stellen behandelt und damit ident mit der NACE Klassifizierung ist, wird die Feuerfestindustrie in die Kategorie der Sachgütererzeugung eingeordnet. Der Industriezweig wird in die Sparte 26 Herstellung und Bearbeitung von Glas, Herstellung von Waren aus Steinen und Erden eingegliedert. Folgende Unterteilung weist der Bereich 26 auf:

- 26.1: Herstellung und Bearbeitung von Glas
- 26.2: Keramik (ohne Ziegelei und Baukeramik)
- 26.3: Herstellung von keramischen Wand- und Bodenfliesen und -platten
- 26.4: Ziegelei, Herstellung von sonstiger Baukeramik
- 26.5: Herstellung von Zement, Kalk und gebrannten Gips
- 26.6: Herstellung von Erzeugnissen aus Beton, Zement und Gips
- 26.7: Be- und Verarbeitung von Natursteinen
- 26.8: Herstellung von sonstigen Mineralerzeugnissen

Die Feuerfestindustrie ist im Bereich 26.2 „Keramik“ aufgeführt und dort als Unterpunkt 26.26 „Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen“ konkret ausgewiesen.

³³ ÖNACE (2003), S. 72ff.

Die Stahl- und Feuerfestindustrie sind insofern typische Vertreter der grundstoffverarbeitenden Industrie, als dort Produkte aus Stoffen, die chemische und physikalische Veränderungsprozesse durchlaufen, erzeugt werden. Die Stahlindustrie wird im Vergleich zur Feuerfestindustrie viel öfter in Verbindung mit der Prozessindustrie genannt³⁴ obwohl beide Sparten durch ihre Charakteristik (physikalische und chemische Stoffumwandlung) dieser Industrie zuzuordnen sind.

Eine Einordnung der Stahl- und Feuerfestindustrie in eine bestimmte Gruppe der Prozessindustrie soll durch die Untersuchung der Typologie der Prozessindustrie im nächsten Abschnitt des Kapitels erreicht werden.

In beiden Industriesparten ist die Planung und Steuerung der Materialflüsse aufgrund verfahrenstechnischer und logistischer Gegebenheiten und Grenzen eine Herausforderung.³⁵ Ein optimaler Ablauf im Produktionssystem ist aber unabdingbar, um rentabel in diesen Bereichen zu wirtschaften. Untersuchungen zum Materialflusssystem, Komplexitätsgrad dieser Systeme, dessen Auswirkungen und Kosten sind ein wesentlicher Schritt Komplexität in diesen Systemen transparent zu machen und Möglichkeiten aufzuzeigen, Herausforderungen zu meistern und Schwierigkeiten zu reduzieren.

2.2 Die Typologie der Prozessindustrie

Da es sehr unterschiedliche Branchen in der Prozessindustrie gibt, soll hier ergänzend eine Klassifizierung der einzelnen Sparten vorgenommen werden, um zu untersuchen, ob es möglich ist die Stahl- und Feuerfestindustrie in einem Cluster einzuordnen und gemeinsam zu betrachten.

Taylor³⁶ hat eine generelle Einteilung von Industriesparten, sowohl aus der Stückgutindustrie als auch aus der Prozessindustrie, entwickelt, die die einzelnen Branchen nach folgenden zwei Dimensionen einteilt: Grad an Produktvielfalt und Materialflusskomplexität. Die Produktdifferenzierung bezieht sich auf die Produktgegebenheiten und die Marktgegebenheiten, die komplexe Materialflusstruktur auf den Organisationstypus der Produktion. Seine entwickelte Einteilung ist in Abbildung 2 gegeben:

³⁴ Vgl. Loos (1997), S. 3; Trautmann (2000), S. 5; Schönsleben (2004), S. 383

³⁵ Vgl. Heidrich (2002), S. 47, Oloff (2005), S.64f., Deuse, Deckert (2006), S. 86, Oloff (2006), S. 74f., Schemme (2006), S. 79

³⁶ Vgl. Taylor et al. (1981), S. 10f.

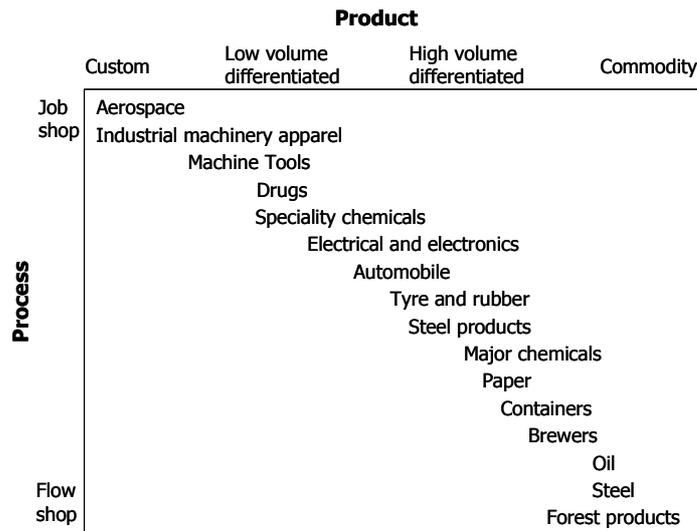


Abbildung 2: Typologie der Industriebranchen nach Taylor³⁷

Nach dieser Kategorisierung tendieren einige Sparten der Prozessindustrie in Richtung Massenware und Fließfertigung. In der Mitte der Matrix finden sich aber auch Branchen der Prozessindustrie wie die Pharma- und Chemieindustrie. Eine homogene Einteilung der Prozessindustrie in einen bestimmten Bereich ist in dieser Matrix nicht möglich. Eine Aussage die sich aus dieser Abbildung jedoch treffen lässt ist, dass je mehr eine Industriesparte als Werkstattfertigung organisiert ist desto eher wird kundenspezifisch gefertigt. Eine hohe Produktvielfalt wird offensichtlich schwieriger umsetzbar je weiter sich die Industrien in Richtung „Flow shop“ bewegen. Die Heterogenität der Prozessindustrie wird durch die Einteilung der Industriesparten nach Taylor weiter unterstrichen.

Daher haben Fransoo und Rutten³⁸ das Modell weiterentwickelt und aus den zwei Achsen, eine Achse mit zwei Extremen entwickelt: „Job shop/custom specific“ und „flow shop/ commodity“. Nur noch Sparten der Prozessindustrie wurden betrachtet und die Stückgutindustrie vernachlässigt.

Folgende Definition wird für nicht-diskrete Produkte verwendet: „Products are not discrete if individual items are indistinguishable from each other (like oil, chemicals) or if the products are simple and produced in very large quantities such that it does not make sense to distinguish them individually (like glass bottles, aluminium cans)“³⁹. Diese Charakterisierung bezieht sich auf einen einstufigen Prozess, wogegen in einem mehrstufigen Produktionssystem der Hauptproduktionsschritt gemeint ist, welcher den größten Anteil an der Wertschöpfung erzielt.

³⁷ Quelle: Taylor (1981), S. 15

³⁸ Vgl. Fransoo, Rutten (1994), S. 51

³⁹ Fransoo, Rutten (1994), S. 51f.

Die Typologie nach Fransoo und Rutten ist in Abbildung 3 wiedergegeben:

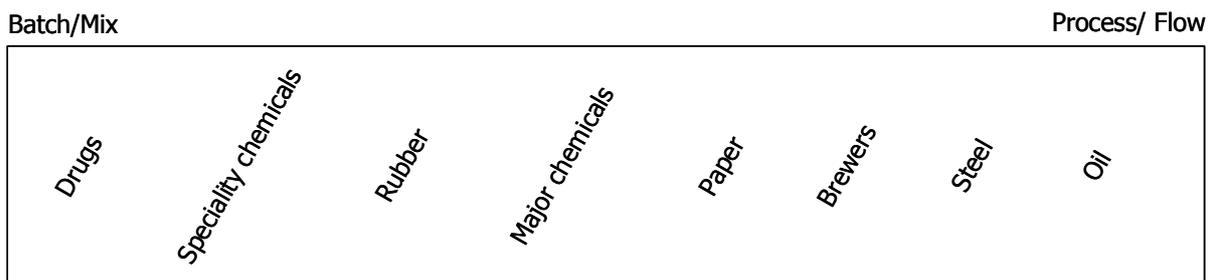


Abbildung 3: Typologie der Branchen der Prozessindustrie nach Fransoo und Rutten⁴⁰

Fransoo und Rutten greifen auf die Definition der Prozessindustrie nach der APICS zurück welche unterscheidet: „ [...] It may be done in either batch or continuous mode“⁴¹.

“Batch/Mix” wird definiert als: “In nondiscrete products the batch is a quantity that is planned to be produced in a given time period based on a formula or recipe, which is often developed to produce a given number of end items“⁴². In der diskreten Fertigung kann die Charge in kleinere Losgrößen (Einheiten) aufgespalten werden. Dies ist in der Prozessindustrie meistens nicht möglich.

“Process/Flow” ist folgenderweise definiert: „A production approach with minimal interruptions in the actual processing in any one production run or between production runs of similar products“⁴³. Diese Definition lässt den Rückschluss auf Produkte wie Flüssigkeiten oder Gase zu.

Fransoo und Rutten haben eine Liste mit Unterscheidungsmerkmalen der beiden Extrempositionen der Prozessindustrie entwickelt:

Process/flow businesses are characterized by	Batch/mix businesses are characterized by
<ul style="list-style-type: none"> • High production speed, short throughput time 	<ul style="list-style-type: none"> • Long lead time, much work in process
<ul style="list-style-type: none"> • Clear determination of capacity, one routing for all products, no volume flexibility 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacity is not well-defined (different configurations, complex routings)
<ul style="list-style-type: none"> • Low product complexity 	<ul style="list-style-type: none"> • More complex products
<ul style="list-style-type: none"> • Low added value 	<ul style="list-style-type: none"> • High added value
<ul style="list-style-type: none"> • Strong impact of changeover times 	<ul style="list-style-type: none"> • Less impact of changeover times
<ul style="list-style-type: none"> • Small number of production steps 	<ul style="list-style-type: none"> • Large number of production/process steps
<ul style="list-style-type: none"> • Limited number of products 	<ul style="list-style-type: none"> • Large number of products

Tabelle 1: Characteristics of process/flow versus batch/mix businesses⁴⁴

⁴⁰ Quelle: Fransoo, Rutten (1994), S. 52

⁴¹ Cox et al. (1992), S. 38

⁴² Cox et al. (1992), S. 4

⁴³ Cox et al. (1992), S. 37

⁴⁴ Quelle: Fransoo, Rutten (1994), S. 53

Zusammenfassend ist aus Sicht der Autoren in der Fließfertigung die Durchlaufzeit hauptsächlich durch die Taktzeit bestimmt. Die eigentliche Bearbeitungszeit pro Einheit ist meist sehr kurz, doch aufgrund langer, oft kostenintensiver Umrüstvorgänge und einer hohen Produktionsgeschwindigkeit sind die Losgrößen i. d. R. sehr groß gewählt. Laut Fransoo und Rutten besteht nur eine geringe Varietät der Produkte. Diese geringe Variationen an Produkten, die geringe Produktkomplexität und die geringe Anzahl an Produktionsschritten führt in den meisten Fällen zu ähnlichen Arbeitsplänen. In dieser Produktionsform gibt es meist einige Einzweckaggregate, die sich aufgrund der hohen Marktnachfrage und der geringen Produktvielfalt wirtschaftlich rechnen. Diese Aggregate werden meistens kontinuierlich betrieben. Aufgrund dieser Einzweckaggregate lässt sich einfach auf die verfügbare Kapazität für eine bestimmte Bearbeitung schließen. Die Wertschöpfung (Wertzuwachs) ist allgemein recht gering, 60-70% der Selbstkosten machen die Materialkosten aus.⁴⁵

Weiters führen Fransoo und Rutten aus⁴⁶, dass in der Chargenfertigung im Gegensatz zur Fließfertigung eine ganze Reihe an Produktionsschritten durchlaufen wird. Die Produktkomplexität ist meist höher. Eine hohe Produktvielfalt bedingt eine komplexere Materialflussstruktur. Durchlaufzeit und der Work-In-Progress (WIP) sind höher, teilweise gibt es Pufferlager. Losgrößen werden nicht hauptsächlich durch die Dauer von Umrüstvorgängen bestimmt sondern durch verfahrenstechnische Losgrößenanforderungen. In der Chargenfertigung sinkt der Materialkostenanteil an den Selbstkosten verglichen mit der Fließproduktion und die Wertschöpfung nimmt zu.

Die festgestellten Merkmalsausprägungen der „process/flow“ bzw. der „batch/mix“ Produktion in der Prozessindustrie nach Fransoo und Rutten müssen teilweise kritisch betrachtet werden und auf Ausnahmen hin hinterfragt werden. Die Behauptung, dass die Varietät der Produkte in Fertigungen mit Fließcharakter sehr gering ist, ist nicht generell gültig. Neben einem oft großen Variantenreichtum, erzeugt durch unterschiedliche Rohstoffanteile, erhöht eine große Anzahl an möglichen Formaten die Breite der Produktpalette. Weiters wird angenommen, dass die Durchlaufzeit und der WIP in einer Chargenfertigung zunehmen und die Materialflussstruktur aufgrund der höheren Produktvielfalt komplexer wird. Diese Größen hängen aber auch von vielen anderen Faktoren wie dem Layout, dem Transportsystem, verfahrenstechnischen Gegebenheiten etc. ab, so dass eine generalisierende Annahme der Entwicklung dieser Kennzahlen und Eigenschaften für die Chargenfertigung nicht getroffen werden kann.

⁴⁵ Vgl. Fransoo, Rutten (1994), S. 52

⁴⁶ Vgl. Fransoo, Rutten (1994), S. 52f.

Die getroffene Gruppierung der Sparten der Prozessindustrie hängt auch stark vom betrachteten Zeitpunkt in der Produktion ab. Geht man vom Vereinzelungszeitpunkt der Erzeugnisse aus, lässt sich eine große Zustimmung zu dem Modell nach Fransoo und Rutten finden. Da Papier und Bier früher im Produktionsprozess als Stahl „vereinzelt“ werden, ist die Anordnung in Abbildung 3 nachvollziehbar. Betrachtet man die einzelnen Charakteristika der beiden Extrema in der Prozessindustrie näher, weisen Brauindustrie und die Papierindustrie aber oft einen größeren Anteil an Merkmalen der Fließproduktion auf als die Stahlindustrie. Daher ist die Stahlindustrie in Hinblick auf die genannten Charakteristika der beiden Extrema eher im mittleren Sektor einzuordnen, wobei aber angemerkt werden muss, dass diese Branche eine größere Übereinstimmung mit der Charakteristik der Fließfertigung als mit der Chargenproduktion nach Fransoo und Rutten aufweist. Die Feuerfestindustrie wurde in ihrer Einteilung nicht berücksichtigt, ist aber auch im mittleren Teil einzugliedern, da diese Sparte ebenfalls Charakteristika der Chargenproduktion als auch Fließfertigung aufweist. Die Übereinstimmung der Merkmale der Chargenproduktion mit denen der Fertigung in der Feuerfestindustrie ist aber größer als mit den Eigenschaften der Fließfertigung. Die definitive Einordnung der für diese Arbeit relevanten Branchen in eine Kategorie ist bei diesem Ansatz aufgrund der Übereinstimmung mit Merkmalen von beiden Extrema mit Problemen verbunden. Es kann keine exakte Zuordnung der Stahl- und Feuerfestindustrie getroffen werden. Da die Betrachtung des Modells keine befriedigende Einteilung der beiden Branchen zulässt, müssen weitere Ansätze untersucht bzw. eine spezifischere Klassifizierung entwickelt werden.

Eine empirische Studie mit dem Ziel der besseren Unterscheidung der zahlreichen Industriezweige der Prozessindustrie führten Dennis und Meredith⁴⁷ durch. Sie untersuchten 19 verschiedene Prozessindustrien auf mögliche Unterscheidungsmerkmale. Sie teilten die Firmen in drei große Gruppen ein, die eine weitere Gliederung erfahren haben:⁴⁸ So gibt es den „intermittent type“, welcher Merkmale der Werkstattfertigung, nach Fransoo und Rutten als „job shop“ bezeichnet, aufweist. Diese erste Kategorie wird folgenderweise unterschieden:

- „process job shop“: Vereint typische Merkmale der Werkstattfertigung
- „fast batch“: Gekennzeichnet durch geringere Flexibilität und geringe Durchlaufzeit
- „custom blending“: Kundenspezifische Produktion spielt eine große Rolle

Die zweite Kategorie ist eine hybride Form, ein Mix aus der Werkstattfertigung und der kontinuierlichen Fließfertigung:

- „stock hybrid“: Gekennzeichnet durch geringere Produktvielfalt
- „custom hybrid“: Kundenspezifische Produktion spielt eine große Rolle

⁴⁷ Dennis, Meredith (2000a)

⁴⁸ Dennis, Meredith (2000a), S. 1094f.

Schlussendlich wird die Fließfertigung, „continuous type“ genannt und folgendermaßen unterteilt:

- „rigid continuous“: Fast keine Flexibilität der Anlagen und Flussunterbrechungen
- „multistage continuous“: Geringe Flexibilität der Anlagen, einige Produktionsschritte

Diese Gliederung ergab sich durch die Untersuchung der Vielfalt der Materialien und Produkte, des Materialflusses, der verwendeten Ausstattung und der Durchlaufzeit in den einzelnen Industriebereichen. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen welche sich aus dieser Studie ergaben, lieferten einige interessante Erkenntnisse wie z. B. dass, obwohl einige Industrien kontinuierlich produzieren, die meisten ihrer Aggregate Mehrzweckanlagen und keine Einzweckanlage sind. Oft wird die Annahme getätigt, dass in der Prozessindustrie wenige Inputgüter zu vielen Outputgütern führen (siehe Abbildung 4). Das Verhältnis zwischen Inputgütern und Outputgütern ergab in der Studie das überraschende Ergebnis, dass aber in vielen Betrieben mehr Güter eingesetzt als produziert wurden. Daher sollte man das Verhältnis der Input und Outputgüter nicht generalisieren sondern für spezifische Industriebereiche hinterfragen.

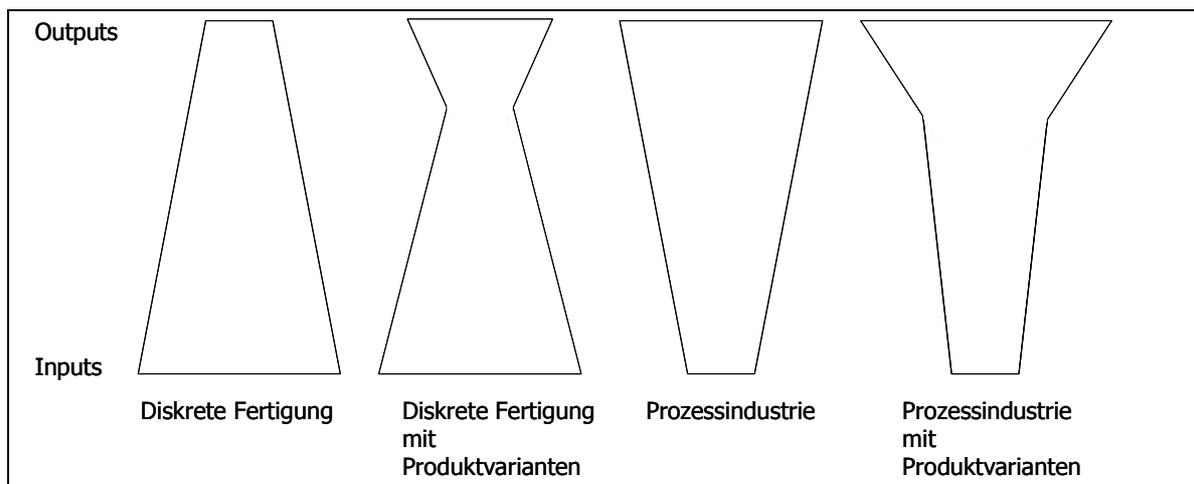


Abbildung 4: Prozessindustrie und diskrete Fertigung: Verhältnis Input/Output⁴⁹

Zusammengefasst kann aber auch keine genaue Einteilung der Prozessindustrie durch diese Gliederung vorgenommen werden, worauf auch die o. a. Autoren verweisen. Diese Gliederung wurde aufgrund der Produktionsmerkmale der Firmenpartner aufgestellt. Es wurden einige typische Vertreter der Prozessindustrie wie die chemische Industrie oder die pharmazeutische Industrie begutachtet und Fertigungstypen für diese Produktionsabläufe erstellt. Es wurde auch festgestellt, dass die Charakteristika der unterschiedlichen Unternehmungen in den einzelnen Branchen sehr voneinander abweichen können. Daher ist es nicht überr-

⁴⁹ Quelle: Fransoo, Rutten (1994), S. 49

schend, dass noch keine allgemein gültige Einteilung der Branchen der Prozessindustrie gefunden wurde.

Da weder die Stahl- noch die Feuerfestindustrie in dieser empirischen Untersuchung berücksichtigt wurden, lässt sich außerdem auch mit diesem Ansatz keine eindeutige Zuordnung der gewählten Branchen zu einem Bereich vornehmen. Die Stahl- und Feuerfestindustrie lässt sich nicht einheitlich einer der beiden Richtungen zuordnen, da diese Merkmale sowohl der kontinuierlichen Fließfertigung als auch (wenn auch geringer) der Chargenfertigung aufweisen. Diese Branchen passen recht gut in den „continuous type“ nach Dennis und Meredith⁵⁰, wobei die eine oder andere Charakteristika dieser Branchen, v. a. in der Feuerfestindustrie, nicht mit den angeführten Merkmalen der definierten Gruppe übereinstimmt.

Dennis und Meredith haben aber einen guten Ansatz in Richtung der Vorgehensweise zur Clustering der Prozessindustrie geschaffen. Es lassen sich grob drei Richtungen in der Prozessindustrie unterscheiden: die Fließproduktion, die Chargenfertigung und ein Mix aus beiden Formen. Die Chargenproduktion in der Prozessfertigung ist typischerweise in der Chemie- und Pharmaindustrie umgesetzt, während die Ergas- und Erdölindustrien typische Vertreter der Fließfertigung sind.

Einen weiteren Ansatz zur Einteilung erstellte Günther⁵¹. Er klassifiziert die Produktionssysteme der Prozessindustrie hinsichtlich folgender Merkmalsausprägungen:

- Kontinuität des Materialflusses
- Vielfalt der erzeugten Produkte
- Größenordnung der Produktionsaufträge
- Eingesetzte Ausrüstung (Einzweckanlagen bzw. Mehrzweckanlagen)

Die Chargen-, Sorten- und Massenfertigung lassen sich nach Günther⁵² als grundlegende Prozesstypen der verfahrenstechnischen Produktion ableiten.

Die verschiedenen Branchen der Prozessindustrie werden nun mithilfe der von Günther gewählten Charakteristika in einem Raster eingeteilt (Abbildung 5). Die Einteilung basiert auf einer Literaturrecherche und eigenen Überlegungen. Es zeigt sich, dass die meisten Branchen der Prozessindustrie vor allem unten rechts, d. h. semi-kontinuierlicher bis kontinuierlicher Materialfluss, großes Auftragsvolumen, mittlere Variantenvielfalt und hauptsächlich Einzweckanlagen, angesiedelt sind. Die Stahl- und Feuerfestindustrie kann als ein Cluster zusammengefasst werden und ist mit ihren Merkmalsausprägungen im mittleren rechten Teil der Grafik angesiedelt.

⁵⁰ Dennis, Meredith (2000a)

⁵¹ Vgl. Günther (2004), S. 327

⁵² Vgl. Günther (2004), S. 327

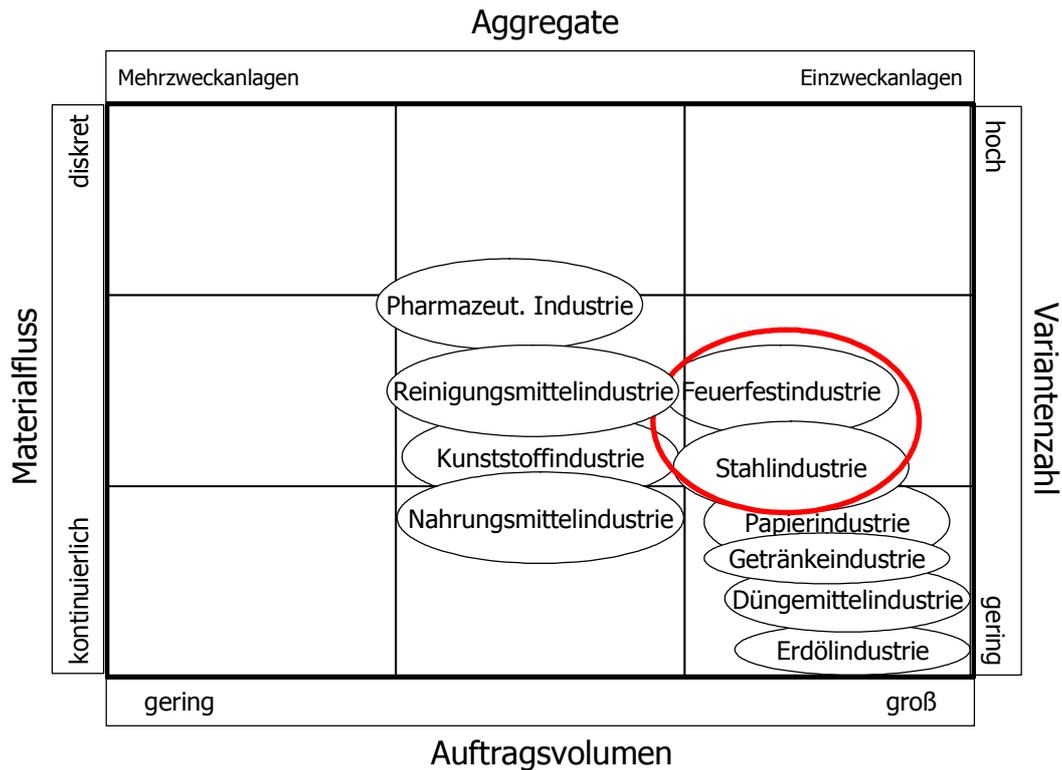


Abbildung 5: Klassifizierung der Branchen nach Prozesstypen (Eigendarstellung⁵³)

Diese Einteilung lässt eine grobe Klassifizierung der einzelnen Branchen nach den von Günther vorgeschlagenen Merkmalen zu. An dieser Stelle muss aber natürlich angemerkt werden, dass einzelne Unternehmen sehr unterschiedlich in einer Branche sein können, so dass die entwickelte Gliederung basierend auf Literatur und eigenen Erfahrungen keine Allgemeingültigkeit besitzt.

Zum weiterführenden Studium der Prozessindustriesparten wird an dieser Stelle auf Woodward⁵⁴, der eines der frühesten Werke zur Abgrenzung Prozessindustrie von der diskreten Fertigung verfasst hat, Finch und Cox⁵⁵, die eine beschreibende Typologie für die Prozessindustrie entwickelt haben, Hayes und Wheelwright⁵⁶ sowie Safizadeh et al.⁵⁷, welche ein Vorgängermodell der Taylorischen Einteilung der Industriebranchen entwickelten und Puttmann⁵⁸ der eine Einteilung nach „job-“ und „shop flow“ vorgeschlagen hat, verwiesen.

In diesem Kapitel wurde aufgezeigt, dass es mit einigen Problemen verbunden ist, die Prozessindustrie zu definieren. Ein wesentlicher Grund dafür sind die zahlreiche Branchen mit

⁵³ in Anlehnung an Günther (2004), S. 327 modifiziert nach Taylor (1981), S. 9ff., Fransoo, Rutten (1994), S. 51ff., Dennis, Meredith (2000a), S. 1089ff., Neumann et al. (2005), S. 495ff., Oloff (2005), S. 64ff., RHI (2005), Oloff (2006), S. 74ff., Spengler et al. (2007), S. 53 und eigenen Überlegungen und Erfahrungen

⁵⁴ Vgl. Woodward (1966)

⁵⁵ Vgl. Finch, Cox (1988)

⁵⁶ Vgl. Hayes, Wheelwright (1979)

⁵⁷ Vgl. Safizadeh et al. (1996)

⁵⁸ Vgl. Puttmann (1991)

sehr heterogenen Charakteristika. Gliederungsvorschläge wie von Dennis und Meredith⁵⁹, um eine grobe Einteilung der heterogenen Branchen in den großen, komplexen Bereich der Prozessindustrie zu schaffen, zeigen brauchbare Ansätze auf. In den Arbeiten von Taylor⁶⁰, Rutten und Fransoo⁶¹ sowie Dennis und Meredith wurde aber auch festgestellt, dass generalisierende Einteilungen der einzelnen Branchen der Prozessindustrie aufgrund ihrer Heterogenität oft problematisch sind. Eine einheitliche Definition oder Abgrenzung einzelner Branchen ist daher bis heute nicht gelungen. Aus der Literatur ist es damit nur schwer möglich das Branchencluster Stahl- und Feuerfestindustrie einer bestimmten Form zuzuordnen bzw. bestimmte Charakteristika zuzuordnen. Die gewählte Einteilung der einzelnen Branchen nach Günther⁶² besitzt zwar auch keine Allgemeingültigkeit, kann aber als weiterer Schritt zur einheitlichen Klassifizierung dienen. Die Feuerfestindustrie wurde sonst in allen Untersuchungen vernachlässigt, sie scheint in keiner anderen Analyse auf. Für die Stahlindustrie lässt sich grundsätzlich auch ein kontinuierlicher Charakter der Produktion, aus den Überlegungen von Taylor sowie Fransoo und Rutten, ableiten. In der empirischen Studie von Dennis und Meredith ist aber kein Stahlproduzent vertreten.

Allerdings hat sich gezeigt, dass die auf Materialflusscharakteristika bezogene Diskussion verschiedener Profile fruchtbare Ansätze zur Clusterung der Stahl- und Feuerfestindustrie gebracht hat. Eine konkrete Analyse der Materialflussverläufe in beiden Branchen sollte helfen offene Fragen zu beantworten:

- Ist es möglich mit einer Festlegung von Charakteristika für die Materialflussverläufe für die beiden Sparten eine exakte Eingliederung umzusetzen?
- Welche logistischen Herausforderungen in den einzelnen Bereichen können festgestellt werden?

Zum besseren Verständnis des Materialflusses beschreibt das folgende Kapitel nun die Abläufe und logistische Herausforderungen im Materialfluss in den ausgewählten Branchen der Prozessindustrie.

⁵⁹ Vgl. Dennis, Meredith (2000a)

⁶⁰ Vgl. Taylor et al. (1981)

⁶¹ Vgl. Fransoo, Rutten (1994)

⁶² Vgl. Günther (2004)

3 Herausforderungen und Vereinfachungsregeln für Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie

Um die Abläufe, Anforderungen und Schwierigkeiten im Materialflusssystem in der Stahl- und Feuerfestindustrie zu identifizieren und Maßnahmen im Materialflussmanagement zu erläutern, befasst sich das folgende Kapitel detailliert mit den internen Materialflussabläufen, der Charakteristik des Materialflusssystems in der Beschaffung, Produktion, Distribution und Entsorgung der beiden Branchen sowie mit Regeln zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung. Dabei zeigt Abschnitt 3.1 Definitionen des Materialflusses und Materialflusssystems auf, um ein grundlegendes Verständnis der Begriffe zu erhalten. Ergänzend werden die möglichen Ausprägungsformen des Materialflusses erläutert, die zur Gestaltung des Materialflusssystems genutzt werden können. Die nächsten beiden Abschnitte 3.2 und 3.3 behandeln die Anforderungen an und Schwierigkeiten im innerbetrieblichen und überbetrieblichen Materialfluss der beiden Branchen. Aus diesen Anforderungen an den Materialfluss ergeben sich bestimmte logistische Herausforderungen. Daher untersucht der anschließende Abschnitt 3.4, aufbauend auf den Ergebnissen der vorigen Kapitel, die gemeinsamen logistischen Herausforderungen im Materialflusssystem für dieses Branchencluster. Im Folgenden werden aufgestellte Regeln und Gesetzmäßigkeiten zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung betrachtet und deren Anwendbarkeit auf die Fertigungssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie untersucht (Abschnitt 3.5). Auf Basis der diskutierten Regeln und Konzepte arbeitet Abschnitt 3.5.3 Empfehlungen für die Materialflussvereinfachung in der Stahl- und Feuerfestindustrie aus.

Das Kapitel soll den Materialfluss des gewählten Branchenclusters analysieren, um eine Basis für die Komplexitätsuntersuchungen im Kapitel 4 zu legen.

3.1 Definitionen und Grundformen des Materialflusses

Zum besseren Verständnis des Begriffes Materialfluss sind folgende Definitionen untersucht worden, um die Breite des Materialflussbegriffes wiederzugeben sowie den Begriff definitiv für den Kontext dieser Arbeit zu präzisieren. Ergänzend zum Begriff Materialfluss sollen mit diesem in Verbindung stehende Definitionen des Materialflusssystems und des Materialflussmanagements erläutert werden:

Unter Materialfluss wird nach VDI⁶³ „die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“ verstanden.

Nach Kettner et al.⁶⁴ bezieht sich der Materialfluss auf „alle Materialbewegungen innerhalb und zwischen umgrenzten Betriebseinheiten in ihrer räumlichen, zeitlichen und organisatorischen Verknüpfung mit den betrieblichen Aufgaben“.

Eine sehr weit gefasste Definition findet sich in Vahlens Logistiklexikon: Der Materialfluss ist die physische Ausgestaltung der Logistikkette vom Lieferanten bis zum Kunden.⁶⁵ Auch die folgende Begriffserläuterung bezieht sich auf die gesamte Wertschöpfungskette: „Der Materialfluss umfasst alle Vorgänge in einem betrieblichen Objektfluss, die mit Aufgaben der Beschaffung, der Produktion und der Distribution in Zusammenhang stehen. Seine Objekte sind Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Halbfabrikate, Fertigprodukte und Werkzeuge.“⁶⁶ Arnold und Furmans⁶⁷ meinen dazu, dass das Material im Begriff Materialfluss auch neben den eben erwähnten Objekten für „Produkte aller Art steht, die noch einen Ortswechsel erlauben“.

Arnold und Furmans⁶⁸ beziehen den Materialfluss auf diskrete Objekte d. h. „Stückgüter, die sich in regelmäßigen oder in unregelmäßigen zeitlichen Abständen über bestimmte Strecken bewegen.“ Sie führen dazu an, dass Schüttgüter mittels geeigneter Behälter diskretisiert und als Stückgut behandelt werden können.

Zu den Materialflussprozessen stellt Jünemann⁶⁹ fest: Materialprozesse führen zu einer Veränderung des Systemzustandes von Gütern hinsichtlich Zeit, Menge, Ort, Zusammensetzung und Qualität.

Nach Arnold und Furmans⁷⁰ sind „die einzelnen Schritte der Produktion und des Vertriebs [...] in einer Vorgangsfolge nach technischen und organisatorischen Regeln miteinander verbunden.“ Prinzipiell lassen sich folgende Arbeitsvorgänge und Operationen im innerbetrieblichen Materialfluss unterscheiden:⁷¹

- Bearbeiten
- Montieren
- Prüfen
- Handhaben

⁶³ VDI 3300 (1973)

⁶⁴ Kettner et al. (1984), S. 157

⁶⁵ Vgl. Bloech, Ihde (1997), S. 697

⁶⁶ Martin (2006), S. 22

⁶⁷ Vgl. Arnold, Furmans (2005), S. 1

⁶⁸ Arnold, Furmans (2005), S. 1

⁶⁹ Vgl. Jünemann (1989), S. 15

⁷⁰ Arnold, Furmans (2005), S. 1

⁷¹ Vgl. Martin (2006), S. 22

- Fördern (Transportieren)
- Lagern (Speichern, Puffern)
- Verteilen
- Sortieren
- Verpacken

Der Materialfluss besteht nach VDI aus den Funktionen Transportieren, Bearbeiten, Handhaben, Aufenthalt und Lagerung⁷².

Jünemann und Schmidt unterteilen den Materialfluss in wichtige Funktionen bzw. Arbeitsvorgänge: Das Bearbeiten, Prüfen, Verpacken, Lagern, Fördern, Transportieren und Handhaben; und komplexe Arbeitsoperationen: Das Bilden von Ladeeinheiten, Montieren, Kommissionieren, Be- und Entladen bzw. Umschlagen.⁷³

Es zeigen sich Abweichungen bei den zugehörigen Arbeitsvorgängen zu einem Materialflusssystem. So erwähnt die VDI-Richtlinie 2411 z. B. die Funktion Aufenthalt als jedes nicht geplante Liegen des Arbeitsgegenstandes im Materialfluss. Diese mögliche Funktion im Materialfluss ist in keiner anderen Definition zu finden. Arnold und Furmans unterscheiden nicht explizit zwischen Fördern und Transportieren, Jünemann hingegen sehr wohl. Durch diese nicht fix festgelegten Funktionsbegriffe, ergibt sich ein gewisser Spielraum der Definitionen.

Auch der Begriff des Materialflusssystems ist in der Literatur unterschiedlich definiert:

Ein Materialflusssystem besteht aus internen Strukturelementen: Netzwerk, Technologie, Transport- und Fördermittel, Information und Kommunikation sowie aus externen Akteuren: Nutzer, Bediener, ökonomisches, soziales und politisches System, die in Wechselwirkung mit den internen Strukturelementen stehen.⁷⁴

Ein Materialflusssystem bezeichnet die Gesamtheit der Arbeitsmittel und des Personals in einem Betrieb, die dem Materialfluss dienen.⁷⁵ Materialflusssysteme unterstützen Lagerung, Transport, Kommissionierung und Verpackung von Gütern und stellen überwiegend komplexe Netzwerke dar.⁷⁶

„Ein Materialflusssystem ist jede Anordnung von mindestens zwei Einzelementen von Gegenständen des Materialflusses, die im Rahmen eines Transformationsprozesses eine Veränderung des Systemzustandes von Gütern (Material, Stoffen) hinsichtlich Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung und Qualität ermöglichen“.⁷⁷ Gegenstände des Materialflusses sind Güter,

⁷² Vgl. VDI 2411 (1970), VDI 3300 (1973)

⁷³ Vgl. Jünemann, Schmidt (2000), S. 5

⁷⁴ Vgl. Garrido, Hidalgo (2001), S. 16ff.

⁷⁵ Industrie-Schweiz (2007)

⁷⁶ Vgl. Jünemann, Beyer (1998), S. 1ff.

⁷⁷ Jünemann (1989), S. 16

Personen, Informationen, Energie, Materialflussmittel (Arbeitsmittel des Materialflusses), Produktionsmittel, Informationsflussmittel (Arbeitsmittel des Informationsflusses) und Infrastruktur.⁷⁸

Es sollte aber bei der Materialflussbetrachtung nicht nur der Materialfluss vom Lieferant zum Kunden (Versorgungsfluss) sondern auch der Entsorgungsfluss berücksichtigt werden. Der gesamte Materialfluss entlang der Wertschöpfungskette ist in Abbildung 6 dargestellt.

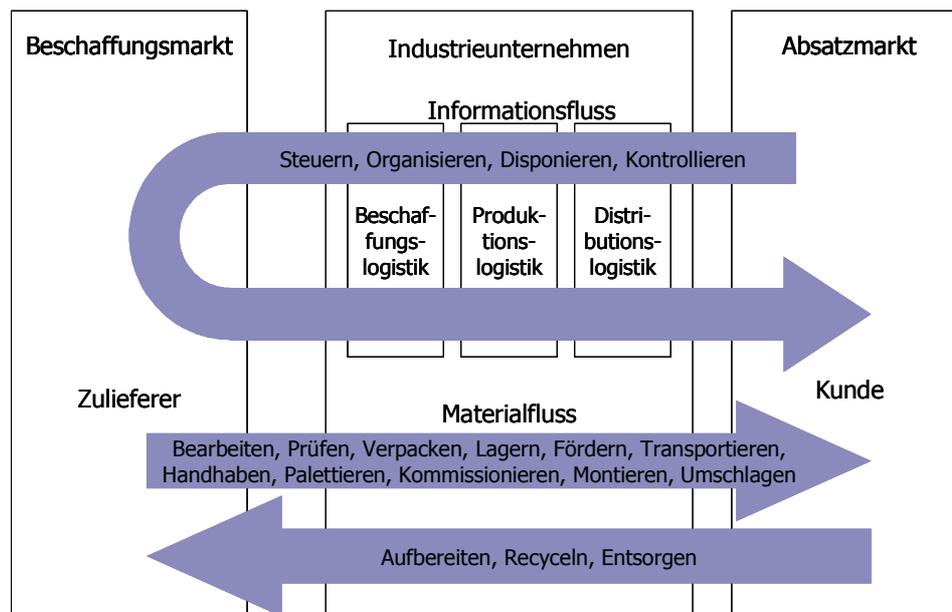


Abbildung 6: Materialflussverlauf in der Wertschöpfungskette⁷⁹

Industrielle Materialflüsse lassen sich sowohl in einem unternehmensinternen, als auch einen unternehmensexternen Materialfluss einteilen. Dabei kann der externe Bereich auf überregionaler, regionaler oder lokaler Ebene betrachtet werden, der interne auf betriebsinterner, gebäudeinterner oder arbeitsplatzbezogene Ebene.⁸⁰

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass Materialfluss ein sehr weit reichender Begriff, von Materialflussbewegungen in der Beschaffung über die Produktion bis hin zur Distribution und Entsorgung, ist. Die Definitionen von Materialfluss weichen nur in begrenztem Maße voneinander ab und die meisten Nachschlagewerke und Autoren⁸¹ berufen sich auf die vom VDI festgelegte Begriffserklärung des Begriffes Materialfluss. Diese dient, ein wenig modifiziert, auch als Basis für die Begriffsverwendung in dieser Arbeit: *Materialfluss ist die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von stoff-*

⁷⁸ Jünemann (1989), S. 12

⁷⁹ Vgl. Vastag, Schürholz (2004), B 5-2, Jünemann (1989), S. 24

⁸⁰ Vgl. Kettner et al. (1984), S. 158

⁸¹ Vgl. Arnold et al. (2004), S. A2-41; Gr,ig (2006), S. 100; Martin (2006), S. 22; Bloech, Ihde (1997), S. 697; Kettner et al. (1984), S. 158; Pawellek (2007), S. 58, Fischer (1997), S. 3

lichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche der Beschaffung, der Produktion, der Distribution und der Entsorgung.

Weitere wichtige Begriffe in dieser Arbeit sind Materialflusssystem und Materialflussmanagement. Der Begriff des Materialflusssystems ist sehr unterschiedlich definiert und wird in dieser Arbeit in Anlehnung an Jünemann und Schmidt⁸² folgenderweise verwendet: *Das Materialflusssystem ist eine Kombination von Gegenständen des Materialflusses (Güter, Personen, Informationen, Energie, Materialflussmittel, Produktionsmittel, Informationsflussmittel und Infrastruktur).* Um eine passende Definition des Begriffes Materialflussmanagement zu finden, wird zuerst eine allgemeine Managementdefinition aufgegriffen: „Ein Komplex von Steuerungsaufgaben, die bei der Leistungserstellung und -sicherung in arbeitsteiligen Organisationen erbracht werden müssen“.⁸³ Eine weitere Definition spricht von einem „Komplex von Aufgaben, die zur Steuerung eines Systems erfüllt werden müssen“.⁸⁴ Die Definition des Materialflussmanagements in dieser Arbeit ist eine auf das Materialflusssystem übertragene Begriffserklärung von Management: *Das Materialflussmanagement ist ein Komplex von Planungs- und Steuerungsaufgaben, die zur Leistungserbringung in einem Materialflusssystem erfüllt werden müssen.*

Die spezifischen Anforderungen an den Materialfluss durch die Produkte und ihre Herstellungsprozesse spielen eine entscheidende Rolle für die Gestaltung des Materialflusses. Es werden grundsätzlich fünf Arten von Materialflussverläufen unterschieden:

- **Linearer Materialfluss**

Das Produkt hat maximal einen direkten Vorgänger (Abbildung 7). Eine typische Anwendung einer linearen Materialflusstruktur wäre die Herstellung von Draht.⁸⁵



Abbildung 7: Linearer Materialfluss⁸⁶

- **Konvergierender Materialfluss**

Diese Struktur ist dadurch gekennzeichnet, dass in ein Produkt mehrere Teile einfließen (Abbildung 8). Eine typische Anwendung dieses Flussverlaufes findet man in Montageprozessen.

⁸² Vgl. Jünemann, Schmidt (2000), S. 4

⁸³ Schreyögg, Koch (2007), S. 8

⁸⁴ Steinmann, Schreyögg (1997), S. 5f.

⁸⁵ Vgl. Alex (2003), S. 7ff.

⁸⁶ In Anlehnung an Günther, Tempelmaier (2005), S. 19f., Pawellek (2007), S. 59f.

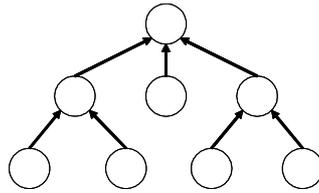


Abbildung 8: Konvergierender Materialfluss⁸⁷

- Divergierender Materialfluss

Beim divergierenden Verlauf hat eine Aktion mehrere Nachfolger (Abbildung 9). Die Erdöl- und Chemieindustrie sind Branchen, in denen es hauptsächlich divergierende Materialflüsse gibt.

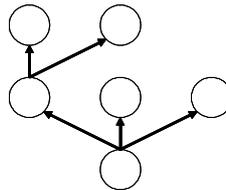


Abbildung 9: Divergierender Materialfluss⁸⁸

- Zyklische Materialflusstruktur

Diese Form des Materialflusses (Abbildung 10) findet man z. B. in der Produktion der chemischen Industrie, aber auch in Fertigungen mit hoher Kapitalintensität, innerhalb derer einzelne Aggregate mehrfach im Arbeitsplan eines Produktes enthalten sind (z. B. Halbleiterindustrie⁸⁹). Zyklische Verläufe können auch durch Nacharbeit in der Fertigung entstehen oder dadurch, dass Prozessschritte an einer Maschine mehrfach stattfinden wie z. B. bei chemischen Bädern. Auf zyklische Materialflüsse in der Prozessindustrie verweist auch Günther⁹⁰.

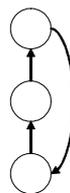


Abbildung 10: Zyklischer Flussverlauf⁹¹

- Generelle Materialflusstruktur

Die generelle Struktur vereint Merkmale aller oder einiger der oben genannten Flussverläufe (Abbildung 11).

⁸⁷ In Anlehnung an die Ausführung von Günther, Tempelmaier (2005), S. 19f., Pawellek (2007), S. 59f.

⁸⁸ In Anlehnung an die Ausführung von Günther, Tempelmaier (2005), S. 19f., Pawellek (2007), S. 59f.

⁸⁹ Vgl. Rose (2004), S. 1

⁹⁰ Vgl. Günther (2004), S.326

⁹¹ In Anlehnung an die Ausführung von Günther, Tempelmaier (2005), S. 19f., Pawellek (2007), S. 59f.

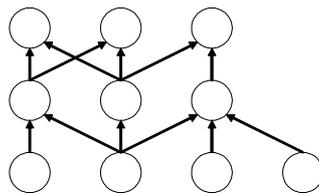


Abbildung 11: Genereller Flussverlauf⁹²

In den meisten Betrieben findet sich die generelle Materialflusstruktur wieder. Es gibt aber auch einige Branchen die überwiegend nur einen Typus der Materialflusstruktur aufweisen. Lineare Materialflüsse sind meistens einfach zu steuern, da kein Zusammentreffen unterschiedlicher Flüsse stattfindet und die Losgröße konstant sein kann. Bei konvergierenden Materialflüssen muss darauf geachtet werden die einzelnen Flüsse so zu koordinieren, dass zum selben Zeitpunkt die entsprechenden Produkte und Materialien an den Schnittstellen zur Weiterverarbeitung bereit stehen. Bei divergierenden Materialflüssen besteht die Problematik, dass sich häufig Losgrößen ändern und damit ein kontinuierlicher Fluss schwieriger zu erreichen ist. Zyklische Materialflüsse sind auch gut steuerbar, soweit nicht Mengenänderungen stattfinden. Die generellen Materialflusstrukturen können lineare, konvergierende, divergierende und zyklische Flüsse und die entsprechenden Eigenschaften aufweisen.

Wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen der Materialflussverläufe in der Stahl- und Feuerfestindustrie in den Abschnitten 3.2 bis 3.5 sowie Kapitel 4 wird die Frage nach den zugrunde liegenden Materialflusstrukturtypen sein.

3.2 Materialflusstruktur und Anforderungen in der Stahlindustrie

Dieses Kapitel widmet sich dem Prozessablauf in der Stahlindustrie und den damit verbundenen Anforderungen an den Materialfluss. Zuerst wird der innerbetriebliche Materialfluss detailliert untersucht, um die typischen Materialflusstrukturen in der Produktion zu identifizieren und anschließend auf die Schwierigkeiten im gesamten Materialflusssystem einzugehen.

3.2.1 Innerbetriebliche Materialflussabläufe in der Stahlindustrie

Es haben sich grundsätzlich zwei Verfahrenswege zur Herstellung von Stahl herausgebildet:

- Hochofen und Konverter
- Elektrolichtbogenofen

Diese beiden Verfahrensrichtungen sind Abbildung 12 zu entnehmen.

⁹² In Anlehnung an die Ausführung von Günther, Tempelmaier (2005), S. 19f., Pawellek (2007), S. 59f.

Die erste Verfahrensrouten über den Hochofen und den Konverter (linke Hälfte der Abbildung 12) produziert aus Erzen und anderen Zuschlägen zunächst im Hochofen flüssiges Roheisen, das im Konverter unter Zusatz von Schrott zu flüssigen Rohstahl gefrischt wird. Der zweite mögliche Verlauf (rechte Darstellung in Abbildung 12) erzeugt aus festen metallischen Einsatzstoffen wie Schrott und/oder DRI (direct reduced iron) flüssigen Rohstahl im Elektrolichtbogenofen. Das in Corex-Schmelzreduktionsanlagen (Abbildung 12 in der Mitte) erzeugte Roheisen wird je nach Werkskonfiguration im Konverter oder Elektrolichtbogenofen zur Rohstahlerzeugung verwendet. Der Rohstahl wird anschließend in der Sekundärmetallurgie weiterbehandelt.⁹³

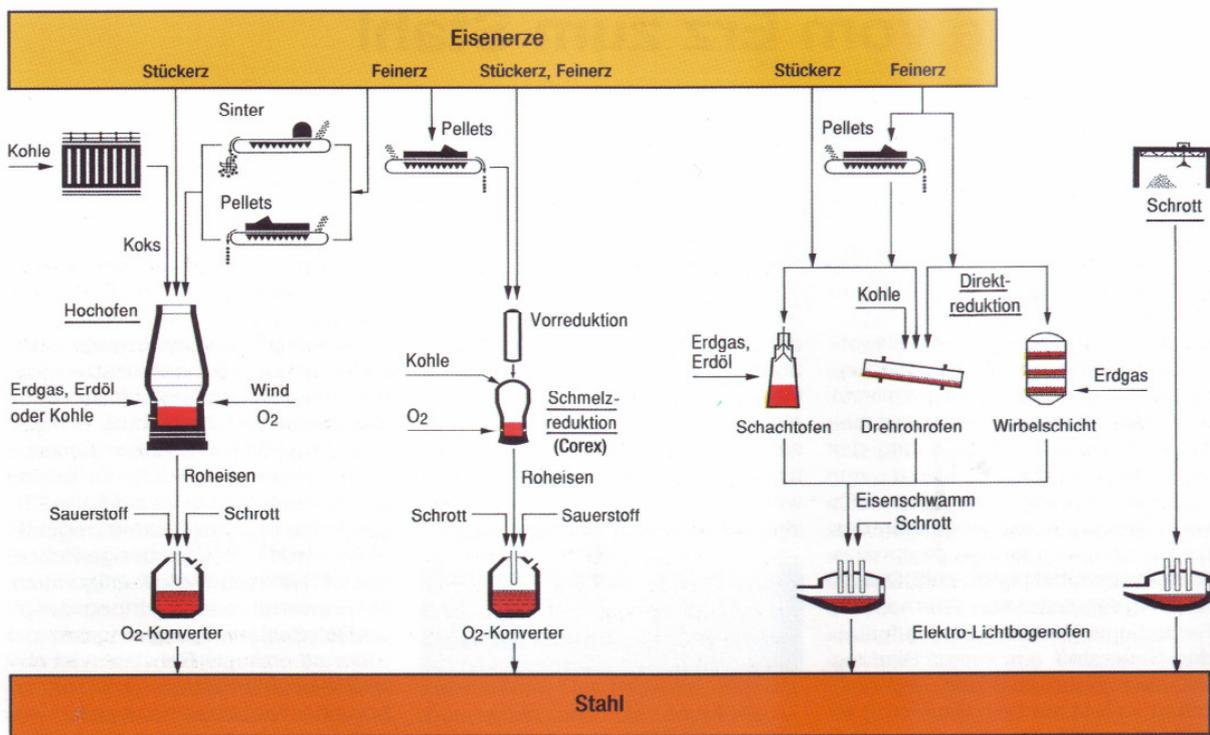


Abbildung 12: Verfahrenswege für die Herstellung von Stahl⁹⁴

In Europa werden ca. 62% des Rohstahles über den Hochofen und Konverter bzw. mittels Corex Verfahren erzeugt. In den USA dagegen überwiegt die Erzeugung von Stahl mittels Elektrostahlwerken.⁹⁵

Zur Unterscheidung wird kurz auf die Begriffe der integrierten Hütte und des Stahlwerkes eingegangen: Von einem Stahlwerk spricht man ab der Weiterverarbeitung von Roheisen in einem Konverter bzw. in einem Elektrostahlwerk ab der Stahlerzeugung mittels Elektrolicht-

⁹³ VDEh (2002), S. 27

⁹⁴ Quelle: VDEh (2002), S. 28

⁹⁵ Schemme (2006), S. 79

bogenofen. Eine integrierte Hütte umfasst alle Aggregate von der Aufbereitung der Rohstoffe bis hin zum Walzwerk.

Ein Beispiel für den Materialfluss von der Rohstoffaufbereitung bis zum Walzwerk in einem integrierten Hüttenwerk (Roheisen Erzeugung mittels Hochofen) ist in Abbildung 13 dargestellt.

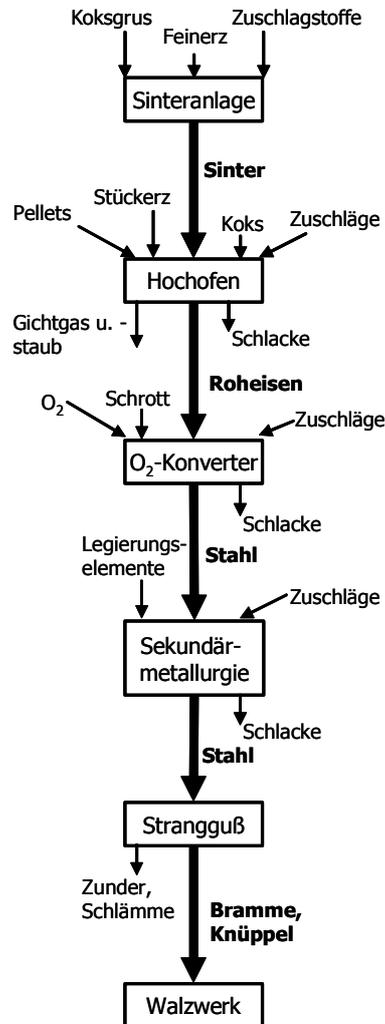


Abbildung 13: Materialflussverlauf in einem integrierten Hüttenwerk⁹⁶

Der Materialflussstruktur in der Stahlindustrie vereint Merkmale von konvergierenden, linearen, divergierenden und manchmal auch zyklischen (Recycling) Flussverläufen⁹⁷. So weist die Sinteranlage einen typischen konvergierenden Materialfluss auf, da mehrere Rohstoffe zur Erzeugung eines Produktes zusammengeführt werden. Das Sintern kann aber als entkoppelter Prozess angesehen werden, da diese Produkte zwischengelagert bzw. gepuffert werden können. Die eigentliche Fließfertigung beginnt beim Hochofen. Dort werden neben Erzen

⁹⁶ Eigene Abbildung in Anlehnung an die Ausführungen von VDEh (2002), S. 27ff.

⁹⁷ Vgl. Günther (2004), S. 330

weitere Rohstoffe zur Erzeugung von Roheisen eingesetzt. Neben dem Hauptprodukt Roheisen fallen aber auch weitere Nebenprodukte wie die Hochofenschlacken bzw. Abfallstoffe wie Gichtstaub an. Vom Hochofen bis zum Walzwerk kann man von einer linearen Materialflussstruktur sprechen.

Schönsleben⁹⁸ spricht im Zusammenhang mit der Prozessindustrie von einer Kuppelproduktion mit einer divergierenden Struktur. Eine Kuppelproduktion ist laut Schönsleben „ [...] die gleichzeitige Herstellung von verschiedenen Produkten im selben Prozessschritt“ wobei ein einziges oder mehrere gemeinsam zu verarbeitende Güter in den Prozess eingehen. Als Kuppelprodukte führt Schönsleben⁹⁹ z. B. Dampf und Energie an.

Im zeitlichen Verlauf resultiert aufgrund des zyklischen Abstichs beim Hochofen eine diskontinuierliche Materialabgabe. Der Materialfluss des Stahlwerkes ist also schwankend, kann aber als kontinuierlich, falls dieser keinen großen Störungen unterliegt, klassifiziert werden.¹⁰⁰ Bei Elektrostahlwerken besitzt man meistens zwei Schmelzaggregate, um eine kontinuierliche Versorgung der Produktion mit Stahl zu gewährleisten.

Im Walzwerk kann aus einer Bramme eine Produktreihe bzw. können mehrere Produktarten hergestellt werden, was zu einem linearen bzw. divergierenden Fluss führen kann. Nach dem Walzwerk in der Adjustage herrscht eine divergierende Produktionsstruktur vor, in welcher die Dimensionierung der Fertigprodukte stattfindet.

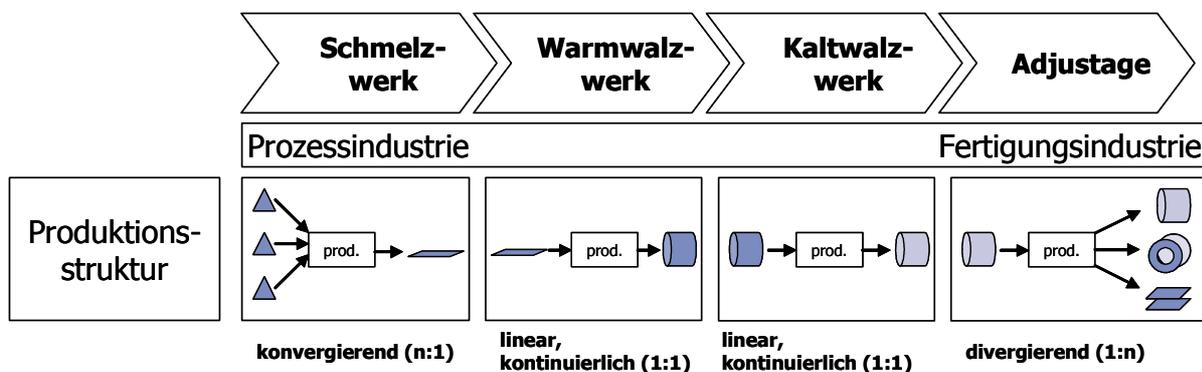


Abbildung 14: Produktionsstruktur in der Stahlindustrie¹⁰¹

Deuse und Deckert¹⁰² unterscheiden in der Produktstruktur des Stahlwerkes zwischen der Warmphase, speziell der Flüssigphase und ordnen diese der Prozessindustrie zu und der Kaltphase, welche der Fertigungsindustrie zugerechnet wird (siehe Abbildung 14).

⁹⁸ Schönsleben (2000), S. 279

⁹⁹ Vgl. Schönsleben (2007), S. 403

¹⁰⁰ Vgl. Spengler et al. (2007), S. 53

¹⁰¹ in Anlehnung an Deuse, Deckert (2006), S. 85

Es ist schwierig, einen genauen Punkt festzulegen, ab welchen der Produktionscharakter der Stahlindustrie von einer kontinuierlichen Fertigung in eine diskrete Fertigung übergeht. Eine Möglichkeit wäre die Stranggussanlage, ab der unterschiedliche Formate gefertigt werden (z. B. Brammen unterschiedlicher Länge und Breite) und nach der es damit zu einer Vereinzelung der Erzeugnisse kommt, die entweder direkt an den Kunden geliefert, oder aber zu weiteren Stückgütern weiterverarbeitet werden. Ein weiterer Ansatzpunkt wäre die Idee von Deuse und Deckert aufzugreifen und von einem fließenden Übergang zwischen Warmphase und Kaltphase zu sprechen.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass das integrierte Hüttenwerk sowie auch das Stahlwerk keine eindeutige Flussstruktur aufweisen. Eine Kombination aus verschiedenen Materialflussverläufen (linear, konvergierend und divergierend) ist typisch und erschwert damit u. a. die Materialflusssteuerung. Ein konkreter Übergangspunkt zwischen Prozessindustrie und Stückgutindustrie muss für einzelne Unternehmungen individuell bestimmt werden

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich daher mit den spezifischen Anforderungen in den einzelnen Bereichen der Wertschöpfungskette.

3.2.2 Schwierigkeiten im Materialflusssystem der Stahlindustrie

Der interne und externe Materialfluss in der Stahlindustrie unterliegt einigen Restriktionen, die im Folgenden erläutert werden sollen, um die Planungskomplexität des Materialflusses zu verdeutlichen. Es soll auf Schwierigkeiten in den einzelnen Abschnitten der Wertschöpfungskette hingewiesen werden und die wichtigsten Probleme zusammengefasst werden.

Beschaffung

In Europa ist der Anteil an Hochofen-Stahlwerken recht groß und daher sind Eisenerz und Koks wichtige Rohstoffe. Da der Eisenanteil europäischer Erze (mit wenigen Ausnahmen wie in Schweden) relativ gering ist (ca. 25 bis 45% Fe-Gehalt), ist es notwendig Erze mit höheren Eisenanteil (ca. 65%¹⁰³, auch Reicherze genannt), meistens aus Australien oder Südamerika (v. a. Brasilien¹⁰⁴), zu beschaffen.¹⁰⁵ Österreichische Erze weisen z. B. einen Fe-Gehalt von Erze 33% auf.¹⁰⁶ China verfügt zwar über enorme Eisenerzreserven, welche aber auch oft nur einen Gehalt von 30% Eisen aufweisen und damit eine kostspielige Aufbereitung er-

¹⁰² Vgl. Deuse, Deckert (2006), S. 85f.

¹⁰³ Vgl. VDEh (2002), S.27ff, Voest (2007)

¹⁰⁴ Vgl. Gronwald, Uhlig (2006), S. 23

¹⁰⁵ Vgl. Lungen, Steffen (2006), S. S73

¹⁰⁶ Vgl. VDEh (2002), S. 27ff, Voest (2007)

fordern.¹⁰⁷ China ist daher auch von Eisenerzimporten mit höheren Eisengehalt und steigenden Energiekosten abhängig.¹⁰⁸ Herausforderungen anderer Länder wie Indien liegen vor allem in der Abhängigkeit von importierten Kohlen und der fehlenden Transportinfrastruktur.¹⁰⁹

Die Rohstoffpreise sind in den letzten vier bis fünf Jahren aufgrund der steigenden Bedarfe an metallischen Rohstoffen in Südostasien stark angestiegen.¹¹⁰ China hat 2007 inzwischen einen Anteil von 30 Prozent an der weltweiten Rohstahlerzeugung¹¹¹ und die Prognosen deuten auf eine weitere Zunahme der Produktion von Stahl, welche durch die staatliche Subventionierung vorangetrieben wird.¹¹² Von 2002 bis 2006 hat sich der Preis für Feinerz um mehr als 260 Prozent nach oben bewegt, beim Stahlschrott betrug die Erhöhung in diesem Zeitraum 220 Prozent.¹¹³ Folglich müssen teilweise neue Beschaffungswege ins Auge gefasst werden. Es wird aktuell versucht, neue Lagerstätten zu erschließen und/oder auf alternative Rohstoffe zurückzugreifen. Dies hat logistische Auswirkungen auf Beschaffung, Produktion und Lagermanagement. Es müssen z. B. neue Lieferanten akquiriert werden, Änderungen in der Produktion aufgrund alternativer Einsatzstoffe vollzogen werden oder Lagerkapazitäten erhöht bzw. neu geschaffen werden.

Der Schifftransport bietet sich für die Beschaffung von Rohstoffen aus Asien und Südamerika an, da große Mengen transportiert werden können. Neben den Rohstoffpreisen haben sich aber auch die Frachtkosten stark erhöht. So haben sich z. B. im Jahre 2004 die Frachtpreise für Erz und Schrott im Vergleich zum Jahr 2003 vervierfacht.¹¹⁴ Dieser Preisanstieg begründet sich in dem enormen Nachfrageanstieg nach Schiffsraum aufgrund des deutlich angestiegenen Transportvolumens für Eisenerz und Kohle.¹¹⁵ Der große Nachteil im Schifftransport sind die ungenauen Liefertermine und die langen Transport- und die daraus resultierenden Wiederbeschaffungszeiten. Die Qualität der beförderten Güter muss vorab gewährleistet werden, da eine Neulieferung aufgrund mangelnder Qualität durch die langen Transportzeiten in der Regel nicht realisierbar ist. Qualitätsvarietät tritt jedoch bei mineralischen Rohstoffen oft auf. Durch die langen Wiederbeschaffungszeiten und möglichen ungenauen Lieferterminen müssen beschaffenden Unternehmungen Sicherheitsbestände vorrätig halten, um Produktionsausfällen vorzubeugen.

¹⁰⁷ Vgl. Gronwald, Uhlig (2006), S. 23

¹⁰⁸ Vgl. Mehta (2005), S. 68

¹⁰⁹ Vgl. Mehta (2006), S. 86

¹¹⁰ Vgl. AT Kearney (2007), S.1ff., Raiffeisen Centrobank (2006)

¹¹¹ Vgl. SMS Metallurgy (2007), S. 2

¹¹² Vgl. Frank (2004), S. 1ff.

¹¹³ Vgl. Ameling (März 2007), S. 7; Ameling (April 2007), S. 5

¹¹⁴ Vgl. Perlitz (2004), S. 11

¹¹⁵ Vgl. Gronwald, Uhlig (2006), S. 26

Im Gegensatz zu Europa sind in den USA hauptsächlich Elektrostahlwerke verbreitet. Die USA haben aufgrund des traditionell hohen Industrialisierungsgrades ein hohes Schrottaufkommen weshalb der Einsatz von Elektrolichtbogenöfen, die theoretisch mit 100% Schrotteinsatz gefahren werden können, floriert.¹¹⁶ Zyklische Materialflüsse entstehen durch die Wiederaufbereitung des recycelten Materials¹¹⁷, und erschweren damit das Materialflussmanagement.

Aufgrund kapitalintensiver Produktionsanlagen¹¹⁸ ist es wichtig, die Versorgungssicherheit der Produktion zu gewährleisten, um teure Stillstände zu vermeiden. Da Sicherheitsdenken in der Stahlerzeugung stark im Vordergrund steht, wird z. B. das Just in Time (JIT) Konzept als Beschaffungsmodus in fast keinem Werk umgesetzt, um Engpässe zu vermeiden. In den Stahlwerken ist daher meist ein hoher Rohstoffbestand vorhanden¹¹⁹, um eine optimale Versorgung der Produktion zu gewährleisten. Hohe Bestände bedeuten aber eine hohe Kapitalbindung. Es ergibt sich ein typischer logistischer Zielkonflikt.

Produktion

In der Produktion werden die Erzeugnisse aufgrund folgender Gegebenheiten vorwiegend Make-To-Order gefertigt:

- Bedingt durch unterschiedliche chemische Zusammensetzung und Formate ist die Produktvielfalt hoch.
- Die Produkte weisen oft sehr große Volumina und Gewichte auf. Da ein Lagerplatz oft nur begrenzt zur Verfügung steht, ist eine Lagerung großer Mengen nicht möglich.
- Da unbehandelte (Zwischen-)Produkte empfindlich auf Nässe reagieren (z. B. Korrosionsgefahr), ist eine Lagerung im Freien oft nicht möglich

Die Produktionszeit ist stark vom gewünschten Produkt (der bestellten Stahlgüte) abhängig und schwankt „zwischen sechs Wochen und sechs Monaten“.¹²⁰

Die Auslastung der Aggregate hat oberste Priorität für Produktionsverantwortliche, sonst wirtschaftet die Hütte unrentabel.¹²¹ Da der Wertzuwachs bei Sorten- und Massenware eher gering ist, die Transport-, Energie- und Rohstoffkosten aber sehr hoch sind, wird versucht, durch optimale Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten möglichst viel in möglichst kurzer Zeit zu erzeugen. Aufgrund des vorwiegend kontinuierlichen Charakters der Stahlproduktion sind Pufferlager bei den Arbeitssystemen selten umsetzbar. Auch würde die benötigte Raumfläche gar nicht zur Verfügung stehen.

¹¹⁶ Vgl. Schemme (2006), S. 78

¹¹⁷ Vgl. Schönsleben (2007), S. 411

¹¹⁸ Vgl. Keck (1994), S. 33

¹¹⁹ Vgl. Scheidl, von Wiedtke (2003), S. 49

¹²⁰ Degres et al. (2004), S. 462

¹²¹ Vgl. Scheidl, von Wiedtke (2003), S. 48ff., Bökmann (2006), S. 80

Die Größe der Charge ist meistens durch Mindestfüllmenge und Fassungsvermögen der Aggregate begrenzt.¹²² Die Kundenaufträge werden möglichst effizient in Chargen bzw. Kampagnen zusammengefasst, um Rüstvorgänge (v. a. an der Stranggußanlage), Reinigungsprozesse sowie An- und Abfahrvorgänge zu minimieren, da diese sehr zeitintensiv und damit kostenintensiv sind, um die Aggregate vollständig auszulasten¹²³. Eine Kampagne ist laut Schönsleben¹²⁴ „[...] ein ganzzahliges Vielfaches von Produktionschargen eines bestimmten Artikels, die nacheinander gefertigt werden“. In der Materialflussplanung wird daher versucht eine optimierte Reihenfolge der Chargen bzw. Kampagnen festzulegen. Da die meisten Werke einen Drei-Schicht-Betrieb führen¹²⁵, ist eine Erhöhung der Kapazität, i. d. R. nicht ohne weiteres machbar.

Aufgrund der Größe, Kosten und des Aufgabengebietes dieser Anlagen gibt es oft nur einzelne Einzweckaggregate¹²⁶. Ein Stillstand eines Aggregates kann somit die gesamte Fertigung zum Erliegen bringen. Daher müssen vor allem bei Engpassaggregaten Reinigungs- und Instandhaltungsvorgänge minimiert und exakt eingeplant werden, um unnötige Stillstände der kapitalintensiven Anlagen zu vermeiden.

Ein Streitpunkt in Expertenkreisen ist die definitive Abgrenzung zwischen Pull- und Push-Steuerung. Zu diesem Thema gibt es viele unterschiedliche Meinungen und Betrachtungsweisen.¹²⁷ Dass eine kombinierte Form aus beiden Steuerungsprinzipien angewendet wird, ist unumstritten. Die Aussage, dass der Hochofen bzw. der Elektrolichtbogenofen nach dem Push-Prinzip betrieben wird und die Stranggussanlage zieht, wird meistens auch befürwortet.¹²⁸ So induziert z. B. der Hochofen aufgrund seiner technologischen Gegebenheiten eine angebotsorientierte Versorgung. Spengler et al.¹²⁹ führen hierbei die nichtlinearen Produktionsfunktionen des Hochofens, die Schwierigkeit einer temporären Drosselung des Ofens und die Probleme bei einem verzögerten Abstich an. „Ein Verzögern des Abstiches aufgrund mangelnder Nachfrage kann nicht durch ein Mehr an Roheisen in späteren Perioden kompensiert werden“.¹³⁰

Die bedarfsorientierte Planung (Pull-Prinzip) geht von der Stranggußanlage aus, die bestimmte Gießsequenzen vorgibt und kontinuierlich betrieben wird. Nach Spengler et al.¹³¹

¹²² Vgl. Deuse, Deckert (2006), S. 86; Schönsleben (2007), S. 419

¹²³ Vgl. Schönsleben (2007), S. 419

¹²⁴ Schönsleben (2000), S. 295

¹²⁵ Vgl. Becker (2005), S. 2ff., Dorn et al. (1996), S. 4

¹²⁶ Vgl. Fransoo, Rutten (1993), S. 52f.; Günther (2004), S. 327

¹²⁷ Vgl. Bonney et al. (1999), S. 53ff., Lee (1989), S. 5ff., Venkatesh et al. (1996), S. 595ff., Villa, Watanabe (1993), S. 53ff., Kenworthy, Little (1995), S. 31f., Toni et al. (1988), S. 35ff.

¹²⁸ Vgl. Spengler et al. (2007), S. 53f, Fioroni et al. (2005), S. 2655f.

¹²⁹ Vgl. Spengler et al. (2007), S. 53

¹³⁰ Spengler et al. (2007), S. 53

¹³¹ Vgl. Spengler et al. (2007), S. 53f.

und Fioroni et al.¹³² determiniert die Stranggußanlage die Nachfrage nach Roheisen im Bereich der vorgelagerten Sekundärmetallurgie und des Konverters, sodass eine Zwischenlagerung des Roheisen zwischen Hochofen und nachfolgenden Aggregaten, in z. B. einen beheizten Roheisenpuffer, notwendig ist. Das heißt man geht davon aus, dass der Hochofen nach dem Push-Prinzip betrieben wird und ab dem Konverter „gezogen“ wird. Diese Annahme kann aber nicht generell belegt werden. Es kann auch fixe Abstichzeiten beim Konverter geben, und damit kann dieses Aggregat der Push-Steuerung noch unterliegen. In der Sekundärmetallurgie treffen die beiden Steuerungsformen üblicherweise aufeinander. Ein Pufferaggregat wie z. B. ein Pfannenofen¹³³ dient zur Abstimmung der beiden Steuerungsstrategien.

Der Punkt des Übergangs zwischen kundenneutraler und kundenspezifischer Fertigung, Kundenentkopplungspunkt¹³⁴ genannt, ist für die Stahlindustrie schwierig festzulegen. Dieser Punkt kann, abhängig von den bestellten Produkten (z. B. Bramme), von der Stranggußanlage bis hin zur Adjustage in der Stahlindustrie positioniert sein. So beginnt z. B. bei bestellten Brammen die kundenspezifische Fertigung bei der Stranggußanlage, da dort nach der Spezifikation des einzelnen Kundenauftrags das bestellte Gut gefertigt wird. Betrachtet man einen anderen Fall, bei dem eine Bramme zu einem Blech ausgewalzt wird, welches zu mehreren Kundenaufträgen weiterverarbeitet wird, z. B. zu diversen Autotüren, kann man zum vergleichbaren Zeitpunkt noch von einer kundenneutralen Fertigung sprechen.

„Nach den Kundenentkopplungspunkt steht die agile Lieferkette im Blickpunkt“¹³⁵, d. h. man versucht flexibel und schnell reaktionsfähig zu sein, dabei aber niedrige Bestände zu haben.

Es gibt einige Restriktionen im Materialflussverlauf in einem Stahlwerk, die meist verfahrenstechnische bedingt sind¹³⁶. Verfahrenstechnische Gegebenheiten hängen in erster Linie von den gewünschten Eigenschaften der herzustellenden Güter ab aber auch von den technischen Eigenschaften der jeweiligen Aggregate. So müssen Zwischenprodukte wie z. B. unbehandelter Rohstahl mit einer gewissen Temperatur in den sekundärmetallurgischen Bereich angeliefert werden. Dieses Temperaturfenster ist abhängig vom jeweiligen Weiterbearbeitungsschritt. Die Transportbehälter für Roheisen, Rohstahl etc. wie Pfannen oder Tundische müssen ebenfalls bestimmte Temperaturen aufweisen, sonst würde deren Haltbarkeit dramatisch reduziert werden. Es darf sich z. B. keine Restfeuchte in diesen Gefäßen befinden. Der Einsatzzeitpunkt dieser Behälter muss exakt eingehalten werden da kein Abriss im Mate-

¹³² Vgl. Fioroni et al. (2005), S. 2655f.

¹³³ Vgl. Lungen, Steffen (2006), S. S84

¹³⁴ Vgl. Syska (2006), S. 83

¹³⁵ Beckmann (2003), S. 33

¹³⁶ Vgl. Heidrich (2002), S. 47, Oloff (2005), S. 64f., Deuse, Deckert (2006), S. 86, Oloff (2006), S. 74f., Schemme (2006), S. 79

rialfluss stattfinden darf. Oft werden nur bestimmte Gefäße für bestimmte Produkte eingesetzt, so dass eine hohe Anzahl an verschiedenen Transportmitteln zur Verfügung stehen muss und zu steuern ist. Aufgrund des weit verbreiteten Sicherheitsdenkens in der Stahlindustrie werden oft mehrere Transportmittel gleichzeitig bereitgestellt, was mit hohen Kosten (Energie, Arbeitskraft) verbunden ist.

Neben der werksinternen Materialflussplanung müssen auch die externen (Entsorgungs-) Flüsse mitgeplant werden. Die Abfallentsorgung wird oft extern vergeben¹³⁷, da die benötigten Anlagen für die Verwertung und Behandlung von bestimmten Abfallstoffen in den Stahlwerken meistens nicht zur Verfügung stehen oder keine Kapazitäten darauf verwendet werden können. In einer Sinteranlage mit einer nachgeschalteten effizienten Rauchgasreinigungsanlage können aber z. B. innerbetriebliche Abfälle und Reststoffe behandelt werden. Im kleineren Ausmaß können Abfälle und Reststoffe auch im Hochofen und im Sauerstoffkonverter verwertet werden.¹³⁸ Das Outsourcing nimmt jedoch z. B. in der Lagerhaltung zu¹³⁹, wodurch sich weitere Abstimmungsbedarfe bei internen und externen Materialflüssen ergeben.

Distribution

Stahlprodukte haben eine hohe Dichte¹⁴⁰ und weisen daher oft Gewichte im Tonnenbereich auf. Das Gesamtgewicht eines Auftrages ist daher auch der limitierende Faktor im Distributionsfluss. Oft befindet sich die Mehrheit der Kunden einer Hütte aufgrund der Transportkosten in einer bestimmter Entfernung¹⁴¹ (ca. 500 km¹⁴²) zum Werk. Als Transportmittel sind durch die Gewichtsrestriktionen vor allem Bahn und LKW geeignet. LKW können aufgrund der Nutzlastbeschränkung oft nicht volumenmäßig ausgelastet werden. Es kann aber auch vorkommen, dass Spezialprodukte wie z. B. Pipelinerohre weltweit versendet werden da in diesen Fällen oft keine geeigneten Lieferanten in der Nähe des Einsatzortes zur Verfügung stehen. Jedoch fallen bei diesen Produkten die Transportkosten oft nicht zu sehr ins Gewicht, wie bei Standardware.

Einer der Hauptabnehmer von Stahlprodukten ist die Automobilindustrie¹⁴³ die entsprechend der dort üblichen JIT- und Just in Sequence (JIS)- Fertigung fixe Liefertermine voraussetzt. Für die Distributionsplanung stellt daher die zeitgerechte Lieferung der bestellten qualitätsgeprüften Ware oberste Priorität dar.

¹³⁷ Vgl. Gara, Schrimpf (1998), S. 7

¹³⁸ Vgl. Gara, Schrimpf (1998), S. 7

¹³⁹ Vgl. Handelsblatt Jahrestagung Stahlmarkt 2007 (2007), S. 111

¹⁴⁰ Vgl. Stoer (2000)

¹⁴¹ Vgl. Köhler (2004), S. 88ff., Mehta (2004), S. 98f., Wagner (2007), S. 85, Viehöver (1997), S. 246

¹⁴² Vgl. Viehöver (1997), S. 246

¹⁴³ Vgl. Köhler (2004), S. 88f., Voest (2005)

Entsorgung

In der Eisen- und Stahlindustrie fallen große Mengen an Aschen, Schlacken und Stäube, sowie Walzzunder und Schlämme an.¹⁴⁴ Daher ist der Entsorgungsfluss nicht zu vernachlässigen.

Bei der Stahlerzeugung entstehen pro Tonne Rohstahl ungefähr 450 bis 500 Kilo Reststoffe und Abfälle. Davon kann rund 86% (intern oder extern) wieder verwendet werden, der Rest wird auf Deponien entsorgt.¹⁴⁵ Der Anfall von Hochofen- und Konverterschlacke betrug im Jahr 2003 in Österreich über 2.000.000 Tonnen. Die Eisen- und Stahlindustrie betreibt die Produktion von Eisen und Stahl auch im Hinblick auf die Qualität der Schlacken, welche als Produkte eingestuft sind. Die Schlackenprodukte müssen spezifischen Produktstandards entsprechen und im Werk selbst oder extern speziellen Bearbeitungsschritten unterzogen werden, um die geforderten Anforderungen zu erfüllen. Hochofenschlackenprodukte werden in der Zementindustrie, als Streusplitt für den Winterdienst sowie im Hoch- und Tiefbau eingesetzt. LD-Konverterschlacke wird für den Tiefbau und als Sekundärrohstoff zur Eisenrückgewinnung eingesetzt.¹⁴⁶ Schlacken sind typische Erzeugnisse, die als Nebenprodukt anfallen, Primärrohstoffe substituieren können und somit Ressourcen schonen.¹⁴⁷

Die Koordination der zusätzlichen Bearbeitungsschritte der angefallenen Schlacke im Hüttenbetrieb bzw. die externe Vergabe sowie die eventuelle Rückführung von z. B. Feuerfest-Ausbruch zu einem früheren Produktionsschritt ist eine Herausforderung in der Materialflussplanung. Es können zyklische Materialflüsse auftreten¹⁴⁸ und damit die Planung und Steuerung der Flüsse erschweren. Der Großteil der angefallenen Schlacke wird für andere Einsatzgebiete aufbereitet, nur ein kleiner Teil wird zur Eisenrückgewinnung genutzt¹⁴⁹.

Zusammengefasst liegen die Hauptprobleme in der Stahlindustrie in der optimalen Versorgung der Werke mit den gewünschten Gütern. Die langen Wiederbeschaffungszeiten, die Verfügbarkeit und die Preisschwankungen, aufgrund derer die Lieferanten oft keine langfristigen Verträge zu konstanten Bedingungen mehr akzeptieren, stellt die Stahlindustrie vor große Herausforderungen in der Beschaffung und hat damit natürlich auch Auswirkungen auf nachgelagerte Wertschöpfungsschritte. Innerbetrieblich ist die optimale Abstimmung der einzelnen Prozessschritte mit den benötigten Ressourcen oft die größte Herausforderung.

¹⁴⁴ Vgl. Gara, Schrimpf (1998), S. 8ff., Endemann et al (2006), S. 25ff.

¹⁴⁵ Vgl. Gara, Schrimpf (1998), S. 7

¹⁴⁶ Vgl. Winter et. al (2005), S. 128

¹⁴⁷ Vgl. Endemann et al. (2006), S. 25

¹⁴⁸ Vgl. Schönsleben (2007), S. 411

¹⁴⁹ Vgl. Gara, Schrimpf (1998), S. 9, Ameling, Endemann (2007), S. 90

3.3 Materialflussstruktur und Anforderungen in der Feuerfestindustrie

Um ein Verständnis für die Anforderungen an den Materialfluss in der Feuerfestindustrie zu schaffen, wird nun der interne Ablauf dieser Branche erläutert. Zuerst wird der innerbetriebliche Materialfluss detailliert präsentiert und anschließend Herausforderungen im Materialfluss der Feuerfestindustrie diskutiert.

3.3.1 Innerbetriebliche Materialflussabläufe in der Feuerfestindustrie

Bei der Untersuchung typischer Materialflussverläufe in Feuerfestwerken haben sich folgende Materialflussverläufe herauskristallisiert (Abbildung 15): Man unterscheidet grundsätzlich vier verschiedene Verläufe. Es gibt die Massenherstellung, die Herstellung von geformten, ungebrannten Steinen, die Produktion von gebrannten Steinen und schließlich noch die Erzeugung schmelzgegossener Produkte sowie Spezialerzeugnisse (z. B. Funktionskeramiken).

Oft stellt ein Werk mehrere dieser unterschiedlichen Produktfamilien her und weist daher eine Kombination aus den vier möglichen Materialflussabläufen auf.

Der Materialfluss hat eine konvergierende Struktur bei der Zusammenführung der Rohstoffe, dem Mischen und der Nachbearbeitung von v. a. gegossenen Steinen, lineare Strukturen bei den meisten Prozessschritten, aber auch vereinzelt Divergenz. Ein divergierender Flussverlauf lässt sich z. B. in der Nachbearbeitung von gegossenen Steinen identifizieren, wo mehrere unterschiedliche Produkte hergestellt werden können und auch Abfallprodukte anfallen. Der Verlauf ist grundsätzlich stark abhängig von der Produktart. So ist z. B. eine Sinterung abhängig vom Rohmaterial und daher nicht bei jedem Produkt ein notwendiger Produktionsschritt. Ein reines Massenwerk weist einen nahezu linearen Materialfluss auf. Bei der Steinerzeugung werden zur Erzeugung der jeweiligen Masse beim Mischen neben Rohstoffe auch Zuschläge (konvergierender Materialfluss) z. B. Bindemittel eingebracht. Nach der Definition von Schönsleben¹⁵⁰ kann man in der Stahlindustrie als auch in der Feuerfestindustrie von einer Kuppelproduktion sprechen.

¹⁵⁰ Vgl. Schönsleben (2000), S. 279

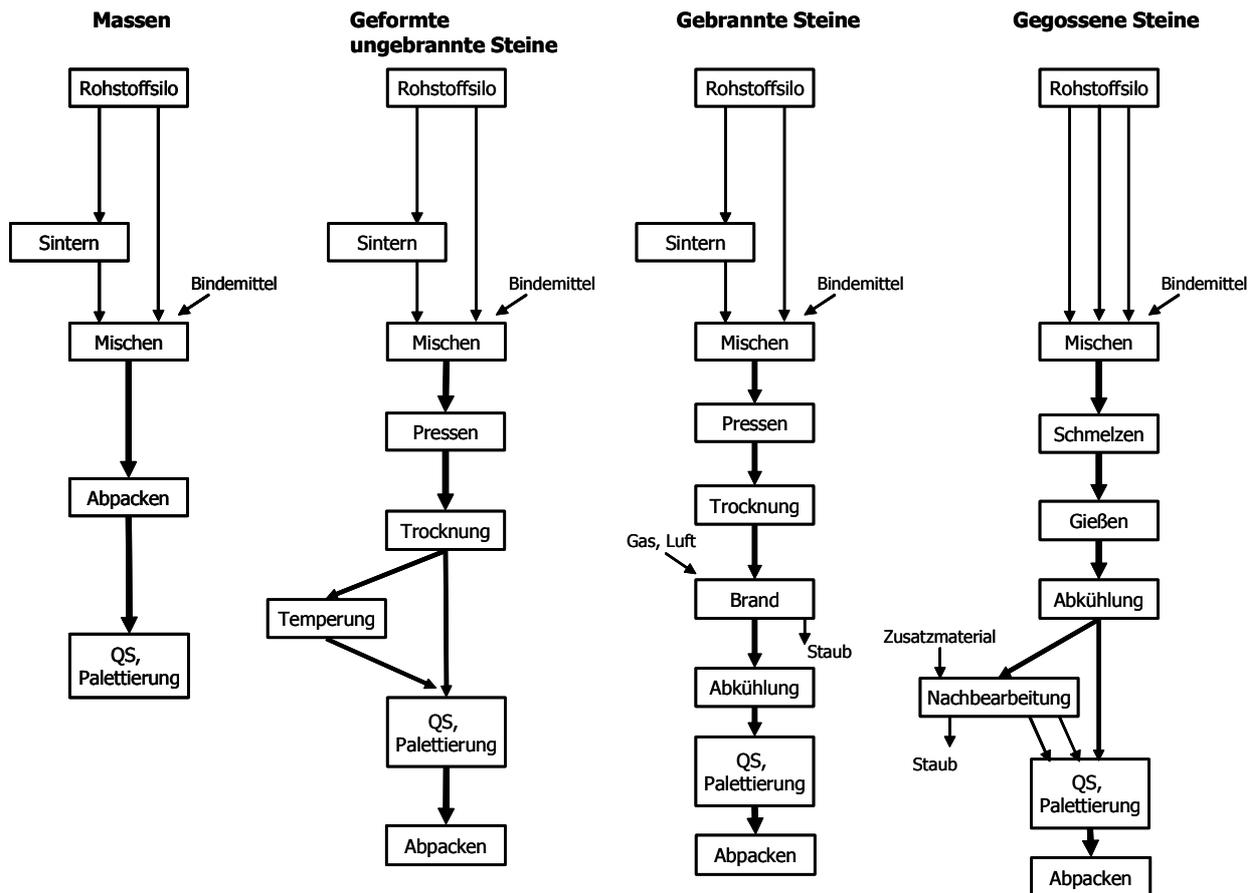


Abbildung 15: Materialflussverläufe in der Feuerfestindustrie (Eigendarstellung in Anlehnung an BMLFUW¹⁵¹)

Auch in dieser Branche der Prozessindustrie ist nicht ein typischer Materialflussverlauf vorhanden. Ein linearer Hauptfluss ist für die meisten Produktparten zu identifizieren, doch gibt es auch hier einige Ausnahmen. Ein Übergang von der Prozessindustrie zur Stückgutindustrie mit fortschreitendem Prozessablauf kann, wie bei der Stahlerzeugung, auch hier festgestellt werden. So zählt z. B. die Nachbearbeitung von schmelzgegossenen Steinen von ihrer Charakteristik her eindeutig nicht mehr zur Prozessindustrie sondern zur diskreten Fertigung.

3.3.2 Schwierigkeiten im Materialflusssystem der Feuerfestindustrie

Der Materialfluss in der Feuerfestindustrie unterliegt einigen Anforderungen, die im Folgenden erläutert werden sollen. Dabei werden die wichtigsten Probleme zusammengefasst.

Beschaffung

In der Feuerfestindustrie werden, wie in der Stahlindustrie, sehr viele Rohstoffe aus verschiedenen Teilen der Welt beschafft, so stammt z. B. der verwendete Magnesit vor allem

¹⁵¹ Vgl. BMLFUW (2003), S. 25ff.

aus Südostasien¹⁵². Die Probleme im Versorgungsfluss ähneln oft den Schwierigkeiten der Stahlindustrie: Hohe Rohstoffpreise, lange Wiederbeschaffungszeiten (WBZ), ungenaue Liefertermine, Qualitätsvarietät der Rohstoffe und begrenzte Verfügbarkeit an Rohstoffen und Transportmitteln. Bei Rohstoffbezug aus der Umgebung des Werksstandortes spielt die WBZ dagegen keine große Rolle, da auf Änderungen bei den benötigten Rohstoffmengen oft kurzfristig reagiert werden kann.

Die Rohstoffpreise für mineralische Rohstoffe der Feuerfestindustrie sind im Zeitraum 2003 bis 2007 stark angestiegen, so haben sich z. B. im Jahr 2004 die Preise für Korund, Bauxit und Chrom-Erz-Sand um ca. 40% erhöht.¹⁵³ Für das Jahr 2008 ist ein leichter Rückgang bzw. eine Stagnation bei den Rohstoffpreisen prognostiziert.¹⁵⁴

Auch in dieser Branche sind JIT Konzepte kaum umgesetzt, da sich die Lieferanten oft weit entfernt befinden. Für Zukaufteile bei den Funktionalprodukten, wie z. B. Bleche, wird eine auftragsbezogene Beschaffung gewählt. Sonst werden hauptsächlich aufgrund von Prognosen bzw. Kundenaufträgen bestimmte Mengen an Rohstoffen beschafft.

Eine Eigenheit der Feuerfestindustrie ist, dass die Kundenaufträge in fast allen Fällen auch Fertigprodukte von anderen Anbietern umfassen. Der Kunde bestellt nicht nur Artikel aus dem Sortiment des jeweiligen Feuerfestproduzenten sondern auch noch Produkte von anderen Produzenten. Daher gehört neben der Koordinierung der Produktion der eigenen Artikel auch noch die Beschaffung von Fremderzeugnissen (Handelsware) zu einem Kundenauftrag. Diese Praxis stellt einige Herausforderungen an die Abstimmung der Materialflüsse.

Produktion

Es findet sich eine große Übereinstimmung mit der Stahlindustrie.

Die Produktionsplanung hat das Ziel, die Rüstkosten und Reinigungsaufwände klein zu halten und daher die Reihenfolge der Kampagnen möglichst effektiv (d. h. unter Minimierung der Zielgröße, meistens die Minimierung der Reinigungsprozesse sowie An- und Abfahrvorgängen¹⁵⁵) zu gestalten. Die Rüst- und Reinigungsaufwände sind in dieser Branche bei Qualitätswechseln v. a. an den Pressen und Mischern hoch.

Die Produktionszeiten der Erzeugnisse liegen bei Massen bei wenigen Stunden, bei schmelzgegossenen Produkten kann die Herstellungsdauer mehrere Monate dauern.

¹⁵² Vgl. RHI (2006), S.27f.

¹⁵³ Vgl. Suni (2007), S. 1ff., Gastmann, de Veen (2005), S. 4

¹⁵⁴ Vgl. Suni (2007), S. 1ff.

¹⁵⁵ Vgl. Schönsleben (2007), S. 419

In der Feuerfestindustrie ist der kontinuierliche Fließcharakter der Fertigung oft weniger ausgeprägt als in der Stahlindustrie, da mehr Prozesse oft semi-kontinuierlich ablaufen. Dabei handelt es sich um eine Mischform aus kontinuierlichen und diskreten Materialfluss, die z. B. bei Mischprozessen, welche die langsame und gleichmäßige Zugabe bestimmter Zusatzstoffe verlangen, feststellbar ist¹⁵⁶. In der Feuerfestindustrie ist es ebenfalls schwer, eine eindeutige Pull- bzw. Push- Strategie in bestimmten Bereichen eindeutig zu identifizieren. So setzt z. B. ein weltweit agierender Feuerfestkonzern für die Grobplanung die TOC (Theory of Constraints) ein, welche dem Push- Prinzip zuordenbar ist, produziert aber zu 90% auftragsbezogen und in der Feinplanung herrscht eine Kombination aus Pull/Push vor.¹⁵⁷ Auch für die Feuerfestindustrie gilt, dass eine Kombination aus Push und Pull in der Produktion vorliegt.

Der Kundenentkopplungspunkt in der Feuerfestindustrie ist, wie auch in der Stahlindustrie, stark abhängig vom erzeugten Produkt. Bei Massen folgt die kundenspezifische Abfüllung nach dem Mischer, bei gebrannten Steinen kann z. B. der Entkopplungspunkt erst bei der Verpackung liegen wenn nicht eine ganze Kampagne einen Kundenauftrag zugeordnet ist bzw. auf Lager produziert wurde. Spezialanfertigungen können z. B. im Bereich der schmelzgegossenen Produkte zu einer kundenspezifischen Einzelfertigung führen.

In der Produktion ist Flexibilität im Hinblick auf Mengenänderungen vor allem abhängig vom Produkt.¹⁵⁸ Bei der Herstellung von Massen herrscht aufgrund der kurzen Produktionszeit und der leicht umsetzbaren Kapazitätserhöhung, z. B. durch eine Erhöhung der Schichtanzahl, eine hohe Reaktionsfähigkeit vor. Bei gebrannten Steinen lassen sich die Produktionsraten auch durch z. B. Zukauf von Kapazitäten erhöhen. Bei schmelzgegossenen Produkten dagegen ist so gut wie keine Flexibilität gegeben, da bei diesen Produkten die Herstellung mehrere Monate benötigt und die benötigten Rohstoffe oft nicht kurzfristig beschafft werden können. In der Feuerfestindustrie gibt es eine große Bandbreite an Flexibilität, diese ist stark abhängig vom Produkt. Einer Verringerung der Durchlaufzeit sind auch verfahrenstechnische Grenzen gesetzt, z. B. beim Brand¹⁵⁹ sind bestimmte Zeiten einzuhalten.

Die Transportbehältnisse unterliegen weniger Restriktionen als im Stahlbereich und sind oft auch für mehrere Zwecke einsetzbar. Man verwendet z. B. hauptsächlich gleisgebundene Transportmittel zur Bewegung der hohen Lasten in Öfen (Herdwagenofen, Tunnelofen etc.).

¹⁵⁶ Vgl. Günther (2004), S. 326

¹⁵⁷ Vgl. Gesprächsprotokoll 1 im Anhang

¹⁵⁸ Vgl. Gesprächsprotokoll 1 im Anhang

¹⁵⁹ Vgl. Funke (2007), S. 6

Eine hohe Auslastung der Aggregate ist auch hier unumgänglich, um rentabel zu produzieren, so dass es teilweise bestimmte Mindestbestellmengen gibt.¹⁶⁰ Gewisse Aggregate, wie die Presse und der Ofen, sollten räumlich möglichst nahe zusammen stehen, da der Transport von grünfesten Produkten nach der Presse über lange Wege zu Qualitätsverminderungen (Risse) führen kann. Es gibt meistens mehrere Einzweckaggregate eines Typus bei der Mischung und Pressung der Rohstoffe, die für unterschiedliche Qualitäten eingesetzt werden, um Rüstzeiten zu sparen und im Notfall noch eine Anlage verfügbar zu haben, auf die man ausweichen kann. Beim Brand und in der Nachbearbeitung findet sich häufig nur ein Einzweckaggregat eines Typus, da diese sehr kosten- und platzintensiv sind.

Distribution

Feuerfestprodukte haben oft eine sehr hohe Dichte. Das Gesamtgewicht eines Auftrages kann auch in dieser Branche ein limitierender Faktor im Distributionsfluss sein. In der Feuerfestindustrie gibt es „Standardware“ deren weltweite Verschickung sich aufgrund des Verhältnisses der Transportkosten zu den Erlösen nicht rechnen würde. Bei z. B. schmelzgegossenen Fabrikaten sind die Erlöse sehr hoch, so dass hohe Transportkosten in Kauf genommen werden können.

Die Abstimmung der (Teil-)Lieferungen der einzelnen Werke für einen Auftrag zu einem bestimmten oder eventuell an mehrere Orte bedarf einer fachgerechten Planung. Viele Unternehmen nutzen lineare Optimierungsmechanismen zur Planung des Materialflusses in der Distribution.

Entsorgung

In der Feuerfestindustrie fallen hauptsächlich feuerfeste Massen bzw. Steine aus der Ausmauerung der Öfen als Abfall an. Es kommt darauf an, für welche Produkte die einzelnen Öfen verwendet wurden, um eine Weiterverwendung der Materialien zu ermöglichen. Ein großer Teil kann als Zuschlagstoff weiterverwendet werden, verunreinigte Materialien werden deponiert.

Für die Feuerfestindustrie gilt ähnliches wie in der Stahlindustrie: Entlang der gesamten Wertschöpfungskette gibt es viele logistische Herausforderungen: Die Rohstoffbeschaffung, viele unterschiedliche Varianten, verfahrenstechnische Restriktionen etc.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass beide Branchen oft ähnliche Merkmale im Materialflusssystem aufweisen (vgl. Tabelle 2) und daher eine gemeinsame Betrachtung durchaus

¹⁶⁰ Vgl. Gesprächsprotokoll 1 im Anhang

zielführend ist. Bei Abweichungen aufgrund anderer Materialflusscharakteristik in den nachfolgenden Betrachtungen wird explizit auf die Unterschiede hingewiesen und eingegangen.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die gemeinsamen bzw. abweichenden Merkmale im Materialflusssystem in der Stahl- und Feuerfestindustrie:

	Individuelle Merkmale Stahlindustrie	Individuelle Merkmale Feuerfestindustrie	Gemeinsame Merkmale im Materialflusssystem
Beschaffung		<ul style="list-style-type: none"> • Beschaffung von anderen Feuerfestprodukten von Konkurrenten 	<ul style="list-style-type: none"> • Steigende Rohstoffpreise • Benötigung großer Rohstoffmengen • Rohstoffbeschaffung meistens aus Übersee • JIT Konzepte kaum umsetzbar • Lange WBZ bei Rohstoffen • Rohstoffe mit Varietäten der Qualität • Probleme bei der Verfügbarkeit bestimmter Rohstoffe
Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere Prozessschritte verlaufen kontinuierlich • meistens nur Puffer beim Übergang Pull/Push • oft zweckgebundene Transportmittel • geringe Flexibilität der Fertigung • Sorten- und Massenfertigung • oft keine Kapazitätserhöhung möglich • lange Rüstzeit v. a. an der Stranggussanlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuität der Prozessschritte hängt stark von der Werksstruktur und vom Produkt ab • wenige Puffer • oft Mehrzweck-Transportmittel • Flexibilität der Fertigung abhängig vom Produkt • Einzel-, Sorten- und Massenfertigung • Kapazitätserhöhung abhängig vom Aggregat • lange Rüstzeiten und Reinigungszeiten bei mehreren Aggregaten 	<ul style="list-style-type: none"> • oft generelle Materialflusstruktur (vgl. Abbildung 11) • hoher Automatisierungsgrad in modernen Werken • hoher Prozentsatz Make-to-Order • hohe Auslastung der Aggregate hat meistens oberste Priorität • Bildung von Rüstfamilien, Fertigung in Kampagnen/Chargen • oft Einzweckaggregate • hohe Energiekosten • viele Produkte werden aus wenigen Rohstoffen erzeugt • Kombination aus Push- und Pull-Steuerung • unternehmenseigene Steuerungssysteme • Kundenentkopplungspunkt abhängig vom Produkt
Distribution	<ul style="list-style-type: none"> • oft „werksnahe“ Kunden 	<ul style="list-style-type: none"> • Verpackungsprobleme 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Dichte der Produkte • hohe Transportkosten
Entsorgung			<ul style="list-style-type: none"> • Materialflusszyklen • teilweise aufwendige Entsorgung

Tabelle 2: Übereinstimmende Merkmale der Stahlindustrie und der Feuerfestindustrie

Die Beschaffung stellt eine entscheidende Herausforderung in Materialflusssystemen beider Branchen dar, da die Materialflüsse in der Produktion stark von den eingesetzten Rohstoffen abhängen. Die Beschaffung unterliegt sehr ähnlichen Problemen wie der Rohstoffknappheit und der mangelnden Verfügbarkeit der Einsatzstoffe in beiden Industriezweigen.

Auch für die Produktion sind einige gemeinsame Merkmale identifizierbar. So ist z. B. das Ziel einer hohen Auslastung der Aggregate in beiden Industriezweigen eine typische gemeinsame Eigenschaft im innerbetrieblichen Materialfluss. Doch gibt es aber auch einige Unterschiede

in diesem Bereich v. a. hinsichtlich der Flexibilität sowie bei Rüst- und Reinigungszeiten bei Aggregaten.

Der nachfolgende morphologische Kasten (Abbildung 16 mit Legende 1) soll grundsätzlich eine Zusammenfassung der Merkmalsausprägungen der Prozessindustrie, mit Fokus auf die Stahl- und Feuerfestindustrie, darstellen:

Merkmal	Ausprägungen				
<i>Merkmalsbezug Produktion</i>					
Produktstruktur	konvergierend	divergierend	linear		generell
Materialfluss	diskret		semi-kontinuierlich	kontinuierlich	
Produktionskonzepte	Engineer to Order		Assemble to Order	Make to Stock	Make to Order
Fertigungsform	Einzelfertigung	Kleinserienfertigung	Mittelserienfertigung	Großserienfertigung	Massenfertigung
Organisationstyp	Baustellenfertigung	Inselfertigung	Werkstattfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung
Produktionsverlauf	Ohne Zyklus			Mit Zyklus	
Automatisierungsgrad	keine Automatisierung		wenig Automatisierung		hoch automatisiert
Produktionsplanung	materialorientiert			kapazitätsorientiert	
Qualitative Flexibilität der Aggregate	Für verschiedene Prozesse einsetzbar		Für spezifische Prozesse einsetzbar		Für einen einzigen Prozess einsetzbar
Quantitative Flexibilität der Aggregate	flexibel		wenig flexibel		nicht flexibel
Unterbrechungen	Verteilung auf andere Aggregate		Stillstand	Hohe Kosten	Qualitätsmängel
Transportmitteleinsatz	flexibel einsetzbar		spezifisch einsetzbar		
Transportmittel-führung	gleisungebundene			gleisgebundene	
Transportmittelvarianten	produktunabhängig		produktbezogen		
Pufferlager	vor den Arbeitsplätzen		in der Werkshalle		selten
Qualitätsmängel	Ausschuss	2. Ware	Wiederverarbeitung als Rohstoff		Qualitätsumwidmung
Steuerungssoftware	Standardsoftware		Standardsoftware + Eigenanteil		Selbst entwickelte Programme
Produktionssteuerung	Pull		Push		Kombination Pull+Push
<i>Merkmalsbezug Beschaffung</i>					
Auftragsart	Verbrauch		Prognose		Kundenauftrag
Lieferantencharakteristik	Single sourcing			Multiple sourcing	
Anlieferungsform	JIS	JIT	Beschaffung im Einzelfall		Vorratsbeschaffung
Lagerung Materialien	Keine besonderen Anforderungen		unter Dach Lagerung	Lagerung in Behältern	Lagerung in luftdichten Behältnissen

Transportmittel	Flugzeug	Bahn	Schiff	LKW
<i>Merkmalsbezug Distribution</i>				
Kunden - (Mehrheit)	weltweit		in räumlicher Nähe	
Transportmittel	Flugzeug	Schiff	LKW	Bahn

Abbildung 16: Morphologischer Kasten Charakteristika Prozessindustrie (eigene Darstellung)

Legende 1:

	Oft in der Prozessindustrie vertreten
	Manchmal in der Prozessindustrie vertreten
	Selten in der Prozessindustrie zu finden

Der morphologische Kasten ist aus der Analyse der Materialflussgegebenheiten in der Stahl- und Feuerfestindustrie entstanden. Damit ist auch eine Grundlage geschaffen um festzustellen, inwieweit einzelne Industriespaten der Charakteristika der Prozessindustrie entsprechen. Es kann, wie vermutet, aber auch durch die Analyse Materialflussgegebenheiten in dem Branchencluster keine exakte Zuordnung einer Branche zu der, vom Meredith und Dennis, getroffenen Einteilung gemacht werden, da die definierten Merkmale in der Untergliederung nicht immer mit der Charakteristik in der Stahl- und Feuerfestindustrie übereinstimmen.

Der nächste Abschnitt leitet aus den beschriebenen Merkmalen der Materialflusssysteme in der Stahl- und Feuerfestindustrie logistische Herausforderungen ab, um für den nachfolgenden Abschnitt 3.4, welcher sich mit Grundsätzen zur Vereinfachung und Steuerung von Flüssen beschäftigt, Ansatzpunkte aufzuzeigen und für das Kapitel 4 Ansatzpunkte für die Komplexitätsuntersuchungen zu liefern.

3.4 Logistische Herausforderungen im Materialflusssystem in der Stahl- und Feuerfestindustrie

Dieses Kapitel fasst die logistischen Herausforderungen in den einzelnen Bereichen der Wertschöpfungskette für die Stahl- und Feuerfestindustrie zusammen. Dabei werden die im vorigen Punkt besprochenen Anforderungen und Probleme in den Materialflüssen betrachtet, und logistische Herausforderungen abgeleitet und generalisiert aufbereitet für das Branchencluster in den Bereichen Beschaffung, Produktion, Distribution und Entsorgung.

3.4.1 Herausforderungen im Materialfluss der Beschaffung

Ein entscheidender Faktor im Materialfluss der Beschaffung sind die stark schwankenden Rohstoffpreise. Fleischer¹⁶¹ meint dazu, dass bei der hohen Volatilität der Rohstoffpreise der Einkauf einer der wichtigsten Faktoren ist und eine gute, enge Beziehung zwischen Einkäufer und Verbraucher unerlässlich für die Prozess- und Kostenstabilität ist. Als Folge der enormen Verteuerungen der Rohstoffbezüge sei es für die Stahlindustrie wieder interessant geworden, sich eigene Rohstoffquellen zu sichern, um sich selbst versorgen oder sogar selbst als Rohstofflieferant aufzutreten.¹⁶² Maßnahmen wie die Diversifikation der Lieferanten, eine neue ausreichende Lagerplanung und -haltung und langfristige Verträge mit den Lieferanten können als Mittel zur Stabilisierung der schwierigen Situation bei der Rohstoffbeschaffung dienen.¹⁶³ Der Materialfluss wird durch die Erhöhung der Lieferantenzahl und Bezugsorte immer diffiziler. Der eigene Abbau von Rohstoffen bedingt u. a. eine Erweiterung der Kompetenzen. Es entstehen immer mehr Schnittstellen in der Supply Chain und damit steigt der Koordinations- und Steuerungsaufwand des Materialflusses. Kostenabschätzungen alternativer Beschaffungswege werden immer wichtiger und damit rücken z. B. Methoden der Graphentheorie immer stärker in den Fokus der Materialflussplanung.

Der Materialfluss in der Beschaffung kann sich oft ändern bzw. muss sich anpassen da die „Reserven von Rohstoffen dynamisch sind aufgrund von Neufunden, Innovationen, Explorationsintensität, Preisniveau, Kostenstruktur der Bergwerke, technischer Entwicklungen, Substitution, Bevölkerungsentwicklung, politische Rahmenbedingungen oder verbrauchseitigen Änderungen in wirtschaftlichen Entwicklungen“.¹⁶⁴

Die benötigten Rohstoffe werden vor allem durch Bergbau gewonnen und sind durch natürliche Variationen in der Qualität charakterisiert. Die Varietät der Rohstoffqualität bestimmt oft, welche Produkte daraus erzeugt werden können.¹⁶⁵ Genauso können Qualitätsvariationen der Rohstoffe (bzw. der Einsatz alternativer Rohstoffe¹⁶⁶) zu Änderungen der Stückliste (der Rezepte) führen¹⁶⁷ und damit zu unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen und Materialflussverläufen bei gleichen Endprodukten. Dies ist aber eher die Ausnahme, da normalerweise Qualitätsvarietäten in den Rezepturen der jeweiligen Qualität eingeplant sind.

¹⁶¹ Vgl. Fleischer et al. (2007), S. 58

¹⁶² Vgl. Köhler (2006), S. 96

¹⁶³ Vgl. Schamari (2005), S. S36

¹⁶⁴ Vgl. Gerling, Wellmer (2004), S. 254ff.

¹⁶⁵ Rice, Norback (1987), S. 17

¹⁶⁶ Vgl. Taylor (1981), S. 13f.

¹⁶⁷ Vgl. Rutten (1993), S. 363f.

Neben den primären Rohstoffen gewinnen Sekundärrohstoffe, welche aus Alt- und Abfallmaterial gewonnen werden, an Bedeutung im Produktionsprozess.¹⁶⁸ In Deutschland stammten z. B. im Jahr 2000 42% des Eisenerzes aus dem Recycling.¹⁶⁹ Der Anteil an Schrott an der Rohstahlproduktion in Deutschland betrug 2005 42,2%. Mit einer Recyclingrate von 53,9% im Jahr 2005 war Stahlschrott der wichtigste Stahlrohstoff in Europa, Tendenz steigend¹⁷⁰. Dies führt zu einem stärkeren Zusammenspiel zwischen den Materialflüssen der Beschaffung und Entsorgung bzw. Aufbereitung. Viele Kuppelprodukte oder Abfälle aus der Stahlproduktion wie z. B. Schlacken, Schrott etc., werden nach der Aufbereitung wieder in Stahlwerken eingesetzt.

Die Stahl- und Feuerfestindustrie ist gekennzeichnet vom Einsatz ungeformter Materialien in großen Mengen. Für den Transport bedeutet die Verwendung von ungeformtem Material auch die Bereitstellung geeigneter Transportmittel und -behälter. Einerseits machen die großen Bedarfsmengen eine große Lagerkapazität notwendig, andererseits führen sie auch zu einem aufwendigen Transport- bzw. Behältermanagement und damit zu einer komplexen Materialflussplanung.

Die oft langen Wiederbeschaffungszeiten¹⁷¹ erfordern eine mittel- bis langfristige Planung der Materialflüsse. Auf kurzfristige Änderungen von Kundenwünschen kann oft nur unter hohem Kosten- und Planungsaufwand reagiert werden.

Um den hohen Rohstoffbedarf in der Stahl- und Feuerfestindustrie zu decken, ist meist die Anlieferfrequenz der Materialien sehr hoch, oft wird sogar im Tagesrhythmus angeliefert. Eine optimale Planung und Koordination aller ein- und ausgehenden Flüsse ist nötig, um die hohe Anzahl an mengenmäßig großen Flüssen steuern zu können.

Spezielle Anforderungen und Bestimmungen sind oftmals bei der Lagerung der ungeformten Rohstoffe in der Stahl- und Feuerfestindustrie einzuhalten. So ist beispielsweise für viele Einsatzstoffe eine Lagerung in bestimmten, oft voluminösen, Behältern erforderlich.¹⁷² Die Bereitstellung, der Transport dieser Behälter kann als Teil der Aufgabenstellungen des internen Materialflusses angesehen werden.

Zusammengefasst liegen die logistischen Herausforderungen im Materialfluss der Beschaffung v. a. in der Planung und Steuerung aller Flüsse. Die Planung muss sowohl mittelfristig bis langfristig ausgelegt sein, es sollte aber auch die Möglichkeit bestehen, auf Änderungen,

¹⁶⁸ Vgl. Martens (2006), S. 84

¹⁶⁹ Vgl. Dalheimer, Wellmer (2003), S. 8

¹⁷⁰ Vgl. Schemme (2006), S. 78ff.

¹⁷¹ Vgl. Martens (2006), S. 83

¹⁷² Vgl. Loos (1997), S. 20f.

wirtschaftlicher, politischer etc. Art reagieren zu können. Die Planung und Steuerung der Materialflüsse muss daher auch einer gewissen Flexibilität unterliegen.

3.4.2 Herausforderungen im Materialfluss der Produktion

Die Auslastung der Aggregate in der Stahl- und Feuerfestindustrie stellt für Produktionsverantwortliche oberste Priorität dar, um rentabel zu produzieren.¹⁷³ Die Größe der Charge ist durch Mindestfüllmenge, Fassungsvermögen der Aggregate und Lagerkapazität nach unten bzw. oben limitiert sowie oft durch technologische oder rechtliche Bestimmungen vorgegeben.¹⁷⁴ „Die Auslastung der Kapazitäten wird zum Schlüsselkriterium der Planung und Steuerung, vor den Materialien, den Komponenten und dem schnellst möglichen Güterfluss“.¹⁷⁵

In der Chargenfertigung wird „die durch einen Prozess bearbeitete Materialmenge (Charge) dem benutzten Apparat zu Beginn des Prozesses als Ganzes zugeführt und zum Ende des Prozesses als Ganzes entnommen“.¹⁷⁶ Viele Produktionsregeln müssen als Planungsregeln für den Materialfluss berücksichtigt werden. So muss in der Stahlindustrie z. B. das Gießen fortgesetzt werden (ist ein kontinuierlicher Vorgang, der nicht unterbrochen werden kann), während sich Formate (z. B. die Breite) des Stranges ändern können.¹⁷⁷ Um effizient die Auslastung von Maschinen zu gewährleisten, ist eine kapazitätsorientierte Produktionsplanung notwendig. In der Feuerfestindustrie müssen z. B. bestimmte Brenntemperaturen eingehalten werden.

Die Reihenfolge der Chargen kann nicht beliebig gewählt werden, da es z. B. aus verfahrenstechnischen Gründen oft nicht möglich ist, einen niedrig legierten Stahl nach einem hochlegierten Stahl zu schmelzen (es muss die Verunreinigung von Schmelzen durch die Infiltration des Ofens durch die Vorgängerschmelze vermieden werden¹⁷⁸). Die Reihenfolgeplanung wird zusätzlich erschwert durch Aggregate (z. B. bei der Wärmebehandlung) die unterschiedliche Produkte bzw. Chargen, die dieselben Qualitätsanforderungen haben, gleichzeitig behandeln können, wohingegen nachfolgende Ressourcen, z. B. das Warmwalzwerk, eine chargenreine Fertigung verlangen.¹⁷⁹

Eine hohe Synchronisation von Material, Mensch, Methode und Maschine, die so genannten vier M's¹⁸⁰, muss gewährleistet sein, dass der oft kontinuierliche Materialfluss (v. a. in der

¹⁷³ Vgl. Scheidl, von Woedtke (2003), S. 48ff., Bökmann (2006), S. 80

¹⁷⁴ Vgl. Schönsleben (2007), S. 419

¹⁷⁵ Schönsleben (2007), S. 403

¹⁷⁶ Trautmann (2002), S.1

¹⁷⁷ Vgl. Oloff (2006), S. 74

¹⁷⁸ Vgl. Dorn et al. (1996), S. 3

¹⁷⁹ Degres et al. (2004), S. 462

¹⁸⁰ Vgl. Imai (1992), S. 279

Stahlindustrie) in der Produktion reibungslos abgewickelt werden kann und eine exakte Planung und Steuerung der einzelnen Sequenzen des Prozesses ist unerlässlich.

In der Stahl- und Feuerfestindustrie, einem auslastungsorientierten Geschäft, gewinnen die Marktziele hohe Termintreue und kurze Durchlaufzeit (DLZ) vor dem Hintergrund gestiegener Kundenanforderungen zunehmend an Bedeutung. Eine konsequente Umsetzung von Lean Production Prinzipien bedingt in diesen Industriesparten einen Paradigmenwechsel hin zur kundenorientierten flexiblen Auftragsfertigung. Standardisierung auf eine optimal an Kundenbedürfnisse angepasste Variantenvielfalt steht im Vordergrund.¹⁸¹

Hohe Flexibilität in der Produktion ist zwar aus Kundensicht wünschenswert, in der Prozessindustrie aber erst selten umgesetzt, da ein schneller Produktionswechsel wegen der teilweise sehr hohen Rüst- und Reinigungsaufwände zum Teil schwierig ist.¹⁸² Ein typischer Zielkonflikt herrscht hier zwischen den Wünschen nach Produktvielfalt, Kundenzufriedenheit und der DLZ, der Fertigungsform sowie den Produktionskosten vor.

In der Feuerfestindustrie ist die Produktion einiger einfacher Produkte (Massen) recht flexibel gestaltet. Es gibt aber auch in dieser Branche bei der Herstellung einiger Produktvarianten wie z. B. gebrannter Steine oder schmelzgegossener Produkte Restriktionen im Materialfluss bzw. in der Produktion worauf nicht flexibel reagiert werden kann.

Der allgemeine Trend in der Produktion geht weg von produktionsgetriebenen qualitäts- und anwendungstechnischer Orientierung hin zur Marktorientierung und zu logistischen Erfolgsfaktoren wie Lieferzuverlässigkeit, Schnelligkeit und Kundenorientierung.¹⁸³ Die diskrete Fertigungsindustrie hat hinsichtlich des Trends zur Kundenorientierung mit dem Aufkommen des Mass Customizations, „die Fertigung kundenindividueller Güter zu einem Kostenniveau vergleichbarer Massengüter“¹⁸⁴, eine Lösung gefunden. Darin liegt bei der Prozessindustrie noch viel Handlungsbedarf.¹⁸⁵ Oft gibt es so gut wie keinen Spielraum bei der Volumenflexibilität. Ein Hauptmaterialfluss und einige kleine Nebenflüsse, die Aggregate mit zusätzlichen Rohstoffen versorgen bzw. Abfälle entsorgen, sind noch typische Kennzeichen vieler Branchen in der Stahl- und Feuerfestindustrie.

Einzweckanlagen, wie z. B. das Walzwerk, stellen oft das Engpassaggregat im Materialfluss dar¹⁸⁶ und damit den Mittelpunkt der Planungs- und Steuerungsaktivitäten im Materialfluss-

¹⁸¹Vgl. Deuse, Deckert (2006), S. 86

¹⁸² Vgl. Scheuerer (2001), S. 40, Deuse, Deckert (2006), S. 86f.

¹⁸³ Vgl. Scheuerer (2001), S. 40, Deuse, Deckert (2006), S. 86f.

¹⁸⁴ Piller (2006), S. 4

¹⁸⁵ Vgl. Scheuerer (2001), S. 40, Deuse, Deckert (2006), S.86f.

¹⁸⁶ Vgl. Oloff (2006), S. 64

system. Vorgeschaltete kontinuierliche Prozessschritte müssen von diesem Aggregat weg terminiert werden, um eventuelle Warte- oder Staulager zu vermeiden.

Puffer sind v. a. in der Stahlindustrie selten umsetzbar.¹⁸⁷ Aufgrund der Aggregatsgröße sind sie meist nicht realisierbar und verfahrenstechnisch ist es in den meisten Fällen nicht möglich den Produktionsprozess zu unterbrechen. Ausnahmen sind manchmal die so genannten Pfannenöfen, die kurzfristig Temperaturerhaltungen gewährleisten.¹⁸⁸

Der kontinuierliche Fließcharakter in der Feuerfestindustrie ist typischerweise nicht so stark ausgeprägt wie jener in der Stahlindustrie. In modernen Werken kommt es aber vor, dass es z. B. auch eine automatisierte Beschickung des Ofens gibt, sodass ab dem Mischer bis hin zum Lager ein kontinuierlicher Materialfluss besteht und kaum Pufferplatz vorhanden ist. Der Brennprozess im Tunnelofen ist z. B. auch ein kontinuierlich ablaufender Prozessschritt in der Feuerfestindustrie¹⁸⁹, der in seiner Umgebung selten Pufferplätze aufweist.

Aufgrund des Mangels an Pufferplätzen ist es umso wichtiger, dass die Produktion ohne Probleme läuft, d. h. dass eine hohe Prozessbeherrschung gegeben ist.

Die Kapitalintensität der Anlagen und die oft existierende Inflexibilität der Produktionsinfrastruktur führen dazu, dass Wartungen, Reinigungen, Umrüstvorgänge und andere vorhersehbare Stillstände exakt geplant und untereinander koordiniert werden müssen.¹⁹⁰ Zusätzlich sind Notfallkonzepte für ungeplante Ereignisse erforderlich. Der Stillstand einer einzelnen Einzeckanlage in einer kontinuierlichen Fertigung führt nach kurzer Zeit zu einem kompletten Stillstand der meisten Werksbereiche.

Die Instandhaltung ist vor allem in der Stahlindustrie oft geprägt durch die Anforderung an einen 24 h/ 7 Tage Betrieb mit Funktionen wie zyklische Wartung, Anlagenoptimierung, Störungsbeseitigung, Anlagenüberwachung.¹⁹¹ Grundsätzlich können zwei Strategien verfolgt werden: Bei der zentralen Instandhaltungsorganisation erfolgt eine klare Trennung (auch oft räumlich) zwischen Instandhaltung und Betrieb. Vorteil dieser Organisation kann die Kompetenzkonzentration in einer Einheit sein aber eine Verteilung der Instandhaltungsressourcen über das Werk erweist sich meist als flexibler. Bei der dezentralen Instandhaltungsorganisation fallen kürzere Wege an und ein besserer Informationsaustausch zwischen Produktions- und Instandhaltungspersonal ist gegeben, was sich wiederum positiv auf die Produktivität auswirkt. Dafür geht bei dieser Variante oft der konzeptionelle Überblick über die Instandhal-

¹⁸⁷ Vgl. Spengler et al. (2007), S. 53

¹⁸⁸ Vgl. Lungen, Steffen (2006), S. 584

¹⁸⁹ Vgl. Becker, F. (1999), S. 3

¹⁹⁰ Vgl. Fleischer et al. (2007), S. 61ff.

¹⁹¹ Vgl. Bökmann (2006), S. 80ff.

tung des gesamten Werkes verloren.¹⁹² Je größer und komplexer die Abläufe in einem Werk sind, desto wichtiger ist es den Überblick über die Vorgänge und benötigten Aufgaben zu bewahren, um Stillstände zu vermeiden, d. h. eine zentrale Instandhaltungspolitik ist zu bevorzugen.

Zur Steuerung des Materialflusssystemes kann nicht auf das klassische MRP II-Konzept, das die Einplanung von Puffern nutzt, zurückgegriffen werden.¹⁹³ Ein Einsatz verfahrensorientierter Konzepte zur Steuerung der Flüsse in der Produktion wird angewendet, wenn große Lose, eine Planung in die beschränkte Kapazität oder eine ausgeprägte kontinuierliche Fließfertigung im Vordergrund stehen.¹⁹⁴ Verfahrensorientierte Konzepte wie das Kampagnenprinzip sind durch MRP II ebenfalls nicht abgedeckt.¹⁹⁵

Die Anforderungen, die heutzutage in diesem Bereich an IT-Systeme gestellt werden sind sehr breit gefächert:

- Absicherung, dass alle Voraussetzungen zur Produktionsdurchführung vorhanden sind
- Absicherung einer gewissen Flexibilität des Produktionsprozesses
- Unterstützung von Maßnahmen zu Einhaltung der Liefertermine
- Verringerung der DLZ sowie der Bestände
- Angebot von Optimierungsmethoden
- Ausgleich von Störungsgeschehen
- Bereitstellung von Funktionen zur Sicherung der Qualität bei Produkt und Prozess etc.¹⁹⁶

Der Trend geht deshalb in Richtung der verteilten Intelligenz und zu übergeordneten Plattformen, der so genannten „Manufacturing Intelligence“, die durch transparente Darstellung und Aufbereitung von Informationen eine zeitnahe Entscheidungsbasis für den Unternehmer bereitstellen. Frühwarnindikatoren helfen gezielt, die Effizienzlücken aufzuspüren und nicht wertschöpfende Tätigkeiten, Qualitätsmängel, Vergeudung etc. zu erkennen.¹⁹⁷

Regeln und Logik von IT-Lösungen, die Übersicht, Unterstützung bei Entscheidungen etc. bieten, sind nicht standardisierbar sondern hängen vom Produktionsprozess und vom Werk ab.¹⁹⁸ Eine Software muss sich den Regeln der Materialflüsse anpassen. Da die Anforderungen in den einzelnen Werken der Stahl- und Feuerfestindustrie sehr spezifisch sind, ist oft eine Modifikation dieser Softwaretools zur (Materialfluss-)Steuerung erforderlich.

Durch die heterogenen Merkmale der einzelnen Sparten hat sich kein einheitlicher Standard im Logistikmanagement durchgesetzt und eine standardisierte Software ist aufgrund der

¹⁹² Vgl. Fleischer et al. (2007), S. 62

¹⁹³ Vgl. Schönsleben (2000), S. 284

¹⁹⁴ Vgl. Schönsleben (2000), S. 277f.

¹⁹⁵ Vgl. Schönsleben (2000), S. 284ff.

¹⁹⁶ Vgl. Winterhalder (2006), S. 63f.

¹⁹⁷ Vgl. Hansen (2006), S. 70

¹⁹⁸ Vgl. Oloff (2005), S. 65f.

individuellen Anforderungen (noch) nicht umsetzbar. „Methoden und Werkzeuge für die Produktionsplanung entsprechen hauptsächlich den Bedürfnissen der diskreten Fertigung“.¹⁹⁹ Somit bleibt für die meisten Unternehmen nur die Entwicklung eigener Programme bzw. die Modifizierung von Software zur Steuerung ihres Materialflusses. Zu diesem Problem meint auch Schönsleben²⁰⁰, „dass noch viel wissenschaftliche Arbeit geleistet werden muss“.²⁰¹

Kosten beim IT-Support können in einem Unternehmen mit mehreren Standorten durch die Standardisierung der Steuerung der Geschäftsprozesse eingespart werden. Beim Zukauf weiterer Komponenten und Lizenzen können diese Unternehmen zusätzlich von den Größenvorteilen der Standardlösung profitieren. So können z. B. benötigte Rohstoffe über Kontinente hinweg gesteuert und verwaltet werden.²⁰²

In der Stahlindustrie liegt oft ein hoher Automatisierungsgrad vor. Als Resultat ist der Personaleinsatz somit meist gering. Winterhalder²⁰³ weist auf eine Verschiebung der Kostenstruktur in der Stahlindustrie durch eine sinkende Personalanzahl und so Personalkosten und andererseits steigende Energie- (durch mehr IT-Einsatz) und Rohstoffkosten hin. Diese Beobachtung lässt sich auch in der Feuerfestindustrie wahrnehmen.

Nicht jede Erhöhung der Rohstoffkosten kann durch höhere Verkaufspreise kompensiert werden. Dies bedeutet, dass das Unternehmen diese zusätzlichen Kosten durch geringere Gewinne oder Einsparungen in anderen Bereichen ausgleichen muss.²⁰⁴ Daher ist u. a. die Prozessstabilität ein wichtiger Faktor, um wirtschaftlich zu arbeiten.

Eine weitere logistische Herausforderung im Materialfluss liegt vor, wenn eine Charge oder Kampagne nicht den entsprechenden Qualitätsanforderungen entspricht. In der Stahl- und Feuerfestindustrie wird üblicherweise entweder die ganze Kampagne auf eine geringere Qualität eingestuft oder einem anderen Verwendungszweck gewidmet, z. B. werden die Produkte als Zuschläge einem vorangegangenen Prozessschritt wieder zugeführt. „Das Spektrum reicht vom Verschrotten über Umbinden des Auftrages bis hin zu neuen Vorgaben für die Nachfolgeprozesse“²⁰⁵. Dadurch können Kreisläufe in der Produktion entstehen. In den meisten Fällen muss die gesamte Charge einer anderen Verwendung zugeführt werden. Teilweise kann eine Nachbehandlung in gewissen Zweigen der Prozessindustrie, wie der Feuerfestindustrie,

¹⁹⁹ Loos, Allweyer (1998), S. 199

²⁰⁰ Schönsleben (2005), S. 277

²⁰¹ Hierzu vergleiche auch Heidrich (2004), Stobbe et al. (2000), West et al. (1999)

²⁰² Vgl. Helmle (2006), S. 67f.

²⁰³ Vgl. Winterhalder (2006), S. 62

²⁰⁴ Vgl. Fleischer et al. (2007), S. 55

²⁰⁵ Bürvenich, Hensel (2004), S. 69

noch einen Anteil an der Kampagne retten. Nelson²⁰⁶ meint dazu, dass die Prozessindustrie für eine minderwertige Charge üblicherweise nur die Verschrottung vorsieht.

Im Bereich der Stahl- und Feuerfestindustrie wird dieses Art des Vorgehens aber zu verhindern versucht. Qualität sollte sowohl prozesseitig z. B. durch kontinuierliche Überwachung als auch produktseitig durch z. B. mehrfache Kontrolle der chemischen Zusammensetzung geprüft werden.²⁰⁷

Zur Einhaltung der in viele Ländern gesetzlich festgelegten CO₂ Emissionen bieten sich u. a. folgende technisch realisierbare Möglichkeiten: Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz durch Wirkungsgrad- und Ausbringungssteigerung, Optimierung und Verkürzung von Prozessketten, Stoffstromoptimierung durch Nutzung von Kuppelenergien (Prozessgase, Abwärme, Abhitzedampf), Schließung von Stoffkreisläufen.²⁰⁸ Damit kann es zu Änderungen im System kommen, wie z. B. zu neuen Steuerungsaufgaben im Materialfluss durch Rückgriff auf alternative Rohstoffe bei deren Einsatz weniger CO₂ Emissionen frei werden.

Beim Einsatz von Stahlschrott für die Stahlherstellung werden nicht nur Primärrohstoffe ersetzt, sondern auch fast 75% weniger Energie als bei Einsatz von Primärrohstoffen benötigt und damit die CO₂-Emissionen in entsprechendem Umfang reduziert.²⁰⁹

3.4.3 Herausforderungen im Materialfluss der Distribution

Da Prozessgüter oft hohe Gewichte und meist spezielle, sehr voluminöse Formate aufweisen, gestaltet sich die Abwicklung der Materialflüsse in der Distribution oft anspruchsvoll. Transportkosten werden daher zum entscheidenden Faktor bei der Wahl des Distributionsweges. Transporte von Massen- bzw. Standardwaren werden teilweise nur bis zu bestimmten Entfernungen umgesetzt²¹⁰, da der Erlös sonst die Transportkosten übersteigen würde.

Ursprünglich charakterisiert als Industrie mit hoher Lagerfertigung²¹¹, tendiert die Stahl- und Feuerfestindustrie, wie bereits erwähnt, immer mehr in Richtung kundenauftragsbezogene Fertigung. Daraus folgt, dass auch die Lagerhaltung von Fertigbeständen rückläufig ist und sich für die Distributionslogistik eine unverzügliche Auslieferung nach Fertigstellung ergibt.²¹² Somit ist eine genaue zeitliche Taktung zwischen den Materialflüssen der Produktion und der Distribution erforderlich.

²⁰⁶ Vgl. Nelson (1983), S. 18f.

²⁰⁷ Vgl. Deuse, Deckert (2006), S. 86

²⁰⁸ Vgl. Lungen, Steffen (2006), S. 589

²⁰⁹ Willeke (2006), S. 83

²¹⁰ Vgl. Köhler (2004), S. 88ff., Mehta (2004), S. 98f., Wagner (2007), S. 85

²¹¹ Keck (1994), S. 33

²¹² Vgl. Anschütz, Friedrich (2002), S. 45ff.

Zur Verkürzung von Lieferzeiten geht der Trend verstärkt in Richtung unternehmensübergreifende Systeme zur Steuerung der Material- und Warenflüsse.²¹³ Ein optimales Schnittstellenmanagement und Transparenz in der Supply Chain sind ein wirksames Mittel zur effizienten Planung und Steuerung der Materialflüsse.

In Europa steht v. a. der Transport auf dem Prüfstand, da wegen der historischen Netzwerke zu viele Lagerhäuser vorgehalten werden. Diese Netzwerke müssen überdacht und neu organisiert werden.²¹⁴

Die Internationalisierung in der Distribution führt zu mehr strategischen Partnerschaften in der Stahlbranche. Die Konsolidierung der Stahlindustrie zwingt die Distribution zum Wachstum, d. h. zu einem Ausbau in der Fläche, einer Optimierung der IT-Strukturen und mehr Kundennähe.²¹⁵

3.4.4 Herausforderungen im Materialfluss der Entsorgung

In der Stahl- und Feuerfestindustrie können viele anfallende Nebenprodukte, Abfälle, Schnittreste etc. wieder verwendet werden. Durch die Probleme bei der Rohstoffbeschaffung greifen immer mehr Unternehmen auf Sekundärrohstoffe zurück, welche teilweise ohne Aufbereitung bei bestimmten Prozessen wieder eingesetzt werden können. Dadurch könnten zyklische Materialflüsse in der Produktion entstehen und die Planung und Steuerung erschweren.

Die EU Abfallverbringungsverordnung schränkt wirtschaftliche relevante Stoffströme in Europa und auch mit Nicht-OECD-Staaten durch bürokratische Hürden erheblich ein und gefährdet damit die seit Jahren bestehenden und funktionierenden Handelsketten unter Beteiligung der überwiegend mittelständischen Recyclingbranche.²¹⁶

Bei der verfahrensorientierten Fertigung fallen hauptsächlich ungeformte Güter wie Gase, Schüttgüter oder Flüssigkeiten an. Dies bedeutet, dass ebenso wie in der Beschaffung, der Produktion und der Distribution, auch in der Entsorgung häufig spezielle Behältnisse verwendet werden müssen. Die Aufbereitung bzw. Entsorgung ist meist ausgelagert da eine Koordination innerbetrieblich aufgrund fehlender Infrastruktur oft nicht möglich ist.

Zusammengefasst wurde eine Analyse der logistischen Herausforderungen in der Stahl- und Feuerfestindustrie durchgeführt und dadurch die komplexen Vorgänge und Abläufe in dieser Sparte erörtert. Die Stahl- und Feuerfestindustrie steht vor großen logistischen Herausforderungen, v. a. in der Produktion, die immer kundenspezifischer abläuft bzw. abzulaufen hat,

²¹³ Vgl. Ameling (2006), S. 57

²¹⁴ Vgl. Handelsblatt Jahrestagung Stahlmarkt 2007 (2007), S. 111

²¹⁵ Vgl. Handelsblatt Jahrestagung Stahlmarkt 2007 (2007), S. 111

²¹⁶ Vgl. Willeke (2007), S. 75

um in der fortschreitenden Globalisierung konkurrenzfähig zu bleiben. Bei Arcelor (Stahlproduzent) sind „35% der Produkte bereits spezialisierte Stahlprodukte, der Rest ist commodity“.²¹⁷ Auch der Kostendruck durch steigende Energie- und Rohstoffpreise treibt die Branchen an, Innovationen, wie z. B. die Erweiterung der eigenen Kompetenz auf neue Rohstoffquellen bzw. der Einsatz neuer Rohstoffe²¹⁸, zu fördern. Effiziente Tools bzw. Methoden zur Reduktion des großen Planungs- und Steuerungsaufwandes der Abläufe in diesen Branchen sind erforderlich. Es wurden einige Punkte aufgezeigt die in Hinblick auf die Bestimmung der Komplexitätsmerkmale und -arten in Kapitel 4 Ansätze liefern. In den anschließenden Abschnitten sollen nun Möglichkeiten aufgezeigt werden, um eine positive Beeinflussung der Steuerungs- und Planungsschwierigkeiten in den Materialflüssen der Stahl- und Feuerfestindustrie zu bewirken.

Je mehr unterschiedliche Materialflüsse in einem System vorhanden sind, desto schwieriger ist eine optimale Planung, Steuerung, Koordination und desto wichtiger ist u. a. die Gewährleistung einer Transparenz in den Materialflusssystemen, um die Übersicht über die Abläufe zu behalten. Einige Regeln bzw. Grundsätze zur Vereinfachung der Flusstruktur und -steuerung können Ansatzpunkte zur Reduktion der logistischen Herausforderungen und der Komplexität und den damit verbundenen Kosten (Kapitel 4) in Materialflüssen ergeben. Daher befasst sich nun der nächste Abschnitt mit allgemeinen Regeln zur Materialflussvereinfachung in der Produktion, welche für die Stahl- und Feuerfestindustrie auf Ihren Nutzen hin erörtert werden sollen.

3.5 Regeln zur Vereinfachung von Flüssen in der Stahl- und Feuerfestindustrie

Es gibt viele theoretische Ansätze zur Materialflussoptimierung v. a. für die Stückgutindustrie. Einige Grundsätze und Regeln zur Vereinfachung der Flusstruktur und -steuerung aus der Literatur sollen auf mögliche nützliche Maßnahmen für das Materialflussmanagement in der Stahl- und Feuerfestindustrie untersucht werden. Die meisten dieser Regeln wurden im Hinblick auf die Stückgutindustrie aufgestellt, sodass insbesondere deren Umsetzbarkeit in der Stahl- und Feuerfestindustrie diskutiert werden muss.

3.5.1 Vereinfachung von Materialflüssen nach Towill

Towill²¹⁹ entwickelte einige Regeln zur Vereinfachung von Materialflüssen im Unternehmen und in der Supply Chain. Diese Richtlinien basieren auf theoretischer und praktischer Grund-

²¹⁷ Beyerle (2006), S. S125

²¹⁸ Vgl. Martens (2006), S. 83

²¹⁹ Vgl. Towill (1999), S. 10f.

lagenarbeit im Feld des Materialflussmanagements nach Forrester²²⁰ und Burbidge²²¹ und sollen im Bezug auf die Stahl- und Feuerfestindustrie betrachtet werden.

Als Grundlage für die ersten Regeln nach Towill²²² dienen die „five golden rules to avoid bankruptcy“ nach Burbidge²²³, deren Ziel die Reduktion von Lagerbeständen und WIP ist. Burbidge²²⁴ entwickelte diese fünf Regeln weiter zu „Gesetzen“ für Fertigungssysteme, welche ebenfalls Einfluss auf die Richtlinien zur Materialflussvereinfachung nach Towill hatten. Diese Gesetzmäßigkeiten nach Burbidge behandeln die Gestalt des Produktionssystems, den Materialfluss in Verbindung mit Komplexität, die Vorhersagbarkeit von Bedarfen, die Dynamik im System, den Bestellzyklus und die Vernetzung aller Teile eines Fertigungssystems (siehe Tabelle 3)

Gesetz	Kernaussage
“The law of Gestalt“	Das Ganze ist nicht die Summe seiner Teile, eine Menge an Suboptima kann nie ein richtiges Optima erzeugen
“The law of material flow“	Die Effizienz eines Produktionssystems ist indirekt proportional zur Komplexität des Materialflusssystemes
“The law of prescience“	Menschen besitzen nicht die Fähigkeit, die Zukunft zu prognostizieren
“The law of industrial dynamics“	Falls die Nachfrage über mehrere Stufen übertragen wird, steigt die Amplitude der Nachfragevariationen mit jedem Transfer an.
“The ordering cycle law“	Werden die Komponenten zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestellt und produziert, verursacht dies eine hohe Amplitude und unvorhersagbare Variationen im Bestand und in der Auslastung.
“The law of connectance“	Eine Veränderung in einer Variablen des Produktionssystems führt zu einer Änderung in mindestens einem anderen Parameter.

Tabelle 3: Die sechs Gesetze der Fertigungssysteme²²⁵

Towill hat diese Erkenntnisse für seine Überlegungen zur Materialflussvereinfachung herangezogen. So zeigt das „Law of connectance“ dem Betrachter auf, dass die Systeme zuerst verstanden werden müssen, bevor Änderungen durchführbar sind, um alle Auswirkungen der Veränderung im System auch abschätzen zu können. Diese Überlegung setzt er, z. B. für die Supply Chain angewendet, in seiner neunten Regel um. Er entwickelte insgesamt 12 generelle Regeln (Tabelle 4), deren Umsetzbarkeit zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und

²²⁰ Vgl. Forrester (1961)

²²¹ Vgl. Burbidge (1962)

²²² Vgl. Towill (1999), S. 10f.

²²³ Vgl. Burbidge (1983), S. 13

²²⁴ Vgl. Burbidge (1985), S. 20ff.

²²⁵ Vgl. Burbidge (1985), S. 20ff.

-steuerung in der Stahl- und Feuerfestindustrie an dieser Stelle nun der Reihe nach diskutiert werden soll. Wahrscheinlich können einige dieser Regeln in der Stahl- und Feuerfestindustrie angewendet werden, wobei aber auch mehrere Vorschläge zur Flussvereinfachung aufgrund der Gegebenheiten in diesen Branchen nur eingeschränkt oder gar nicht umsetzbar sein werden.

Twelve Rules for Simplifying Material Flow	
Rule 1	Only make products which you can quickly despatch and invoice to customers
Rule 2	Only make in one period those components you need for assembly in the next period
Rule 3	Minimise the material throughput time, i. e. compress all lead times
Rule 4	Use the shortest planning period, i. e. the smallest run quantity which can be managed efficiently
Rule 5	Only take deliveries from suppliers in small batches as and when needed for processing or assembly
Rule 6	Synchronise "Time Buckets" throughout the Supply Chain
Rule 7	Form natural clusters of products and design processes appropriate to each value stream
Rule 8	Eliminate all process uncertainties
Rule 9	Understand, document, simplify and only then optimise (UDSO) the supply chain
Rule 10	Streamline and make highly visible all information flows
Rule 11	Use only proven simple but robust Decision Support Systems (DSS)
Rule 12	The business process target is the seamless supply chain i. e. all players "think and act as one"

Tabelle 4: Regeln zur Vereinfachung des Flusses²²⁶

Die erste Regel zur Materialflussvereinfachung, welche die Herstellung von Produkten mit einer raschen Abfertigung bezüglich Auslieferung und Verrechnung empfiehlt, zielt vor allem auf niedrige Bestände im Lager und in der Produktion ab. Damit verbunden ist auch ein geringes Umlaufvermögen, geringe Kapitalbindung, geringes Bestandsrisiko und durch die Möglichkeit der raschen Verrechnung eine kurze cash-to-cash cycle time. In der Stahl- und Feuerfestindustrie gibt es ein sehr großes Umlaufvermögen aufgrund der oft großen Kampagnen bzw. Chargen. Daher ist es umso wichtiger möglichst schnell Produkte auszuliefern und zu verrechnen, um auch die Kapitalbindung zu reduzieren. Für wenige Produktvarianten in der Stahl- und Feuerfestindustrie lässt sich eine rasche Abfertigung umsetzen, aber sicher nicht für die Masse aller angebotenen Erzeugnisse.

Auch die nächste Regel ist auf die Stahl- und Feuerfestindustrie nur sehr eingeschränkt umlegbar, da es sich zu einem großen Teil um eine kontinuierliche Fertigung handelt und keine

²²⁶ Quelle: Towill (1999), S. 11

Produktion mit mehreren Montageebenen. Durch die Charakteristik und Bedingungen des Materialflusses des gewählten Branchenclusters ist eine zeitliche Taktung bei der Herstellung einzelner Produkte nicht möglich. Diese Regel ist v. a. in der Stückgutindustrie anwendbar.

Für die einzelnen Prozesse in den meisten Werken der Stahl- und Feuerfestindustrie gibt es verfahrenstechnische Vorgabezeiten, die eingehalten werden müssen, sonst könnte die Qualität des Produktes in Mitleidenschaft gezogen werden. Der kontinuierliche Charakter der Fertigung von Hochofen bis zur Adjustage (Stahlwerk) bzw. auch vom Mischer bis zum Lager (Feuerfestwerk) bedingt geringe Leerzeiten. Meisten führen nur ungeplante bzw. geplante Stillstände (Instandhaltung) und technologisch bedingte Wartezeiten zu einer Erhöhung der Durchlaufzeit. In diesem Bereich gibt es kaum einen Spielraum, um die DLZ zu minimieren (Regel drei).

Eine möglichst kurze Planungsperiode (Regel vier) vermindert die Wahrscheinlichkeit von Unsicherheiten im Prozess etc. Je kleiner die Losgröße gewählt wird, desto schneller können die einzelnen Lose durch die Produktion geschleust werden, falls nicht viele Umrüstvorgänge anfallen. Diese Überlegungen können aber auch nicht ohne weiteres auf die Stahl- und Feuerfestindustrie übertragen werden, da eine kurzfristige Planung schon allein wegen des sehr langen Beschaffungsvorganges unmöglich gemacht wird und die Losgröße, in der Prozessindustrie Kampagne oder Charge genannt, oftmals von der Kapazität der Aggregate und der bestellten Stahlgüte aufgrund von Kostenüberlegungen bestimmt wird. Diese Regel ist daher vor allem auf Branchen der Stückgutindustrie anwendbar, welche starken Nachfrageschwankungen unterliegen und eine geringe Sortimentsbreite aufweisen.

Der Einkauf von Rohstoffen in geringen Mengen bei Bedarf (Regel fünf) ist aufgrund des beschriebenen Beschaffungsprozesses in der Stahl- und Feuerfestindustrie bei den meisten Rohstoffen nicht möglich. Der Beschaffungsprozess dauert meistens sehr lange und die Mengen an Rohstoffen, die in der Produktion gebraucht werden, sind sehr groß.

Hinzu kommt, dass aufgrund der Marktverhältnisse die Möglichkeit zur Einflussnahme seitens des produzierenden Unternehmens auf den Einkauf und die Beschaffung oft gering ist.²²⁷

Eine synchronisierte Supply Chain (Regel sechs) hilft in jeder Branche u. a. Lagerbestände, Nachfrageschwankungen (Bullwhip-Effekt²²⁸) oder die Produktionsprogrammplanung zu erleichtern. Die Umsetzung in der Praxis erweist sich aber oft als schwierig. Die weltweit agierende Stahl- und Feuerfestindustrie ist Teil eines vielstufigen Supply Chain Netzwerkes, welches aus vielen Partnern (Lieferanten, Sublieferanten, Kunden etc.) in vielen Ländern be-

²²⁷ Vgl. Gronwald; Uhlig (2006), S. 21ff.

²²⁸ Vgl. Forrester (1961)

steht, deren Synchronisierung einige Schwierigkeiten mit sich bringt. Hinzu kommt, dass in vielen Branchen die fokale (die Supply Chain bestimmende) Unternehmung, nicht auf der Produktionsstufe des Stahl- bzw. Feuerfestunternehmens liegt, wodurch die Handlungsmöglichkeiten zusätzlich einschränkt werden.

Regel Nummer sieben schlägt eine Produktbündelung mit passender Prozessabstimmung vor. In der Stahl- und Feuerfestindustrie ist dieser Ansatz weit verbreitet, da u. a. versucht wird, das Fassungsvermögen der Aggregate möglichst gut auszulasten, Rüstzeiten zu sparen oder Reihenfolge-Probleme zu reduzieren. Daher wird versucht, die einzelnen Produkte zu so genannten Rüstfamilien bzw. Kampagnen zusammenzufassen.

Durch die bereits angesprochene, mit großem Aufwand betriebene Produktionsplanung und -steuerung in der Stahl- und Feuerfestindustrie, weisen die meisten Unternehmen einen Produktionsablauf auf, der nur geringen Unsicherheiten unterliegt. Da viele Probleme in der Produktion mit langen Stillständen und hohen Kosten verbunden sind, wird darauf geachtet, dass die Regel acht nach Towill²²⁹ im Betrieb umgesetzt ist, um jegliche Störung der Materialflussabläufe zu vermeiden. Damit steht auch die nächste Regel in Verbindung deren Aussage generell für alle Industriesparten Gültigkeit hat und Anwendung finden sollte. Optimierungsmaßnahmen sollten erst eingeleitet werden, wenn alle wesentlichen Zusammenhänge und Einflüsse in der Supply Chain verstanden sind. Andernfalls könnten schon kleine Änderungen große, unvorhergesehene Wirkungen auslösen. Dies ist eine typische Eigenschaft komplexer Systeme, auf die im nachfolgenden Kapitel noch näher eingegangen wird.

Transparente, geglättete Informationsflüsse sind wichtige Voraussetzung für die Koordination, Steuerung und Synchronisation von Materialflüssen. Eine Umsetzung dieser Regel ist für jede Industriesparte wünschenswert, aber mit gewissen Aufwand und Engagement der einzelnen Supply Chain Glieder, Abteilungen, Mitarbeiter etc. verbunden. Durch die größtenteils zentralen Informationssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie ist die Transparenz und schnelle Reaktionsfähigkeit in einzelnen Bereichen der Produktion oft nicht gegeben. Eidenmüller²³⁰ sagt hierzu, dass die Informationsversorgung oft durch die schlechte Verfügbarkeit wichtiger Informationen an den entscheidenden Stellen und gleichzeitig durch eine Datenflut, die den Informationsfluss eher behindern als beschleunigen, gekennzeichnet ist. Der Grund liegt bei aufwendigen Überwachungsfunktionen, Bringprinzip statt Bedarfsorientierung bei Informationen, starren Ablaufzyklen etc.

²²⁹ Vgl. Towill (1999), S. 10f.

²³⁰ Vgl. Eidenmüller (1995), S. 169ff.

Um eine Flussoptimierung zu gewährleisten, müssen folgende Fragen zu Informationssystemen quantifiziert werden:²³¹

- Wer benötigt welche Information für welchen Zweck?
- Wer erstellt oder verändert welche Information?
- Wie schnell werden welche Informationen benötigt?
- Wie aktuell müssen diese sein?
- Welche Datenmengen müssen bewältigt werden?

Um den Materialfluss für die Abläufe in der Stahl- und Feuerfestindustrie effizient planen und steuern zu können, müssen diese Fragen eindeutig geklärt sein.

Wie erwähnt, sind Standard-Entscheidungsfindungssysteme oft ungeeignet, da diese meist die spezifischen Gegebenheiten in der Beschaffung, Produktion, Distribution etc. nicht abbilden können. Die Stahl- und Feuerfestindustrie hat viele „selbst“ entwickelte Programme, die auf die einzelnen Abteilungen, Bereiche bzw. Tätigkeitsfelder abgestimmt sind. Die Umsetzung der 11. Regel im operativen Bereich ist wichtig für die Stahl- und Feuerfestindustrie aufgrund der komplexen Produktionsprozesse in denen sich Störungen bzw. Fehlentscheidungen gravierend auswirken können. Die eigenen Softwarelösungen sollten auf ihre Robustheit und Validität getestet werden, so dass keine Probleme bei der realen Materialflussteuerung auftreten.

Die letzte Regel zur Vereinfachung von Materialflüssen, Erhöhung der Transparenz und der nahtlose Fluss in der Supply Chain, d. h. alle Beteiligten denken und handeln wie eine, ist eine erstrebenswerte Charakteristika einer Lieferkette, um rentabel, flexibel, effektiv etc. wirtschaften zu können, muss aber sehr kritisch betrachtet werden. In der Praxis wird diese Regel nahezu nie realisierbar sein. In den komplexen Netzwerken, wie in der Stahl- und Feuerfestindustrie, verfolgen die Partner eigene Ziele, und handeln auch nach diesen, z. B. werden eigene Wettbewerbsvorteile auszunutzen versucht. Da aber „Transparenz eine Grundvoraussetzung zur Erschließung von Verbesserungspotentialen ist“²³² schaden solche Aktionen langfristig gesehen allen Gliedern der Supply Chain.

Childerhouse und Towill²³³ haben in einer empirischen Untersuchung 32 europäische Supply Chains (wobei keine näheren Angaben zu den daran beteiligten Industriepartnern gemacht wurden) betrachtet und u. a. die Häufigkeit (in durchschnittlichen Prozentsätzen) ermittelt inwieweit die 12 Regeln nach Towill in diesen Unternehmensnetzwerken umgesetzt werden (Abbildung 17).

²³¹ Vgl. Eidenmüller (1995), S. 173

²³² Deuse, Deckert (2006), S. 86

²³³ Vgl. Childerhouse, Towill (2002), S. 17ff.

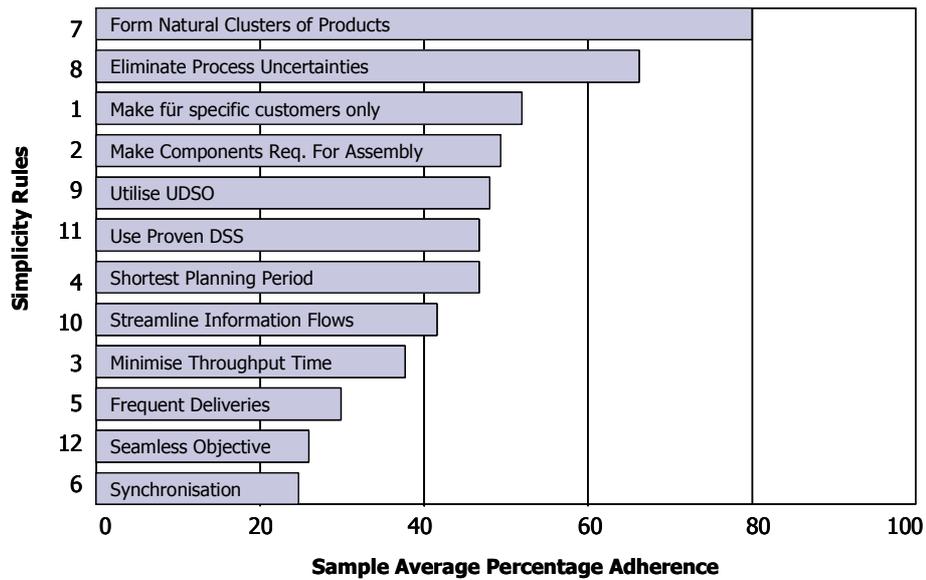


Abbildung 17: Die durchschnittlichen Prozentsätze der Umsetzung der 12 Regeln in der Praxis²³⁴

Die Praxis zeigt, dass wie bereits erwähnt, eine Synchronisation der Abläufe und die Schaffung von Transparenz in der Supply Chain schwierig sind und daher von vielen Unternehmen nicht verfolgt werden. Regel sechs und zwölf findet man am unteren Ende der umgesetzten Regeln.

Die Produktbündelung (in 80% der Unternehmen umgesetzt und die Schaffung eines unge störten Produktionsablaufes (67% aller Unternehmen befolgen Regel acht) stellen die Spitzenreiter in der Untersuchung dar. Beide Gesetzmäßigkeiten sind auch für die Stahl- und Feuerfestindustrie von entscheidender Wichtigkeit.

In einem großen Mittelfeld mit ca. 50% Umsetzung in Unternehmen finden sich die Pull-Steuerung, geprüfte DSS etc. (Regel eins, zwei, neun, elf und vier).

Zusammengefasst lassen sich für die Stahl- und Feuerfestindustrie die in Abbildung 18 angeführte Reihenfolge der einzelnen Regeln nach ihrer Wichtigkeit und Umsetzungsmöglichkeit gliedern, wobei die Regeln eins, zwei, vier, und fünf nicht berücksichtigt werden, da diese für die Stahl- und Feuerfestindustrie oft nicht anwendbar sind. Eine Einschränkung des Gültigkeitsbereiches der Regeln nach Towill für die Stahl- und Feuerfestindustrie ist dadurch geschaffen, aber auch mögliche Ansatzpunkte zur Materialflussvereinfachung gefunden.

²³⁴ Quelle: Childerhouse, Towill (2002), S. 23



Abbildung 18: Reihung der 12 Regeln nach Towill für die Stahl- und Feuerfestindustrie

Die Regeln nach Towill sollen im nächsten Abschnitt durch weitere mögliche Maßnahmen zur Vereinfachung von Flüssen ergänzt werden.

3.5.2 Die Umsetzbarkeit genereller Optimierungsregeln für den Materialfluss in der Stahl- und Feuerfestindustrie

Einige weitere Regeln bzw. Grundsätze haben Gollwitzer, Karl²³⁵, Eidenmüller²³⁶ und Schenk, Wirth²³⁷ für das Gestaltungsfeld des Logistikcontrollings, der Flussoptimierung, der effizienten Fabrikplanung etc. aufgestellt, aus welchen sich generelle Regeln zur Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung (Abbildung 19 bis Abbildung 23), ohne Fokus auf eine bestimmte Branche, Industrie etc., ableiten lassen. Diese sollen nun für die Stahl- und Feuerfestindustrie auf ihre Umsetzbarkeit und ihren Nutzen erläutert werden.

„Produkte, Prozesse, Strukturen und Informationen sind so einfach wie möglich zu gestalten“.²³⁸ Die einfache Produktgestaltung wirkt sich meist positiv auf die Materialflussstrukturen und Prozesse im Unternehmen aus. Aus umgruppierenden Materialflussverläufen können einfache z. B. lineare Flussverläufe entstehen. In der Stahl- und Feuerfestindustrie hat man u. a. aufgrund der vorgegebenen Eigenschaften der Produkte und der gewünschten Formate der weiterverarbeitenden Industrie bzw. der Endkunden aber oft nur einen geringen Spielraum bei der Produktgestaltung. In diesem Zusammenhang steht auch die Varianten- und Teilevielfaltreduktion. Durch eine solche Reduktion werden die möglichen Materialflussverläufe eingeschränkt und der Steuerungs- und Dispositionsaufwand verringert. Weitere positive Begleiterscheinungen sind geringere Kosten bei der Planung, Disposition, Verwaltung, Lagerung etc. der einzelnen Varianten und Teile. Durch eine Produktportfoliomatrix bzw. eine ABC Analyse lassen sich unrentable Varianten schnell identifizieren.

²³⁵ Vgl. Gollwitzer, Karl (1998), S. 181ff.

²³⁶ Vgl. Eidenmüller (1995), S. 89f., S. 108f., S. 119f.

²³⁷ Vgl. Schenk, Wirth (2004), S. 13ff.

²³⁸ Gollwitzer (1998), S. 184

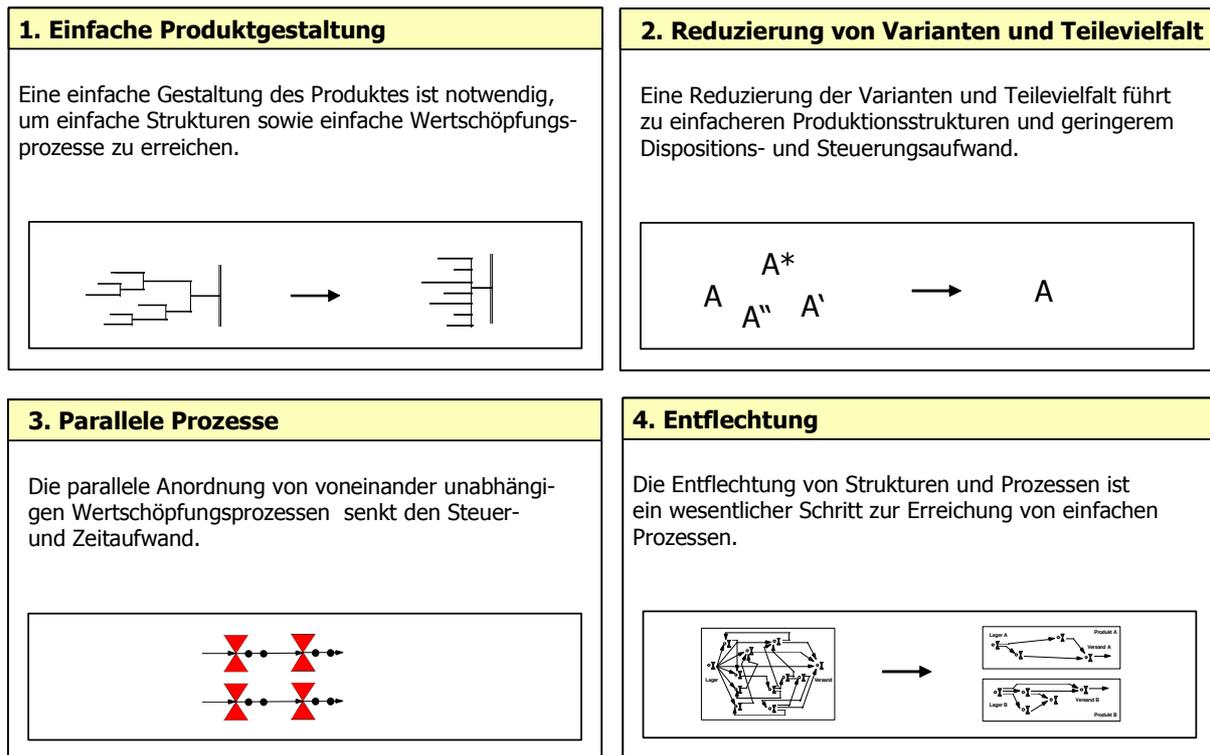


Abbildung 19: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung I²³⁹

Eine Parallelisierung von einander unabhängigen Produktionsabläufen wäre wünschenswert, um bei eventuellen Stillständen bzw. Störungen auf benachbarte Aggregate ausweichen zu können oder linearisierte Fertigungsreihen für bestimmte Produktgruppen zu schaffen. Durch die sehr voluminösen Aggregate und die hohen Anschaffungskosten ist dieser Grundsatz in der Stahl- und Feuerfestindustrie in einigen Bereichen der Produktion aber oft nicht anwendbar.

Die vierte Regel bezieht sich auf eine Entflechtung der Prozesse. Die Umsetzung dieses Grundsatzes ist in der Stahl- und Feuerfestindustrie aufgrund z. B. verfahrenstechnischer Gegebenheiten, wie des teilweise kontinuierlichen Charakters der Produktion, oftmals mit Problemen verbunden. Die Realisierung der ersten drei Regeln, vereinfachte Produktgestaltung, Variantenreduktion und Parallelisierung könnte jedoch als Basis für die Verwirklichung dieses Grundsatzes dienen. „Fertigungssegmentierung ist dann eine sinnvolle Strategie, wenn in großem Maße Verflechtungen von Erzeugnissen mit unterschiedlichen Zielstrukturen bestehen und wenn vom Markt hohe Anforderungen an Flexibilität, Reaktionsfähigkeit und Schnelligkeit der Produktion gestellt werden“.²⁴⁰ Hohe Termintreue und kurze DLZ gewinnen vor dem Hintergrund gestiegener Kundenanforderungen zunehmend an Bedeutung in der

²³⁹ In Anlehnung: Gollwitzer, Karl (1998), S. 181ff., Eidenmüller (1995), S. 89f., S. 108f., S. 119f., Schenk, Wirth (2004), S. 13ff.

²⁴⁰ Eidenmüller (1995), S. 108

Stahl- und Feuerfestindustrie. Daher sollte eine Fertigungssegmentierung auch in diesen Branchen angedacht werden, wenn die Grundvoraussetzungen dafür geschaffen werden können.

Industrielle Großorganisationen können z. B. durch Fertigungssegmentierung übersichtlicher gestaltet werden, die Verantwortung kann besser zugeordnet werden, die Kommunikationsstrukturen sind direkter und effektiver und das Steuerungsproblem mit seiner Komplexität wird durch diese Dezentralisierung drastisch reduziert.²⁴¹

Die ereignisorientierte Steuerung, oder auch Pull- Prinzip genannt, führt meistens zu einem geringeren Steuerungsaufwand durch eine dezentrale Planung und Steuerung der Material- und Informationsflüsse. Günther und Tempelmeier führen auch an, dass in der zentralen Steuerungsform (Push-Steuerung) die Bestände unkontrolliert und oft (zu) hoch sind.²⁴² Man hat keine schlanke bzw. „lean“ genannte Produktionskette wie in der Pull-Steuerung. Eine Implementierung einer reinen Pull- Steuerung in der Stahl- und Feuerfestindustrie ist aber aufgrund z. B. der technologischen Gegebenheiten beim Hochofen praktisch sehr begrenzt umsetzbar (Regel fünf) und insofern kaum zielführend.

Die Festlegung von eindeutigen Zuständigkeiten spielt in allen Industriesparten eine wichtige Rolle, um u. a. ein effektives Personal-, Prozess- und Informationsmanagement betreiben zu können. So ist es z. B. im Falle einer Störung wichtig zu wissen, wer für was zuständig ist, um Fehler schnell zu beheben. Dieser Grundsatz sollte in der gesamten Prozessindustrie befolgt werden.

Die Standardisierung führt durch eine Reduktion der Vielfalt von Materialabläufen zur Einfachheit. So ist z. B. eine Standardisierung der Abläufe und Prozessparameter für die unterschiedlichen Produktgruppen bzw. Qualitäten in der Stahl- und Feuerfestindustrie üblich. Eine Zertifizierung der dokumentierten Prozessschritte ist oftmals vorhanden. Für jede Qualität werden die Rohstoffen, die Einsatzmengen, die Temperaturkurven für bestimmte Aggregate, die Qualitätsprüfungen etc. festgelegt und nach diesen wird dann produziert und der Materialfluss gesteuert. Für eine Charge eines Produktes verlaufen die Materialflüsse bei standardisierten Abläufen immer nach dem gleichen Schema ab und dadurch reduziert sich der Planungs- und Steuerungsaufwand. Die Materialflusstruktur wird für jede Variante fix festgelegt. Auch eine Standardisierung bei Teilen bringt Erleichterungen bei der Planung und Steu-

²⁴¹ Vgl. Vahrenkamp (2004), S. 305

²⁴² Vgl. Günther, Tempelmeier (2005), S. 315

erung von Materialflüssen. „Die Integration standardisierter Produkte und Dienstleistungen verbessert nachhaltig die immer komplexere industrielle Produktion und deren Prozesse.“²⁴³

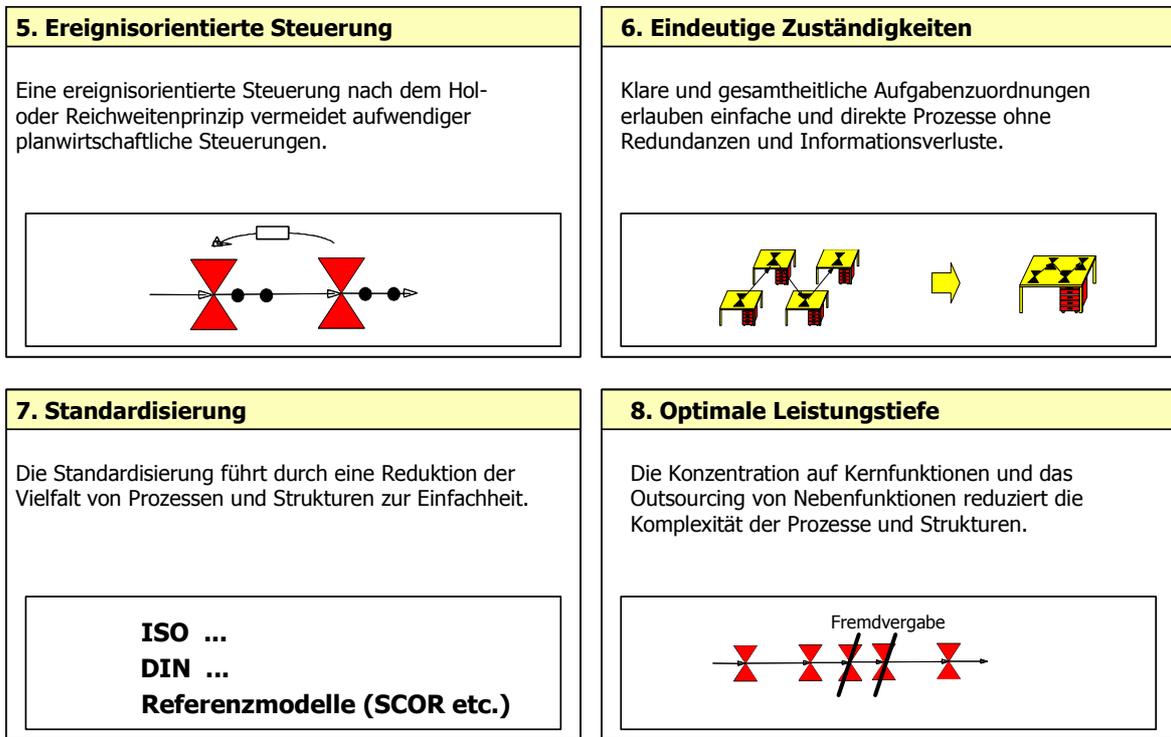


Abbildung 20: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung II²⁴⁴

Die Konzentration auf Kernfunktionen und das Outsourcing von Nebentätigkeiten werden in der Stahlindustrie z. B. auch in der Produktion bei der Reparatur oder Zustellung gewisser Aggregate betrieben. In der Feuerfestindustrie ist der Formenbau eine Tätigkeit, die oft outsourct wird. Damit fällt ein gewisser Planungs- und Steuerungsaufwand weg und man kann die gewonnene Kapazität für andere Aufgaben nutzen und sich auf seine Kernkompetenzen konzentrieren. Weitere positive Aspekte beim Outsourcing können sein:²⁴⁵

- Economies of Scale: Fertigungskosten können eingespart werden, weil der Outsourcing Partner, an den Teile der Produktion ausgelagert werden, auch für andere Kunden produziert und damit Größendegressionseffekte ausgenutzt werden können.
- Risk Pooling: Das Risiko von Nachfrageschwankungen wird (teils) auf den Outsourcing Partner abgewälzt, der seinerseits einen Ausgleich des Risikos schafft.
- Reduktion der Kapitalinvestitionen: Kapitalinvestitionen werden ebenfalls auf den Outsourcing Partner verlagert bzw. besitzt dieser bereits die Kapazitäten.
- Höhere Flexibilität: Die Reaktion auf veränderte Kundennachfrage kann rascher erfolgen, weiters kann im Produktentwicklungsprozess auf das technische Know-How des Outsourcing Partners zurückgegriffen werden. Damit kann auch die Entwicklung neuer Produkte beschleunigt werden.

²⁴³ Bürvenich, Hensel (2004), S. 70

²⁴⁴ In Anlehnung: Gollwitzer, Karl (1998), S. 181ff., Eidenmüller (1995), S. 89f., S. 108f., S. 119f., Schenk, Wirth (2004), S. 13ff.

²⁴⁵ Vgl. Simchi-Levi et al. (2008), S. 281

Weitere Grundsätze für Materialflussteuerung und -optimierung finden sich in Abbildung 21.

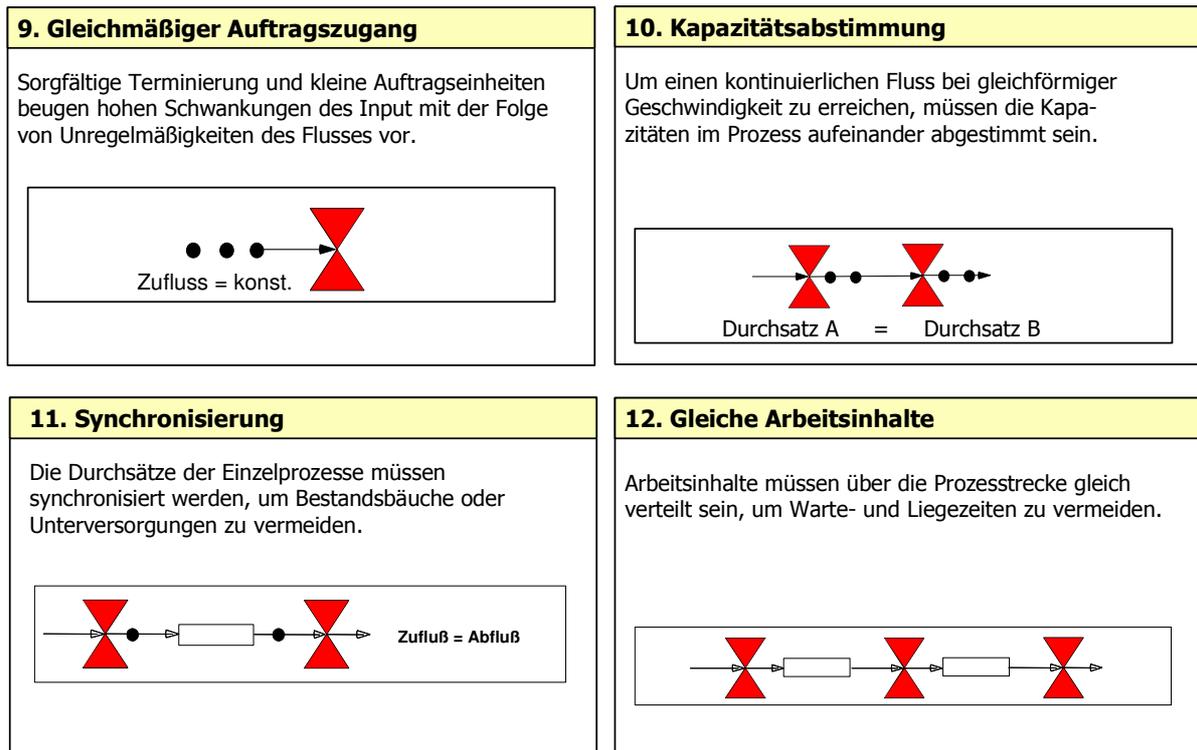


Abbildung 21: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung III²⁴⁶

Ein gleichmäßiger Auftragszugang wird durch die Chargen- bzw. Kampagnenfertigung in der Stahl- und Feuerfestindustrie sowie der gewünschten maximalen Kapazitätsausnutzung in der Produktion unterstützt. Jede Kapazität in der Stahl- und Feuerfestindustrie, welche nicht ausgenutzt wird, kostet viel Geld. Es rentiert sich nur selten (bei Androhung von hohen Pönalen bzw. bei sehr guten Kunden oder Margen) eine Charge kleiner als die mögliche Kapazität eines Gefäßes zu gestalten.

Eine Kapazitätsabstimmung zwischen den einzelnen Aggregaten der Stahl- und Feuerfestindustrie ist unumgänglich. Durch die kontinuierlichen Materialflüsse v. a. in der Stahlindustrie und großen Chargen bzw. Kampagnen können kaum Zwischenlager zwischen zwei Aggregaten angelegt werden, so dass eine Abstimmung aufeinander folgender Produktionsstationen, die keinen Puffer erlauben, extrem wichtig ist.

Eine Synchronisation des Produktionsablaufes, d. h. ein mengenmäßiger Abgleich zwischen Zufluss und Abfluss bei den einzelnen Aggregaten, ist z. B. in der Stahlindustrie aufgrund des vorwiegend kontinuierlichen Charakters der Fertigung und aus verfahrenstechnischen Gründen, wie der Einhaltung bestimmter Temperaturfenster oder der Reaktionsfähigkeit der Ma-

²⁴⁶ In Anlehnung: Gollwitzer, Karl (1998), S. 181ff., Eidenmüller (1995), S. 89f., S. 108f., S. 119f., Schenk, Wirth (2004), S. 13ff.

materialien unumgänglich. Unterversorgungen hätten gravierende Folgen für den kontinuierlichen Ablauf. Auch in der Feuerfestindustrie wirkt sich eine Synchronisation von Abfluss und Zufluss positiv auf den Materialflussverlauf und Produktionsfortschritt aus.

Der nächste Grundsatz kann damit in Verbindung gesehen werden. Neben einer mengenmäßigen Abstimmung sollte auch eine zeitliche Abstimmung der Arbeitsinhalte in der Stahl- und Feuerfestindustrie umgesetzt werden, um Warte- und Liegezeiten minimal zu halten. Oft sind Arbeitsinhalte über die Prozessstrecke aufgrund des kontinuierlichen Produktionsflussverlaufes aber von vornherein gleich verteilt (Regel 12).

Der 13. Grundsatz behandelt die Prozessbeherrschung (Abbildung 22). „Die Beherrschung der Prozesse ist Voraussetzung für die Realisierung des Fließprinzips“.²⁴⁷ Diese Regel ist mit der achten Richtlinie nach Towill gleichzusetzen, welche eine Minimierung der Prozessunsicherheiten zur Vereinfachung des Materialflusses vorschlägt. Je weniger Störungen in einem Prozess auftreten, desto kontinuierlicher kann gefertigt werden, Ablaufpläne können eingehalten werden und damit zugesagte Liefertermine etc. erfüllt werden.

Daraus resultiert einerseits die Forderung nach einer 100% Verfügbarkeit aller Produktionsfaktoren sowie nach beherrschbaren Fertigungstechnologien, andererseits auch nach rasch wirkendem Störungsbehebungsmanagement.²⁴⁸ In der Stahl- und Feuerfestindustrie steht Prozessbeherrschung an oberster Stelle u. a. aufgrund des größtenteils kontinuierlichen Charakters der Fertigung, hoher Pönalen und hoher Konkurrenz.

Der Flexibilität hinsichtlich Stückzahlen sind v. a. in der Stahlindustrie technologische Grenzen gesetzt. Diese ergeben sich zum einen durch die fixierten Losgrößen aufgrund der Aggregatsgrößen, des kontinuierlichen Betriebs und zum anderen durch die Kampagnenfertigung.²⁴⁹ Je höher die Flexibilität in einem Materialflusssystem ist, desto größer ist auch der Grad an Vernetzung²⁵⁰ und damit steigt v. a. der Steuerungsaufwand an.

Da es meistens nur einen Hauptfluss gibt, können kurzfristige Änderungen im Produktionsprogramm lange Umrüstvorgänge, Reinigungsaufwände und eine oft damit verbundene Erhöhung der Durchlaufzeit und Neuplanung der Materialflüsse bewirken.

²⁴⁷ Eidenmüller (1995), S. 118

²⁴⁸ Vgl. Eidenmüller (1995), S. 118

²⁴⁹ Vgl. Deuse, Deckert (2006), S. 86

²⁵⁰ Vgl. Arnold, Furmans (2005), S. 2

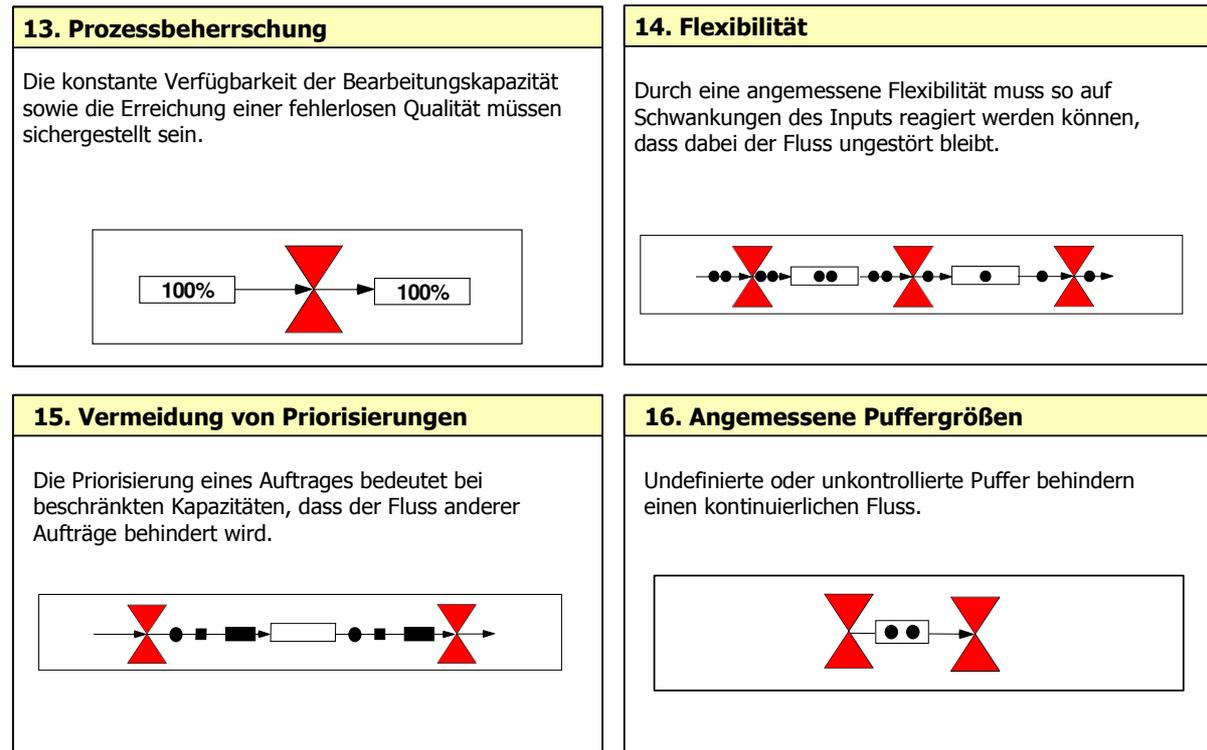


Abbildung 22: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung IV²⁵¹

Eilaufträge gibt es auch in der Stahl- und Feuerfestindustrie. Deren Einplanung in das System führt zu Änderungen der Ablaufplanung und zu Störungen im Materialfluss und sollte daher nur in Ausnahmefällen ins Produktionssystem eingelastet werden. In Fällen von z. B. reklamierter Ware oder wichtigen Kunden werden vorwiegend Priorisierungen von Aufträgen durchgeführt. Bei der Produktionsprogrammplanung stellt man dafür begrenzte Kapazitäten zur Verfügung, um ein wenig Spielraum zu haben.

Puffer sind begrenzt v. a. in der Stahlindustrie vorhanden.²⁵² Daher ist eine exakte Planung der räumlichen Flächen für die oft sehr voluminösen Teile, Behälter etc. nötig, um den v. a. kontinuierlichen Materialfluss im Stahlwerk nicht zu behindern. Ein gutes Beispiel dafür ist die Bereitstellung von Tundishbehältern in der Stahlindustrie, die einigen verfahrenstechnischen Gegebenheiten unterliegen oder die Planung des benötigten Raumes vor dem Ofen bei einem Chargenwechsel in der Feuerfestindustrie.

²⁵¹ In Anlehnung: Gollwitzer, Karl (1998), S. 181ff., Eidenmüller (1995), S. 89f., S. 108f., S. 119f., Schenk, Wirth (2004), S. 13ff.

²⁵² Vgl. Spengler et al. (2007), S. 53

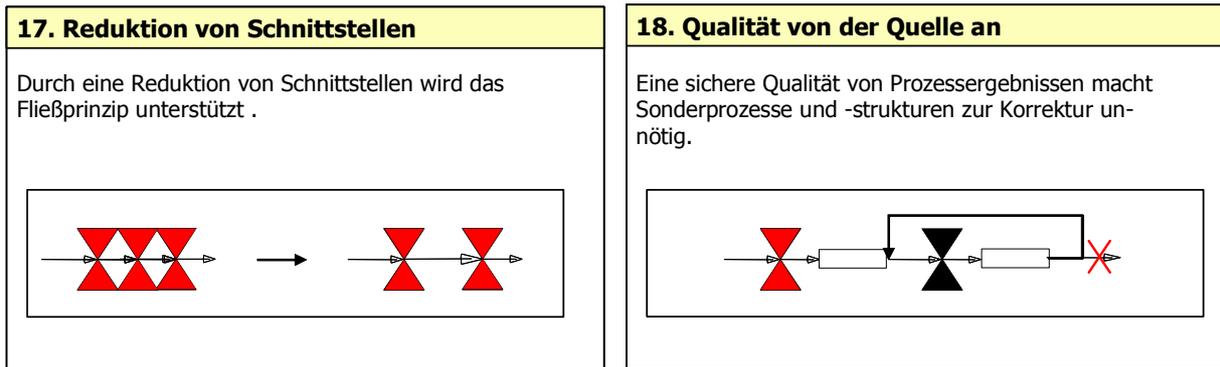


Abbildung 23: Grundsätze zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung (Regel 17-18)²⁵³

Je weniger Schnittstellen es in einem Materialflusssystem (17. Grundsatz in Abbildung 23) gibt, desto leichter planbar und steuerbar sind die Abläufe auch in der Stahl- und Feuerfestindustrie. Wenige Schnittstellen unterstützen einen kontinuierlichen Fluss. Warte- bzw. Liegezeiten werden dadurch verringert.

Der letzte Grundsatz betrifft die Qualität. Diese ist von der Quelle an natürlich entscheidend für den gesamten Produktionsablauf und damit für die Materialflüsse. Rohstoffe, die bestimmte Kriterien bzw. Eigenschaften nicht erfüllen, können zu Abweichungen in den gewünschten Wirkungsweisen der Zwischen- bzw. Endprodukte führen und eine Störung der Materialflüsse mit sich bringen. In diese Regel spielt auch die Prozessbeherrschung wieder eine Rolle. Laufen die Prozesse in der Stahl- und Feuerfestindustrie einwandfrei ab, reduziert das die Notwendigkeit von Nacharbeit.

Neben der Qualität bei den Einsatzstoffen und der Prozessstabilität sind auch Qualitätsanforderungen an das Arbeitspersonal zu beachten. Qualität hängt auch von der Motivation der Mitarbeiter ab, die ständig bemüht sein sollten, Verschwendungen durch Fehler zu vermeiden²⁵⁴.

Deuse und Deckert sind der Meinung, dass auch die Prinzipien der Lean Production:

- Ziehprinzip
- Prozessorientierung
- Fehlervermeidung
- Flexibilität
- Standardisierung
- Ständige Verbesserung

²⁵³ In Anlehnung: Gollwitzer, Karl (1998), S. 181ff., Eidenmüller (1995), S. 89f., S. 108f., S. 119f., Schenk, Wirth (2004), S. 13ff.

²⁵⁴ Vgl. Eidenmüller (1995), S. 120

- Transparenz
- Eigenverantwortung

in der Stahlproduktion mit Einschränkungen in den Bereichen Flexibilität, Fehlervermeidung und der Eigenverantwortung nutzbringend angewendet werden können. Bei der Fehlervermeidung könnten z. B. durch Schwierigkeiten in der prozessübergreifenden Fehlerverfolgung bedingt durch metallurgische Abweichungen Probleme auftreten und die Eigenverantwortung ist an die Qualifikation und Entscheidungsfreiheit der Mitarbeiter gekoppelt. Der Erweiterung dieses Handlungsspielraumes sind deutliche Grenzen durch die Anlagentechnik gesetzt.²⁵⁵ Die meisten dieser Grundsätze der Lean Production finden sich auch in den aufgestellten Regeln wieder.

Zusammenfassend zeigen sich einige Parallelen und Synonyme zu den Regeln nach Towill²⁵⁶, die im abschließenden Abschnitt noch detailliert erläutert werden. Zahlreiche der aufgestellten generellen Regeln und Grundsätze zur Optimierung sind auf den Materialfluss in der Stahl- und Feuerfestindustrie übertragbar. Einige Regeln stehen aber mit Gegebenheiten in diesen Industriebranchen in einem Konflikt wie z. B. eine auftragsbezogene Beschaffung in kleinen Losen. Weitere Regeln sind wünschenswert, doch aufgrund strategischer, firmenpolitischer, gesellschaftlicher Ideen bzw. Grenzen oder finanzieller Aspekte nicht umsetzbar wie z. B. Entflechtung oder die Vermeidung von Priorisierungen. Es gibt aber doch Vorschläge zur Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung, welche im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie zu Erleichterungen führen würden. Einige der Grundsätze sind auch in der Praxis anzutreffen, wie ein gutes Qualitätsmanagement und ein Bestreben nach Prozessbeherrschung. Für die Stückgutindustrie lassen sich diese Regeln oft ohne große Einschränkungen anwenden, um den Materialfluss zu vereinfachen und zu optimieren.

Der abschließende Abschnitt fasst die Grundsätze zusammen und stellt die Regeln gegenüber. Empfehlungen für das Materialflussmanagement in der Stahl- und Feuerfestindustrie werden anhand der gewählten Regeln gegeben.

3.5.3 Empfehlungen zum Materialflussmanagement in der Stahl- und Feuerfestindustrie

Neben einer Zusammenfassung und Bewertung der Regeln wird eine Unterteilung der Empfehlungen zur Vereinfachung der Abläufe im Materialflusssystem in „Muss“ bzw. „Kann“ Grundsätze gemacht.

²⁵⁵ Vgl. Deuse, Deckert (2006), S. 85f.

²⁵⁶ Towill (1999), S. 10f.



Abbildung 24: Abhängigkeiten und Synonyme in den Materialflussgrundsätzen

In Abbildung 24 sind alle Regeln von Towill und die abgeleiteten Grundsätze aus der Literatur aufgelistet. Synonyme bzw. Regeln, welche dasselbe Ziel in eventuell unterschiedlichen Größenordnungen (Synchronisation in der Supply Chain bzw. in der Produktion) verfolgen, sind durch strichlierte Pfeile gekennzeichnet und Grundsätze die einer Abhängigkeit unterliegen bzw. andere Regeln beeinflussen sind punktiert dargestellt.

So können die einfache Produktgestaltung, die Reduktion der Varianten- und Teilevielfalt sowie eine Parallelisierung unabhängiger Prozesse als Basis für eine Entflechtung dienen bzw. zu entflochtenen Strukturen führen. Der Grundsatz der Durchlaufzeitminimierung steht z. B. in Abhängigkeit zur Regel „Qualität von der Quelle an“. Je schlechter die Qualität der Prozessergebnisse desto mehr Nacharbeit und desto länger wird für die Fertigstellung eines Produktes benötigt (DLZ steigt). Weiters beeinflussen z. B. eine Entflechtung der Materialflussstrukturen die DLZ positiv und auch eine Standardisierung führt zu konstanten (minimalen) Durchlaufzeiten.

Die folgende Grafik (Abbildung 25) gibt einen Überblick über die Umsetzbarkeit und Nützlichkeit der Regeln für die Stahl- und Feuerfestindustrie wieder. Die hell hinterlegten Felder bedeuten, dass diese Regeln kaum umsetzbar sind, die schraffierten Vorschläge unterliegen bestimmten Restriktionen und sind daher oft nur schwer umsetzbar und in den dunklen Feldern sind Grundsätze angeführt, welche meistens umsetzbar und sehr sinnvoll für das Materialflussmanagement der Stahl- und Feuerfestindustrie sind.

Die Bewertung der Regeln stellt eine Möglichkeit dar, die sich auf Basis von Literaturrecherchen und Industriegesprächen so anbietet; selbstverständlich kann dies aber von Fall zu Fall unterschiedlich sein. Daher muss jedes Unternehmen diese Bewertung auf Anpassungsnotwendigkeiten auf die eigene Situation bzw. notwendige Abweichungen von dieser Bewertung überprüfen und für den jeweiligen spezifischen Kontext modifizieren.

Erzeuge nur Produkte, die in kurzer Zeit an Kunden geliefert und verrechnet werden können.	Einfache Produktgestaltung
Erzeuge in einer Periode nur jene Komponenten, die für die Montage in der folgenden Periode eingesetzt werden.	Reduktion von Varianten- und Teilevielfalt
Minimiere die Durchlaufzeit des Materials, d. h. verkürze alle Prozesszeiten.	Parallele Prozesse
Plane für die kürzestmögliche Periode, d. h. für die kleinste Losgröße, die effizient gesteuert werden kann.	Entflechtung
Akzeptiere Sendungen von Lieferanten nur in kleinen Losen, wie sie in Produktion oder Montage benötigt werden.	Ereignisorientierte Steuerung (Pull)
Synchronisiere die zeitliche Taktung in allen Phasen der Supply Chain.	Eindeutige Zuständigkeiten
Bilde Gruppen von Produkten und Designprozessen in Anpassung an die jeweiligen Wertströme.	Standardisierung
Eliminiere alle Unsicherheiten im Prozess.	Optimale Leistungstiefe
Verstehe, dokumentiere, vereinfache die Supply Chain, dann erst optimiere sie.	Gleichmäßiger Auftragszugang
Vereinfache und beschleunige alle Informationsflüsse, mache sie sichtbar.	Kapazitätsabstimmung
Verwende nur erprobte, einfache, robuste Decision-Support-Systeme (DSS).	Synchronisierung
Das Ziel des Geschäftsprozesses ist der nahtlose Fluss in der Supply Chain, d. h. alle Beteiligten denken und handeln wie eine Person.	Gleiche Arbeitsinhalte
	Prozessbeherrschung
	Flexibilität
	Vermeidung von Priorisierungen
	Angemessene Puffergrößen
	Reduktion von Schnittstellen
	Qualität von der Quelle an

Abbildung 25: Umsetzbarkeit, Nützlichkeit der Regeln für die Stahl- und Feuerfestindustrie zur Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung

Die schraffierten Felder beinhalten Regeln zur Vereinfachung, welche von z. B. der strategischen Ausrichtung, der Firmenmentalität oder von den anderen Mitgliedern der Supply Chain abhängig sind. Auf diese Restriktionen wird nun für einige ausgewählte Regeln eingegangen:

Ein nahtloser Fluss in der Supply Chain ist ein wünschenswertes Ziel im Materialflussmanagement doch scheitert dieser Grundsatz fast immer bei der Umsetzung aufgrund der vielstufigen Supply Chain Netzwerke und den damit verbundenen zahlreichen Partnern (Lieferanten, Sublieferanten, Kunden etc.) der Stahl- und Feuerfestindustrie. Eine Parallelisierung von unabhängigen Prozessen ist z. B. vom vorhandenen Platz in der Produktion, von den finanziellen Mitteln, vom Produktsortiment etc. abhängig. Eine einfache Produktgestaltung und eine geringe Anzahl an Varianten hängen stark von der strategischen Ausrichtung des Unternehmens und ihren Kundenstamm ab. Unternehmen, die sich auf Produkte wie z. B. schmelzgegossene Steine oder hochlegierte Stähle mit bestimmten Eigenschaften spezialisiert haben, haben meisten keine Verwendung für diese Regeln. Eine rein dezentrale Steuerung (Pull-Steuerung) ist aufgrund bereits genannter Gründe oft nicht in allen Teilen der Fer-

tigung umsetzbar. Für kleine Werke z. B. in der Feuerfestindustrie bei ungeformten Produkten, die nur die Prozessschritte des Mischens und des Abfüllens durchlaufen, könnte aber eine solche Dezentralisierung realisierbar sein. Priorsierungen von Aufträgen stören den kontinuierlichen Fluss. Die Priorsierung von Aufträgen ist in vielen Unternehmen für bestimmte Kunden aber Firmenpolitik.

Daraus lassen sich „Muss“ und „Kann“ Regeln für das Materialflussmanagement der Stahl- und Feuerfestindustrie ableiten (Tabelle 5 und Tabelle 6):

Bilde Gruppen von Produkten und Designprozessen in Anpassung an die jeweiligen Wertströme.
Eliminiere alle Unsicherheiten im Prozess / Prozessbeherrschung
Verstehe, dokumentiere, vereinfache die Supply Chain, dann erst optimiere sie.
Verwende nur erprobte, einfache, robuste Decision-Support-Systeme (DSS) für den operativen Bereich deiner Produktion
Eindeutige Zuständigkeiten
Standardisierung
Optimale Leistungstiefe
Kapazitätsabstimmung
Gleiche Arbeitsinhalte
Gleichmäßiger Auftragszugang
Synchronisation
Reduktion von Schnittstellen
Qualität von der Quelle an

Tabelle 5: „Muss“-Regeln zur Vereinfachung von Flüssen in der Stahl- und Feuerfestindustrie

Minimiere die Durchlaufzeit des Materials, d. h. verkürze alle Prozesszeiten
Einfache Produktgestaltung
Reduktion von Varianten- und Teilevielfalt
Parallele Prozesse
Entflechtung
Erzeuge nur Produkte, die in kurzer Zeit an Kunden geliefert und verrechnet werden können.
Flexibilität
Synchronisiere die zeitliche Taktung in allen Phasen der Supply Chain
Vereinfache und beschleunige alle Informationsflüsse, mache sie sichtbar
Das Ziel des Geschäftsprozesses ist der nahtlose Fluss in der Supply Chain, d. h. alle Beteiligten denken und handeln wie eine Person.
Vermeidung von Priorsierungen

Tabelle 6: „Kann“ Regeln zur Materialflussvereinfachung in der Stahl- und Feuerfestindustrie

Auch hier muss auf die subjektive Einschätzung hingewiesen werden. „Muss“-Regeln sollten zur Realisierung eines stabilen, effizienten Materialflussablaufes im System umgesetzt sein bzw. werden. „Kann“-Regeln tragen zwar auch zu Erleichterungen in der Ablaufkoordination und -steuerung bei, sind aber in den meisten Systemen der Stahl- und Feuerfestindustrie aufgrund bestimmter Gegebenheiten nur erschwert umsetzbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es generell viele effiziente Methoden bzw. Maßnahmen gibt, um sich den erwähnten taktisch-operativen Aufgabenstellungen und Herausforderungen im Materialfluss der Stahl- und Feuerfestindustrie zu stellen. Eine Vereinfachung der Materialflussstruktur bzw. -steuerung kann oft durch simple Regeln und Grundsätze verwirklicht werden. Die Heterogenität der Branchenclusters der Prozessindustrie lässt zwar Aussagen zur prinzipiellen Anwendbarkeit bestimmter Grundsätze zu, doch spielen die individuellen Gegebenheiten im jeweiligen Unternehmen (strategische Ausrichtung etc.) natürlich eine wichtige Rolle bei der Auswahl der entsprechenden Maßnahmen. Der Materialfluss in Betrieben der Stahl- und Feuerfestindustrie ist oft genauso heterogen wie die Prozessindustrie selbst. Die aufgestellten Regeln sollen einen Überblick über mögliche Maßnahmen und Ansatzpunkte im Materialflussmanagement der Stahl- und Feuerfestindustrie liefern, um unnötigen Mehraufwand in der Steuerung, Planung etc. in diesen oft sehr anspruchsvollen Systemen zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Prozessstabilität ist für den effizienten Ablauf im Materialflusssystem ein entscheidender Faktor. Dazu meint auch Eidenmüller:²⁵⁷ „Störungen beeinträchtigen die Motivation der Mitarbeiter, während störungsfreie Abläufe die Identifikation mit der Arbeit fördern“.

Das Kapitel hat Aufschluss über die Materialflussgegebenheiten und logistischen Herausforderungen im gewählten Branchencluster gegeben. Das Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie kann, mit ein paar Einschränkungen, gemeinsam betrachtet werden und mögliche Ansätze zur Vereinfachung beurteilt werden. Es zeigt sich aber auch, dass der Materialfluss in der Stahl- und Feuerfestindustrie hohen Planungs- und Steuerungsaufwand bedarf aufgrund der vielen Restriktionen und Regeln im Materialflusssystem. Welche Arten von Komplexität bzw. Komplexitätstreibern den Umgang mit Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie erschweren, wird im folgenden Kapitel nun erarbeitet.

²⁵⁷ Eidenmüller (1995), S. 121

4 Komplexitätsausprägungen im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie

In diesem Kapitel wird die Komplexität des Materialflusssystems der Stahl- und Feuerfestindustrie näher untersucht, um die Ursachen der Probleme in der Materialflussplanung und -steuerung zu identifizieren. Abschnitt 4.1 definiert zum besseren Verständnis des gesamten Fachgebietes die Begriffe Komplexität und System, Abschnitt 4.2 die Verbindung zwischen diesen beiden, Abschnitt 4.3 geht auf Eigenschaften komplexer Systeme ein. Schließlich beschreibt noch Abschnitt 4.4 die Komplexitätsarten im Unternehmen. Aufbauend auf diesem Wissen wird Komplexität in der Stahl- und Feuerfestindustrie, schwerpunktmäßig im Materialflusssystem dieser Branchen, analysiert und Komplexitätstreiber identifiziert (Abschnitt 4.5) sowie Maßnahmen zur Komplexitätsreduktion, -vermeidung und -beherrschung diskutiert (Abschnitt 4.6) indem auch Rückgriff auf die aufgestellten Regeln zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung genommen wird. Dieser Abschnitt schafft die Grundvoraussetzung zum Themengebiet der Komplexitätskosten und ihrer Identifikation in Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie welches der abschließende Abschnitt 4.7 behandelt.

4.1 Definition Komplexität und System

Im Folgenden wird auf die Definitionen von Komplexität und System eingegangen, um ein umfassendes Verständnis der einzelnen Begriffe des Themengebietes zu gewährleisten.

Ulrich und Probst²⁵⁸ definieren Komplexität als die „Fähigkeit eines Systems, in einer gegebenen Zeitspanne eine große Zahl von verschiedenen Zuständen annehmen zu können“.

Eine weitere Definition nach Heina²⁵⁹ beschreibt Komplexität als die Eigenschaften einer Situation, in welcher mehrere Faktoren in Wechselwirkung sind. Komplexität wird durch die Anzahl an Elementen und deren Beziehungen determiniert.

Bohne²⁶⁰ definiert Komplexität als „intricacy of objects“. Komplexität resultiert in Intransparenz und Unsicherheit.

Liening²⁶¹ erläutert, dass „sich verschiedene Kriterien ergeben, die Komplexität umschreiben durch die Zahl der Elemente eines Systems, die Zahl der Verknüpfungen dieser Elemente untereinander, die Vielfalt und Vielschichtigkeit ineinander verwickelter Verknüpfungen und die nicht-lineare Dynamik eines Systems“.

²⁵⁸ Ulrich, Probst (1991), S. 58

²⁵⁹ Vgl. Heina (1999), S. 10

²⁶⁰ Vgl. Bohne (1998), S. 20

²⁶¹ Liening (1999), S. 57

Komplexität hängt stark vom Betrachter ab, ist also subjektiv und verschieden für jedes System. Physiker suchen nach möglichst fundamentalen Maßen für die Komplexität, Mathematiker approximative Komplexitätsmaße (axiomatische Komplexitätstheorie) und Biologen beziehen Komplexität häufig auf evolutionäre Prozesse.²⁶²

Eine weitere Definition lautet: Unter Komplexität versteht man die Tatsache, dass reale Systeme sehr viele Zustände einnehmen können.²⁶³

Ulrich und Probst definieren ein System als ein „ein dynamisches Ganzes, das als solches bestimmte Eigenschaften und Verhaltensweisen besitzt“. Es besteht aus Teilen, die so miteinander verknüpft sind, dass kein Teil unabhängig von anderen Teilen ist und das Verhalten des ganzen Systems wird beeinflusst vom Zusammenwirken aller Teile.²⁶⁴

Auch in den nächsten Definitionen stehen die Wechselwirkungen der Elemente in den Vordergrund: „A system is a set of objects together with relationships between the objects and between their attributes“.²⁶⁵ „Ein System besteht darin, dass Einheiten durch Beziehungen als Teile zu einem Ganzen verbunden werden. Das System ist die Interdependenz der Teile im Rahmen eines Ganzen. Die Art, wie die Teile zu einem Ganzen zusammengeordnet sind, macht die Struktur des Systems aus“.²⁶⁶

Schuh hat folgende Sichtweise von Komplexität: „Komplexität besagt eigentlich zweierlei: Zum einen bezeichnet man damit ein System, in dem nicht mehr alle Elemente miteinander verknüpft werden können, und zum anderen meint man damit Unbestimmtheit und Unvorhersehbarkeit.“²⁶⁷

Für Vester²⁶⁸ bestehen komplexe Systeme wie jede Organisation „aus mehreren verschiedenen Teilen (Organen), die in einer bestimmten dynamischen Ordnung zueinander stehen, zu einem Wirkungsgefüge vernetzt sind. In dieses kann man nicht eingreifen, ohne dass sich die Beziehung aller Teile zueinander und damit der Gesamtcharakter des Systems ändern würde.“

Komplexität wird oft mit negativen Auswirkungen assoziiert. Man sollte aber zwischen einer „guten“ und „schlechten“ Komplexität unterscheiden. Positive Komplexität ist gut für das Unternehmen und die Kunden. Eine Steigerung der Variantenvielfalt erzeugt zwar Komplexi-

²⁶² Vgl. Flückiger, Rauterberg (1995), S. 4

²⁶³ Vgl. Malik (2002), S. 186

²⁶⁴ Ulrich, Probst (1991), S. 30

²⁶⁵ Hall, Fagen (1956), S. 19

²⁶⁶ Luhmann (1976), S. 23

²⁶⁷ Schuh (2005), S. 5

²⁶⁸ Vester (1999), S. 25

tät im Unternehmen, aber aus dem guten Grund, dass neue Kunden akquiriert werden können.²⁶⁹

Da es eine Vielzahl an sehr unterschiedlichen Definitionen des Begriffes Komplexität gibt, soll anhand eines Schemas vom Meyer²⁷⁰ eine Übersicht über die einzelnen Betrachtungsweisen gegeben werden (Tabelle 7).

		Bohne (1998)	Schuh (2005)	Malik (2002)	Hall und Fagan (1956)	Luhmann (1976)	Flickinger und Rautenberg (1995)	Heina (1999)	Liening (1999)	Ulrich und Probst (1991)	Beer (1992)	Schwäninger (1994)	Tang und Salmihen (2001)	Hub (1994)	Gell-Mann (1996)	Gomez-Probst (1997)	Kirchhof (2003)	Vester (1999)	Ashby (1974)
Systemstruktur	Unterschiedlichkeit der Elemente	•								•						•	•	•	
	Anzahl der Elemente	•	•		•	•		•	•	•	•		•					•	
	Verschiedenartigkeit der Relationen	•		•		•		•		•								•	
	Anzahl der Relationen				•	•		•	•		•		•			•	•		
	Bandbreite der Relationen				•				•				•						
Systemverhalten	Verhalten im Zeitablauf (Dynamik)	•	•						•			•		•		•	•	•	
	Eigenschaft viele Zustände oder Konfigurationen annehmen zu können			•								•		•					
	Anzahl unterscheidbarer Zustände			•														•	
	Erforderlicher Umfang/Rechenaufwand zu Systembeschreibungen														•	•			
	Subjektive Komplexität (abhängig vom Betrachter)						•								•		•		

Tabelle 7: Definitionsübersicht zum Begriff Komplexität²⁷¹

Perona und Miragliotta²⁷² führen an, dass es keine befriedigende und generell passende Definition von Komplexität gibt.

Es gibt aber viele einzelne auf die Fragestellungen des Fachgebiets zugeschnittene Definitionen von Komplexität (siehe Tabelle 7). Einige stellen z. B. die Anzahl der Elemente in den Vordergrund, andere definieren Komplexität über die Anzahl unterscheidbarer Zustände. Die Definitionen hängen stark vom Fachgebiet ab. So werden z. B. in den Naturwissenschaften oft andere Ansatzpunkte zur Definition von Komplexität herangezogen als in den Betriebswirtschaften. Daher ist es schwierig im Gegensatz zum Begriff des Systems, den Begriff der Komplexität zu systematisieren.

²⁶⁹ Vgl. Anderson et al. (2006), S. 19f.

²⁷⁰ Vgl. Meyer (2007), S. 21f.

²⁷¹ in Anlehnung Meyer (2007), S. 21f.

²⁷² Vgl. Perona, Miagliotta (2004), S. 104f.

Basis der Begriffsverwendung in dieser Arbeit stellt eine Kombination unterschiedlicher Definitionen dar: *Komplexität soll als eine Systemeigenschaft verstanden werden, die durch die Elemente (Anzahl und Vielfalt) im System und ihrer Beziehungen (Anzahl und Vielfalt) bestimmt wird.*

Die Definition von System wird von Ulrich und Probst übernommen: *Ein System ist „ein dynamisches Ganzes, das als solches bestimmte Eigenschaften und Verhaltensweisen besitzt“. Es besteht aus Teilen, die so miteinander verknüpft sind, dass kein Teil unabhängig ist und das Verhalten des ganzen Systems wird beeinflusst vom Zusammenwirken aller Teile“.*²⁷³

Im Folgenden wird versucht, eine Verbindung dieser beiden Begriffe zu schaffen.

4.2 Abgrenzung komplexes versus kompliziertes System

Komplizierte und komplexe Systeme werden im Sprachgebrauch oft synonym verwendet, doch gibt es entscheidende Unterschiede zwischen diesen beiden Begriffen, die entsprechende Konsequenzen für die Analyse von Systemen haben. Daher sind exakte Definitionen notwendig. Weiters soll ein Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Systemformen und einem Materialflusssystem geschaffen werden.

Komplizierte Systeme zeichnen sich durch eine im subjektiven Sinne große Anzahl von Elementen und Beziehungen aus. Eine hohe Varietät eines Systems, bestimmt durch die große Anzahl unterschiedlicher Elemente, verstärkt die Kompliziertheit zusätzlich.²⁷⁴

„Kompliziert ist ein System, das schwierig zu überblicken ist, dessen geduldige Analyse aber eine Zerlegung in Untereinheiten erlaubt, also eine Auflösung der Verwicklung“.²⁷⁵

„Für ein komplexes System, im Deutschen vielleicht am besten durch „vielschichtig“ wiedergegeben, ist diese Art der Unterteilung nicht möglich, oder präziser, sie trägt nicht zum Verständnis des Gesamtsystems bei: Gerade die Vernetzung vermeintlicher Einzelteile prägt wesentliche Eigenschaften des Gesamtsystems, die mit Hilfe der getrennten Teile entweder nicht erfasst werden oder gar nicht existieren. Man spricht von Emergenz, oder etwas alltags-tauglicher: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“.²⁷⁶

„Komplexe Systeme weisen eine Eigendynamik auf. Ihre Struktur ist nicht nur kompliziert, sondern deren innerer Zustand verändert sich unablässig“.²⁷⁷

²⁷³ Ulrich, Probst (1991), S. 30

²⁷⁴ Vgl. Syring (1993)

²⁷⁵ Vgl. Richter, Rost (2002), S. 3

²⁷⁶ Vgl. Richter, Rost (2002), S. 3

²⁷⁷ Spahni (1998), S. 2

Die Komplexität eines Systems weist aber auch einen subjektiven Charakter auf, da Komplexität auch vom Betrachter abhängt. So stellte Ashby²⁷⁸ fest, dass ein System vom Beobachter als „sehr umfangreich“ bezeichnet wird, „wenn es in gewisser Weise durch seine Kompliziertheit und seine Komplexität über ihn triumphiert“.

Die Beschreibung und Erklärung der Theorie und des Wesens komplexer Systeme erfordert zunächst eine Analyse der Einflussdimensionen auf die Komplexität. Diese sind im wesentlichen Vielfalt / Vielzahl und die Dynamik / Veränderlichkeit eines Systems (Abbildung 26).

Die Vielzahl/Vielfalt ist die Verschiedenartigkeit der Elemente eines Systems. Die vielschichtigen Ausprägungen reichen von homogen bis heterogen bzw. von wenig komplex bis hochkomplex. Die Diversität der Elemente beschreibt dabei deren Unterschiedlichkeit und den Grad der Unterschiedlichkeit zueinander. Die Divergenz drückt darüber hinaus die Nichtlinearität und Ungleichgewicht aus.²⁷⁹

Das Zeitverhalten eines Systems wiederum gibt die Veränderlichkeit wieder. Die Dynamik definiert die Veränderung im System, ihre Richtung, ihre Geschwindigkeit sowie die Veränderungsprinzipien.²⁸⁰

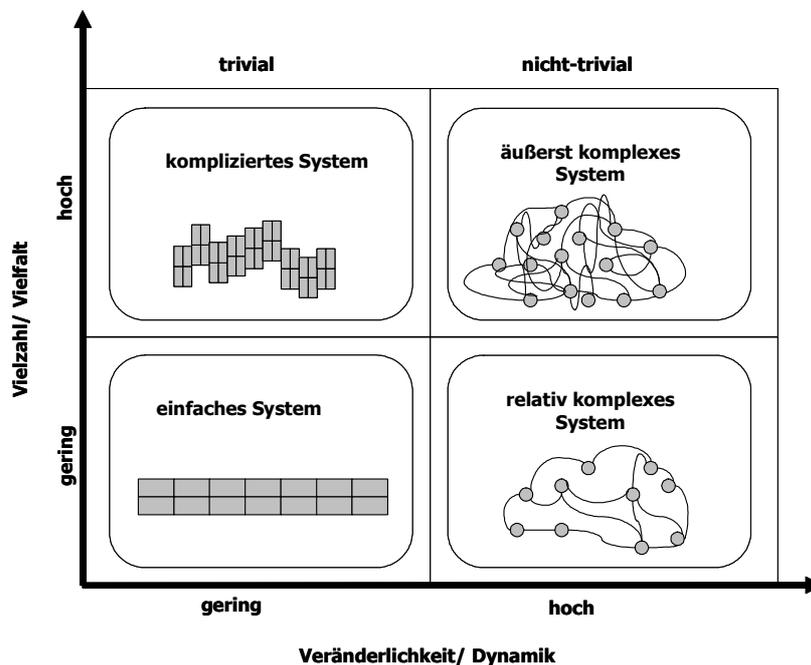


Abbildung 26: Komplexe Systeme und ihre Einflussfaktoren²⁸¹

²⁷⁸ Vgl. Ashby (1974), S. 98

²⁷⁹ Vgl. Kirchof (2003), S. 18f.

²⁸⁰ Vgl. Kirchof (2003), S. 18f.

²⁸¹ Grossmann (1992), S. 18f.; Schlange (1994), S. 4

Wie in Abbildung 26 ersichtlich, werden vier grundsätzliche Systemtypen unterschieden:

- **Einfache Systeme** bestehen aus einer geringen Anzahl an Elementen und Relationen. Der Verlauf ihres Verhaltens unterliegt nur geringen Variationen. Einfache Systeme stellen, was ihre Kontrolle betrifft, keine großen Probleme dar.²⁸² Einfache Systeme auf den Materialfluss bezogen könnten z. B. rein linear ablaufende Materialflusssysteme sein, in denen nur sehr wenige Produktvarianten gefertigt werden und in dem keine verfahrenstechnische Restriktionen vorliegen. Alle Zusammenhänge im Materialflusssystem sind klar und transparent.
- Im Gegensatz dazu stehen die **komplizierten Systeme** mit einer hohen Anzahl an unterschiedlichen (variantenbildenden) Elementen und Relationen. Das Verhalten der komplizierten Systeme erfolgt nach erkennbaren Mustern.²⁸³ Komplizierte Systeme auf den Materialfluss bezogen können unterschiedliche Materialflussverläufe aufweisen z. B. eine konvergierende und lineare Struktur. In diesen Systemen wird zwar eine hohe Produktvielfalt gefertigt, aber es sind alle Zusammenhänge zwischen den Systemvariablen und Restriktionen bekannt. Das Verhalten des Systems kann aus Vergangenheitswerten bzw. aus der Erfahrung heraus prognostiziert werden.

Die komplexen Systeme lassen sich in relativ und äußerst komplexe Systeme unterscheiden:

- Die **relativ komplexen Systeme** haben ähnlich den einfachen Systemen wenig Elemente und Relationen, sind dadurch noch logisch überschaubar. Sie unterscheiden sich jedoch stark in den Wirkungsläufen, denn diese sind unmittelbar nicht mehr vorhersehbar.²⁸⁴ Dadurch werden sie auch nur mehr schwer beherrschbar. Relative komplexe Materialflusssysteme weisen z. B. eine geringe Produktvielfalt auf und wenige Zusammenhänge zwischen den Systemelementen. Wirkungsverläufe in diesem System sind aber nicht prognostizierbar, sie folgen keinem Muster. Daher ist ein Verständnis für das System zu entwickeln, wie von Towill²⁸⁵ und Burbidge²⁸⁶ im „law of connectance“ gefordert, schwierig umzusetzen.
- Bei **äußerst komplexen Systemen** ist es schlussendlich nicht mehr möglich alle Parameter zu erfassen.²⁸⁷ Mehrere Prozesse laufen abhängig oder unabhängig voneinander ab. Das bedingt, dass oft kleine Ursachen eine Kettenreaktion von Ereignissen bewirken, die große Auswirkungen haben. Diese Effekte werden auch als „Synergie-“, „Wetter-“ oder als „Schmetterlingseffekte“ bezeichnet. Sie beschreiben die Nichtlinearität von komplexen Systemen.²⁸⁸ Äußerst komplexe Materialflusssysteme sind sehr große Systeme, in denen alle möglichen Formen der Materialflusstruktur auftreten können, in denen eine hohe Produktvielfalt herrscht, in denen viele Systemparameter und Restriktionen vorliegen. In diesen Systemen sind nicht mehr alle Variablen (Elemente des Materialflussystems, Restriktionen etc.) erfassbar. Damit sind keine Wirkungsverläufe mehr prognostizierbar oder Zusammenhänge einfach, z. B. in der Produktion, erkennbar.

²⁸² Vgl. Malik (1998), S. 5

²⁸³ Vgl. Kirchhof (2003), S. 19

²⁸⁴ Vgl. Bliss (1998), S. 7f.

²⁸⁵ Vgl. Towill (1999), S. 11

²⁸⁶ Vgl. Burbidge (1985), S. 23

²⁸⁷ Vgl. Grossmann (1992), S. 19f.

²⁸⁸ Vgl. Warnecke (1993), S. 136ff.

Auch Towill²⁸⁹ greift einige Charakteristika von komplexen Systemen auf, welche er aufgrund der geleisteten Grundlagenarbeit von Forrester in diesem Feld „Forrester Complexity Paradigm“ nennt. Dazu zählen u. a.:

- Komplexe Systeme reagieren oft auf eine Strategieänderung langfristig anders als in einem kurzfristigen Zeitraum.
- Ursache und Wirkung in komplexen Systemen in Zeit und Raum sind nicht eng miteinander verwandt.

Zusammengefasst kann man feststellen, dass die Beziehungen in einem komplizierten System durchdringbar und bewertbar sind, in einem komplexen System sind die Beziehungen dagegen meistens nichtlinear und Zusammenhänge schwer erkennbar; komplexe Systeme verhalten sich anders als die Summe ihrer Teile. Diese Erkenntnis hat auch schon Burbidge 1985 in seinem „Law of Gestalt“ für Fertigungssysteme angeführt. Daraus lässt sich ableiten, dass die meisten Fertigungssysteme wahrscheinlich komplexe Systeme sind und damit auch die Produktionssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie. Um diese Aussage zu verifizieren werden aber noch weitere Grundlagen zum Thema Komplexität und komplexe Systeme benötigt, z. B. ist eine genaue Analyse der möglichen Eigenschaften komplexer Systeme wichtig, um Vorgänge und Eigenschaften in realen Systemen verstehen zu können. Daher beschäftigen sich die folgenden zwei Abschnitte damit. Ab Abschnitt 4.5 werden gezielt Komplexitätsarten und -eigenschaften im Materialfluss der Stahl- und Feuerfestindustrie erörtert.

4.3 Eigenschaften komplexer Systeme

Im Folgenden werden typische Charakteristika komplexer Systeme erläutert, welche im Anschluss (Abschnitt 4.5) versucht werden auf die Stahl- und Feuerfestindustrie zu übertragen.

- **Offenes System:** Komplexe Systeme sind üblicherweise offene Systeme d. h. sie befinden sich in einem Nichtgleichgewicht. Es gibt aber Ausnahmen, wie z. B. geschlossene Systeme im Gleichgewicht. Diese können auch komplexe Phänomene zeigen, und zwar genau zu jenem Zeitpunkt, „wenn sie einen Phasenübergang von einem geordneten zu einem ungeordneten oder weniger geordneten Zustand durchlaufen“.²⁹⁰ Der dänische Physiker Per Bak²⁹¹ ist der Meinung, dass sich Systeme im Nichtgleichgewicht von selbst auf kritische Punkte zu bewegen und dadurch ohne äußeres Zutun komplex werden.
- **Nichtlinearität:** Für chaotisches und komplexes Verhalten ist Nichtlinearität die Voraussetzung. Die Ursache und Wirkung stehen in keinem einfachen, linearen Zusammenhang, sondern es gilt eine komplizierte, häufig exponentielle Abhängigkeit:

$$f(x) = a \cdot \exp(x)$$

²⁸⁹ Vgl. Towill (1999), S. 10

²⁹⁰ Vgl. Richter, Rost (2004), S. 30f.

²⁹¹ Vgl. Per Bak (1996)

Schon eine kleine Änderung von x hat eine exponentiell große Wirkung.²⁹² Somit führen schon kleine Unterschiede in Anfangsbedingungen von komplexen Systemen zu unterschiedlichen Ergebnissen.

- **Emergenz:** Richter und Rost²⁹³ bezeichnet Emergenz als die „Eigenschaften eines komplexen Systems, die seine Einzelteile nicht besitzen und die erst durch das Zusammenwirken der Einzelteile (Agenten) entstehen. Agenten sind autonome, miteinander wechselwirkende oder kooperierende Elemente eines komplexen Gesamtsystems“. Bliss²⁹⁴ erläutert dazu, dass in komplexen Systemen durch die hohe Interaktion der Elemente aufstrebende (emergierende) Verhaltensmuster entstehen. Diese Verhaltensmuster können nicht aus Verhaltensmustern bzw. Eigenschaften der Systemelemente oder Subsysteme abgeleitet werden. Es sind nicht prognostizierbare, überraschende auftretende Verhaltensmuster, welche sich aus der Gesamtheit der Elemente, Beziehungen und Wechselwirkungen ergeben.
- **Selbstorganisation:** Die Interaktion von Teilen eines Gesamtsystems führt von selbst und ohne äußeres Zutun zu Erscheinungsformen (z. B. Mustern oder Strukturen), die neuen (emergenten) Ordnungsprinzipien unterliegen. Das Gesamtsystem verhält sich organisierter und geordneter, als es die Gesetze, die das Verhalten der einzelnen Agenten bestimmen, vorschreiben würden. Die dafür verantwortlichen Ordnungsprinzipien sind bisher nur teilweise entschlüsselt worden.²⁹⁵ Man versteht unter Selbstorganisation daher Prozesse, die fern vom Gleichgewicht beginnend, durch systemimmanente Kräfte zu komplexeren Ordnungsstrukturen führen.²⁹⁶ Die durch Wechselwirkungen der Bestandteile neu entstandene Qualität der emergenten Struktur lässt sich nicht auf seine ursprünglichen Bestandteile reduzieren. Nicht jeder emergente Vorgang muss bereits ein Vorgang der Selbstorganisation sein.²⁹⁷
- **Selbstorganisierende Kritizität:** In komplexen Systemen liegt die Vermutung nahe, dass sie „entweder nahe dem Chaos operieren oder sich in kritischer Balance zwischen Ordnung und Unordnung bewegen“. Systeme können den kritischen Zustand leicht durch Regulation von außen erreichen und dort verharren. Für Systeme, die nicht von außen gesteuert werden ist die selbstorganisierende Kritizität das Motiv der Bewegung am Rand des Chaos.²⁹⁸ Bak und Chen²⁹⁹ argumentieren, dass ausgedehnte Systeme im Nichtgleichgewicht dazu neigen, „sich von selbst und ohne äußeres Zutun in einen kritischen Zustand fern von einer stabilen Gleichgewichtslage entwickeln. Dieser Zustand erfolgt selbstorganisierend als Folge der Interaktion der vielen Bestandteile (Agenten)“. Selbstorganisierende Kritizität nach Kirchoff³⁰⁰ „beschreibt den Zustand, in den sich komplexe Systeme durch Selbstorganisation bringen, der aber gerade noch stabil ist, im nächsten Augenblick aber schon in die totale Unordnung umschlagen kann. Selbstorganisierende Kritizität am Rande des Chaos bedeutet dann, dass selbst geringste Ereignisse und Entwicklungen Systemreaktionen auslösen können, mit denen angesichts des auslösenden Faktors nicht zu rechnen war.“

²⁹² Vgl. Richter, Rost (2004), S. 6f.

²⁹³ Vgl. Richter, Rost (2004), S. 122

²⁹⁴ Vgl. Bliss (2000), S. 25f.

²⁹⁵ Vgl. Richter, Rost (2004), S. 28ff.

²⁹⁶ Vgl. Ebeling (1994), S. 30ff.

²⁹⁷ Vgl. Liening (1999), S. 52ff.

²⁹⁸ Vgl. Richter, Rost (2004), S. 55

²⁹⁹ Vgl. Bak, Chen²⁹⁹ (1991), S. 26

³⁰⁰ Kirchoff (2003), S. 26

- **Negative/Positive Rückkopplung**³⁰¹: Systeme sind in der Lage, sich durch Rückkopplung (negativ) in einem stabilen Zustand zu bringen. Diese Form der Selbstregulation nennt man auch Homöostase. Positive Rückkopplungen bringen dagegen das System aus dem Gleichgewicht.³⁰²
- **Autopoiese**: Der Begriff der Autopoiese lebender Systeme beschreibt nach Maturana und Varela³⁰³ eine Dynamik der Selbstorganisation und Selbsterschaffung allen Lebens von der Zelle bis zum menschlichen System, nach der „Lebewesen sich [...] zugleich verwirklichen und sich selbst spezifizieren.“ Das Selbstwachstum definiert den Prozess der ständigen Reproduktion der Elemente eines komplexen Systems und deren Eingliederung ins System.³⁰⁴ Hierzu vergleiche auch Maturana und Varela.³⁰⁵
- **Ko-evolution**: Systeme wirken auf die Umwelt, diese wirkt aber auch auf sie zurück. Damit kommt es nicht nur zu Veränderungen im komplexen System, sondern es wird auch die spezifische Umwelt durch die Wechselwirkungen verändert.³⁰⁶
- **Pfadabhängigkeit**: Das Verhalten des Systems ist nicht nur von den aktuellen Gegebenheiten sondern auch von der Vorgeschichte abhängig. Komplexe Strukturen und die Ausbildung komplexer Dynamik setzen immer eine Vorgeschichte voraus. Sie sind das Resultat des Zusammenwirkens sowie der Rückkopplung der Einzelteile und der daraus entstehenden Strukturen und Hierarchien.³⁰⁷ Dynamische Systeme haben eine Geschichte, die sowohl das momentane als auch das in Zukunft auftretende Verhalten beeinflusst.³⁰⁸
- **Attraktoren**: Komplexe Systeme weisen Attraktoren auf, d. h. das System strebt zu einem oder mehreren bestimmten Zuständen.³⁰⁹ Attraktoren sind ein mathematischer Begriff für Zustände, in denen sich komplexe Systeme je nach ihren Eigenschaften irgendwann einpendeln.³¹⁰

Einige der genannten Eigenschaften sind auf die industrielle Praxis direkt übertragbar. Andere Eigenschaften wird man sich lediglich im Zuge von Analogieschlüssen oder im Rahmen der Anwendung von Prinzipien erschließen können, weil v. a. die kybernetischen und chaostheoretischen Begriffe sich auf deterministische Systeme beziehen. Da eine Supply Chain bzw. ein Unternehmen aber stochastischen Zusammenhängen unterliegen, wird zum Teil eine 1:1 Übertragung nicht ohne weiteres möglich sein. So lässt sich z. B. ein Unternehmen nicht im klassischen Sinne regeln, sehr wohl kann man aber den Materialfluss durch Anwendung regelkreisähnlicher Strukturen, wie Kanban³¹¹, steuern.

³⁰¹ „Rückkopplungseffekte („feedback loops“) beschreiben ein Systemverhalten, bei dem sich die Ausgangsgrößen einer Systembeeinflussung als Eingangsgrößen nachfolgender Systemkonfigurationen innerhalb des Systems fortsetzen“, Bliss (2000), S. 25

³⁰² Vgl. Kirchhof (2003), S. 22

³⁰³ Vgl. Maturana, Varela (1987), S. 56

³⁰⁴ Vgl. Kirchhof (2003), S. 23

³⁰⁵ Maturana, Varela (1980)

³⁰⁶ Vgl. Waldrop (1993), S. 103ff.

³⁰⁷ Vgl. Richter, Rost (2004), S.26ff; Kirchhof (2003), S. 22ff.

³⁰⁸ Vgl. Liening (1998) S. 49

³⁰⁹ Vgl. Briggs, Peat (1993), S. 41ff.

³¹⁰ Vgl. Lewin (1993), S. 34

³¹¹ Vgl. Geiger, Hering, Kummer (2000), S. 1ff.

Mehrstufige Supply Chains sind typische Netzwerke, in denen Eigenschaften komplexer Systeme zu finden sind. Die Prognostizierbarkeit von Ereignissen, Verläufen in der Supply Chain sind oft nicht exakt bestimmbar durch z. B. emergenten Verhaltens bestimmter Teile, Partner in der Kette wie beim Bullwhip-Effekt. Im Einzelnen wird auf diese Eigenschaften im Materialflusssystem in der Stahl- und Feuerfestindustrie nach der Beschreibung der Komplexitätsarten eingegangen, um alle Erscheinungsformen von Komplexität für den Materialfluss berücksichtigen zu können

4.4 Komplexitätsarten im Unternehmen

Um bei der anschließenden Untersuchung von Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie alle wesentlichen Aspekte zu beachten, soll an dieser Stelle noch kurz auf die typischen Arten von Komplexität im Unternehmen eingegangen werden. Bei Kirchhof³¹² werden Komplexitäten zunächst grundlegend in zwei große Gruppen geteilt, denen alle anderen Arten von Komplexitäten untergeordnet werden:

- Die **strukturelle Komplexität** beschreibt die Strukturdimension eines Systems. Sie wird auch Komplexität im engeren Sinn oder objektive Komplexität genannt. Die strukturelle Komplexität drückt die potenzielle Variationsfähigkeit eines Systems durch Bereithalten von Reaktionsmöglichkeiten auf die Umweltvarietät in Form von Systemstrukturen aus. Das heißt, mit struktureller Komplexität werden einzelne Elemente in Systemen angesprochen. In diesen Systemen stehen die Elemente in einer definierten Beziehung („Relation“) zueinander und sind so eng miteinander verflochten. Art und Weise der Verflechtung entsprechen der Struktur und der sich daraus ergebenden Ordnung.
- Die **funktionale Komplexität** beschreibt im Gegensatz dazu das Verhalten des Umgangs mit Komplexität. Diese Komplexität wird im weiteren Sinn auch subjektive Komplexität genannt. Durch situationsabhängige Reaktion der handelnden Personen auf geänderte Umweltkomplexitäten, stellt sich so eine situative Variationsfähigkeit eines Systems ein. Die Herausforderung, die dabei sowohl für einen Beobachter als auch einen Entscheidungsträger besteht, ist eine ganzheitliche Erfassung des Problems. Problemerkennung heißt Beurteilung der Lage, Fassung eines Entschlusses, Bestimmung der aus dem Entschluss resultierenden Maßnahmen zur Problembeseitigung und die Planung der dafür notwendigen Ressourcen.

Für die konkrete Analyse und Gestaltung komplexer Systeme in der Logistik sind beide Dimensionen relevant. Daher soll an dieser Stelle noch genauer auf beide Arten eingegangen werden.

³¹² Vgl. Kirchhof (2003), S. 38ff.

4.4.1 Strukturelle Komplexität

Die exogenen Komplexitätstreiber, Marktkomplexität und die Gesellschaftskomplexität, bilden die strukturelle Umweltkomplexität eines Unternehmens. Dazu zählen folgende Unterkategorien:³¹³

Marktkomplexität (Unternehmen kann direkt oder indirekt Einfluss auf die komplexitätsbestimmenden Faktoren nehmen):

- Nachfragerkomplexität: Unterschiedlichkeit der Nachfragenden in räumlicher, zeitlicher, monetärer und funktionaler Sicht
- Wettbewerbskomplexität: Kennzeichnung der Zahl, Macht, Preise und Produkte der Wettbewerber, die Marktgegebenheiten und die Intensität und Veränderlichkeit dieser Parameter
- Beschaffungskomplexität: Abbildung von Lieferantenbeziehungen und Beschreibung von Verfügbarkeit von Potenzialen nach bestimmten Kriterien

Gesellschaftskomplexität (kann durch das Unternehmen in der Regel nicht beeinflusst werden):

- Komplexität der politischen und wirtschaftlichen Systeme
- Rechtssysteme
- ökologische und kulturelle Faktoren

Durch diese exogenen Treiber wird „ein bestimmtes Maß an externer Komplexität vorgegeben, dem das Unternehmen als Akteur am Markt und in der Gesellschaft entsprechen muss, um zu überleben. Diese Entsprechung wird durch die endogene Unternehmenskomplexität sichergestellt“.³¹⁴

Korrelierte Unternehmenskomplexität (bringt Nutzen für das Unternehmen, verursacht aber auch Kosten):

- Kundenstrukturkomplexität: Anzahl heterogener Kunden, deren Bedürfnisse und gewünschte Leistungen
- Programmkomplexität: Sortimentsbreite und Variantentiefe
- Produktkomplexität: Vielzahl und Vielfalt an Materialien, Teilen, Baugruppen und gekoppelten Serviceangeboten
- technologische Komplexität: Verfügbarkeit und die Voraussetzungen der Verfügbarkeit von Technologien, deren Entwicklung und Wartung etc.

Autonome Unternehmenskomplexität (in dem Maß, wie sie die korrelierte Unternehmenspolitik unterstützt, schafft sie einen Nutzen fürs Unternehmen):

³¹³ Vgl. Kirchhof (2003), S. 39ff., Bliss (1998), S. 5f.

³¹⁴ Kirchhof (2003), S. 38

- Produktionsprogrammkomplexität: Art und Weise der Wertschöpfung, Tiefe der Leistungserstellung
- Prozesskomplexität: Gestaltung der Schnittstellen, Wertschöpfungs- und Unterstützungsprozesse, Prozessfragmentierung etc.
- Organisationskomplexität: Grad der Arbeitsteiligkeit, Verantwortungsaufteilung, hierarchische Struktur, interne und externe Zusammenarbeit
- Komplexität der Informations-, Planung-, Steuerungs- und Kontrollsysteme

Eine exakte Abgrenzung der einzelnen Komplexitätsarten ist nicht umsetzbar, einige Arten überlappen sich, wie z. B. die Nachfragerkomplexität und die Kundenstrukturkomplexität. Manche Komplexitätsarten lassen sich durch geeignete Maßnahmen beeinflussen und reduzieren bzw. können ganz vermieden werden, wie z. B. die Fokussierung auf Kernkompetenzen, dass zu einer Reduzierung der korrelierten Unternehmenskomplexität und autonomen Unternehmenskomplexität führen könnte.

4.4.2 Funktionale Komplexität

„Neben der objektiv strukturellen Komplexität existiert eine subjektive funktionale Komplexität. Sie entsteht aus dem Umgang des Akteurs als Subjekt mit der objektiven Komplexität des Systems“.³¹⁵

- Wahrnehmungskomplexität: Jeder Akteur versucht, durch Interpretation seiner Wahrnehmungen zu Erkenntnissen über das System, die Systeme in der Umgebung, die anderen handelnden Personen und die Umwelt zu gelangen.
- Entscheidungskomplexität: Im Entscheidungsprozess wird bestimmten Informationen eine gewisse Bedeutung zugeordnet und Handlungen aus diesen Erkenntnissen abgeleitet. Entscheidungen bestehen aus Constraints (Festlegung der beobachtbaren Merkmalsausprägungen), Mustern (Zusammenfassung bestimmter Zusammenhänge zur Komplexitätsreduktion) und Modellen (Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozess).
- Handlungskomplexität: „Handlungen sind aus den beschriebenen Wahrnehmungen und den sie interpretierenden Schemata abgeleitete Aktionsalternativen [...]“.³¹⁶

Die Wechselwirkungen zwischen Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungskomplexität werden in Abbildung 27 veranschaulicht.

³¹⁵ Kirchhof (2003), S. 45

³¹⁶ Kirchhof (2003), S. 48

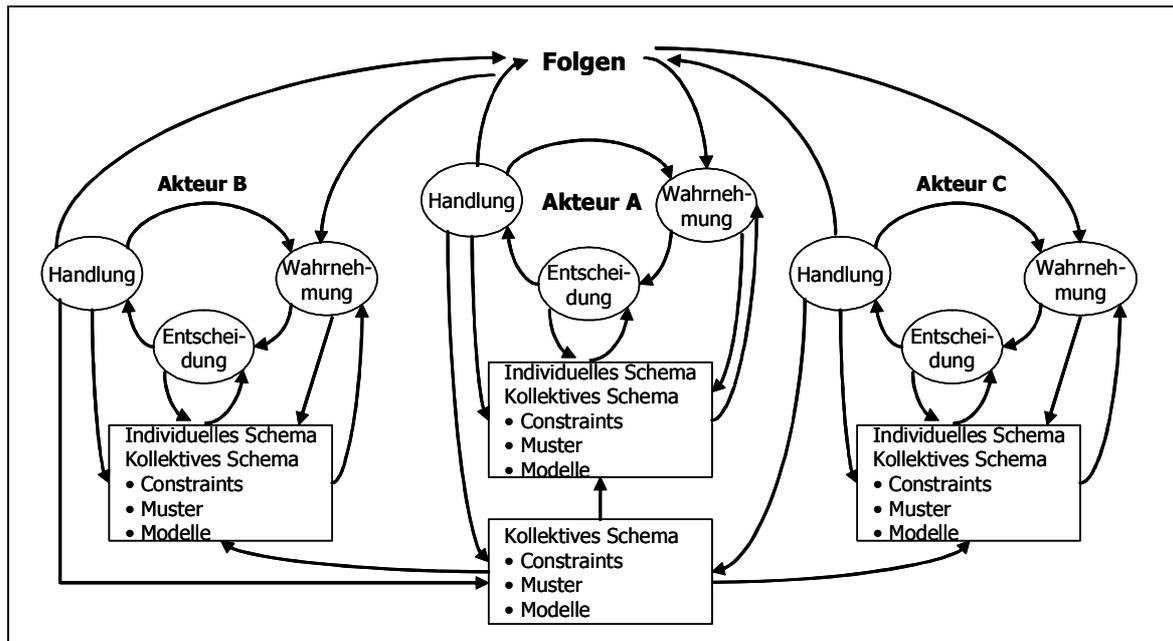


Abbildung 27: Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungskomplexität³¹⁷

Der Umgang mit der Komplexität spielt eine entscheidende Rolle für Komplexitätsbeherrschung im Unternehmen. Die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Wahrnehmung, Entscheidung und Handlung haben einen großen Einfluss auf ein erfolgreiches Komplexitätsmanagement. Auch ist es wichtig zu verstehen, welche Arten der Komplexität im Unternehmen wirken, um geeignete Mittel und Methoden zur Reduktion, Vermeidung bzw. Beherrschung anwenden zu können.

Im Folgenden wird das gewonnene Komplexitätswissen auf Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie übertragen. Komplexitätsausprägungen werden identifiziert und ihre Auswirkungen diskutiert.

4.5 Vergleich komplexer Systeme mit Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie

In der Literatur und in den durchgeführten Interviews mit Experten gibt es unterschiedliche Meinungen zur Komplexität der Materialflusssysteme in der Stahl- und Feuerfestindustrie. Da eine Identifikation dieser Eigenschaften aber die Grundlage für z. B. die Behandlung von Komplexitätskosten darstellt, soll im Folgenden überprüft werden, ob das Materialflusssystem Eigenschaften komplexer Systeme aufweist bzw. welche Arten von Komplexität und Komplexitätstreibern in diesen Branchen typischerweise vertreten sind bzw. vorherrschen.

³¹⁷ Quelle: Kirchhof (2003), S. 48

Zuerst wird versucht, die Eigenschaften komplexer Systeme im Materialfluss der Stahl- und Feuerfestindustrie zu identifizieren (Abschnitt 4.5.1), danach die strukturelle Komplexität im Unternehmen nach Kirchhof auf dieses Branchencluster umzulegen und die häufigsten Komplexitätstreiber zu identifizieren (Abschnitt 4.5.2). Da die funktionale Komplexität vom individuellen Umgang des Akteurs mit der strukturellen Komplexität herrührt, können zu dieser Komplexitätsart keine generellen Aussagen für die Industrien getroffen werden.

4.5.1 Komplexe Eigenschaften im Materialfluss

Towill³¹⁸ und Childerhouse sowie Towill³¹⁹ entwickelten eine Checkliste, mit welcher komplexe Materialflusssysteme diagnostiziert werden können (Tabelle 8). Deren Inhalt und die allgemeinen Charakteristika komplexer Systeme (Abschnitt 4.3) werden herangezogen, um komplexe Eigenschaften im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie zu erörtern.

Checklist of Detailed Symptoms Observed in Complex Flow Systems	
System Complexity Attributes	Likely Symptoms of Complexity
Observed via Dynamic Behaviour	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rogue Seasonalities Induced in Demand Patterns 2. System Behaviour Often Unexpected and Counter-Intuitive 3. Causal Relationships often Geographically Separated 4. Excessive Demand Amplification as orders Passed Upstream 5. Short Term Behaviour at Variance with Long Term Behaviour 6. Poor and Variable Customer Service Levels
Observed via Physical Situation	<ol style="list-style-type: none"> 1. Large and Increasing Number Of Products per Pound Turnover 2. High Labour Content 3. Multiple Production and Distribution Points 4. Large Pools of Inventory Throughout the System 5. Complicated Material Flow Patterns 6. Poor Stores Control
Observed from Organizational Characteristics	<ol style="list-style-type: none"> 1. Decision Making by Functional Groups 2. Excessive Quality Inspections 3. Multiple Independent Informations Systems 4. Overheads and Indirect Costs Allocated Across Product Groups, and Not by Activity 5. Excessive Layers of Management Between CEO and Shop Floor 6. Bureaucratic and lengthy Decision Making Process
Observed via Process Uncertainties	<ol style="list-style-type: none"> 1. Shop Floor Decisions based on Batch-and-Queue 2. "Interference" Between Competing Value Streams 3. Causal Relationships Often Well Separated in Time 4. Failure to Synchronise ALL Orders and Acquisitions 5. Failure to Compress Lead Times 6. Variable Performance in Response to Similar Order Patterns

Tabelle 8: Komplexitätsdiagnosetabelle für Materialflusssysteme³²⁰

³¹⁸ Vgl. Towill (1999), S. 11

³¹⁹ Vgl. Childerhouse, Towill (2003), S. 19

³²⁰ Quelle: Towill (1999), S. 11

Zuerst werden nun die von Towill genannten auftretenden Komplexitätssymptome in bestimmten definierten Systembereichen der Reihe nach behandelt. Einige dieser Symptome lassen sich in Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie beobachten.

Aus der Kategorie „dynamic behaviour“ sind z. B. Nachfrageschwankungen oft in der Stahl- und Feuerfestindustrie zu beobachten³²¹. Zurzeit gibt es zwar einen kontinuierlichen Anstieg aufgrund des Wirtschaftsboom in Asien³²², doch eine exakte Prognose für die langfristige Zukunft ist schwer. Aufgrund der Rohstoffknappheit kommt es auch des Öfteren zu längeren Wartezeiten auf die Endprodukte und damit weisen diese Branchen manchmal einen recht schlechten Kundenservicegrad auf. Materialflusssysteme (innerbetrieblich und überbetrieblich) der Stahl- und Feuerfestindustrie reagieren sehr sensibel auf Störungen. Daher ist es manchmal schwer ihr Verhalten auf Änderungen exakt vorherzusagen.

In der nächsten Kategorie kristallisieren sich für die Stahl- und Feuerfestindustrie vor allem der hohe Umlaufbestand, das weit verstreute Distributionsnetz mit mehreren Stufen (v. a. in der Feuerfestindustrie) und die teilweise komplizierten Materialflussmuster (z. B. umgruppierender Materialflussverläufe verschiedener Produkte³²³) als Symptome heraus.

Unternehmen mit einer Organisationsstruktur, die aus sehr vielen Managementebenen aufgebaut sind, haben viele Schnittstellen. Daher ist in diesen Betrieben oft eine „Trägheit“ bei Entscheidungen festzustellen. Diese Charakteristik wird in der Kategorie „Organisationscharakteristik“ in Tabelle 8 als Komplexitätssymptom angeführt. Die Stahlindustrie z. B. durchläuft einen Wandel hin zu flachen Unternehmenshierarchien³²⁴ um Prozesse etc. zu beschleunigen.

In der Kategorie „Prozessunsicherheiten“ wird z. B. als fünfter Punkt angeführt, dass eine Kürzung der DLZ nicht umsetzbar ist in komplexen Materialflusssystemen. In der Stahl- und Feuerfestindustrie hängt die DLZ stark von verfahrenstechnischen Gründen ab und ist daher oft kaum beeinflussbar.³²⁵ Eine Reduktion der DLZ, z. B. bei einem Brennprozess in der Feuerfestindustrie oder bei einer Sekundärbehandlung in der Stahlindustrie, kann negative Auswirkungen auf die Qualität des Produktes haben.

Die in Abschnitt 4.3 zusammengefassten Eigenschaften komplexer Systeme können sich im Materialfluss der Stahl- und Feuerfestindustrie wie folgt darstellen:

³²¹ Vgl. Europäischer Wirtschafts-, Sozialausschuss (2003), S. 4, Ameling (2006), S. S8

³²² Vgl. Ameling (2006), S. S7

³²³ Vgl. Günther (2004), S. 330

³²⁴ Vgl. Rifkin (2004), S. 124

³²⁵ Vgl. Heidrich (2002), S. 47, Deuse, Deckert (2006), S. 86

Das Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie befindet sich in Wechselwirkung mit seiner Umwelt und stellt kein isoliertes, geschlossenes System dar. Daher kann von einem offenen System ausgegangen werden und damit ist eine typische Eigenschaft komplexer Systeme erfüllt. Kirchhof³²⁶ erläutert dazu, dass „Unternehmen nur durch Austausch von Leistungen und Informationen ihren Unternehmenszweck erfüllen können“ und Siegler³²⁷ stellt fest, dass Unternehmen prinzipiell offene Systeme gegenüber der Umwelt sind.

Die Nichtlinearität kann meistens auch als erfüllt angesehen werden. Kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen können oft große Auswirkungen haben. So können z. B. kleine Abweichungen in der Rohstoffqualität dazu führen, dass die Rezeptur geändert werden muss³²⁸ und damit Abweichungen in allen Produktionsschritten auftreten können. Je nach Zusammensetzung der Güter (Stahl- bzw. Feuerfestprodukt) müssen bestimmte Temperaturregulationen bei den Brennaggregaten, Lossequenzen etc. eingehalten werden.³²⁹ Es müssen oft bestimmte Transportbehälter benutzt werden³³⁰ und vieles mehr. Daher können schon kleine Änderungen in der Ausgangssituation zu großen Änderungen im Materialfluss führen.

Die Ko-evolution kann auch im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie beobachtet werden. Die gegenseitige Beeinflussung der Industrie und ihrer Umwelt findet sich z. B. bei der spezifischen Entwicklung von Gütern, Transportmittel oder Transportmechanismen aufgrund von Kundenforderungen wieder, aber auch bei der Anpassung von hergestellten Fabrikaten der Kunden auf die mit bestimmten Spezifikationen bezogenen Waren der Lieferanten (Stahl- und Feuerfestindustrie). Die kundenspezifische Fertigung wird häufiger vorkommen als die Adaption der Fabrikate.

Bei emergenten Eigenschaften im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie sollte man zwischen innerbetrieblichen und überbetrieblichen System unterscheiden, da im überbetrieblichen System eine emergente Charakteristik aufgrund der vielen Stufen und Partner oft stärker ausgeprägt sein kann als im innerbetrieblichen Materialflussbereich. Den Bullwhip-Effekt kann man z. B. als eine emergente Eigenschaft der Supply Chain interpretieren. Dieser Effekt, der u. a. durch die Wechselwirkung der einzelnen Partner miteinander entsteht, wird meistens nicht im innerbetrieblichen Materialflusssystem der einzelnen Supply Chain Glieder existieren. Intransparenz in der Supply Chain kann das Aufkommen von emergenten Eigenschaften fördern, da Ursache und Wirkung von bestimmten Ereignissen oft nicht durchblickbar für die einzelnen Stufen sind.

³²⁶ Kirchhof (2003), S. 35

³²⁷ Vgl. Siegler (1999), S. 24

³²⁸ Vgl. Rutten (1993), S. 363f.

³²⁹ Vgl. Heidrich (2002), S. 47

³³⁰ Vgl. Spengler et al. (2007), S. 51

Selbstorganisierende Kritizität bedeutet, dass geringe Ereignisse unabsehbare innerbetriebliche Systemreaktionen auslösen können. Diese Charakteristik komplexer Systeme ist eher selten in Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie auffindbar. Prozesssicherheit wird sehr groß geschrieben³³¹ und Reaktionen innerhalb der Produktionssysteme auf bestimmte Ereignisse sind oft gut bekannt. Aber Ausnahmen sind die Regel, und wie schon erwähnt, können Materialflusssysteme recht sensibel auf Änderungen reagieren und damit zu Problemen im Prozessablauf führen.

In der Supply Chain ist selbstorganisierende Kritizität aber meistens gut beobachtbar, da Transparenz oft nicht vorherrscht und damit die Folgen von Änderungen im Materialfluss eines Gliedes unvorhergesehene Auswirkungen auf nachfolgende Supply Chain Partner haben kann.

Die Diagnosetabelle nach Towill als auch die Überlegungen zu den einzelnen Eigenschaften komplexer Systeme ergeben, dass Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie komplexe Gegebenheiten und Symptome aufweisen. Diese sollen nun um Komplexitätsarten in den Branchen ergänzt werden, um im Anschluss Komplexitätstreiber im Materialflusssystem des Branchenclusters erarbeiten zu können und Maßnahmen zur Reduktion dieser anzuführen.

4.5.2 Komplexitätsarten und -treiber im Unternehmen

Dieses Kapitel beschäftigt sich zuerst mit den Ausprägungen der strukturellen Komplexität in Unternehmen der Stahl- und Feuerfestindustrie. Wie bereits in Kapitel 4.4 erläutert, entsteht die strukturelle Komplexität durch Markt-, Gesellschafts-, korrelierte Unternehmens-, und autonome Unternehmenskomplexität. Diese Kategorien sollen nun mit Gegebenheiten im Materialflusssystem der Feuerfest- und Stahlindustrie verglichen werden. Anschließend werden die häufigsten Komplexitätstreiber der Stahl- und Feuerfestindustrie aus den beschriebenen Komplexitätsgegebenheiten im Materialflusssystem abgeleitet und genauer erläutert.

Marktkomplexität

Die Unterschiedlichkeit der Märkte, der Nachfragenden und ihrer Präferenzen kann in den beiden Branchen hoch sein, damit verbunden ist auch die große Produktvielfalt in der Stahl- und Feuerfestindustrie (in der Stahlindustrie vom einfachen Baustahl bis hin zu der Autotür aus hochlegierten, nachbearbeiteten Stahl; in der Feuerfestindustrie von einem ungeformten Standardprodukt bis hin zu schmelzgegossenen Spezialanfertigungen).

³³¹ Vgl. Winterhalder (2006), S. 62ff.

So bietet z. B. einer der weltweit größten Feuerfestkonzerne eine Anzahl an Endartikel im oberen dreistelligen tausender Bereich an³³².

Der Markt in diesen Branchen unterliegt starken Schwankungen. Die große Konkurrenz und die Schwankungen bei dem Bedarf der größten Abnehmer, z. B. der Stahlindustrie und der Baubranche³³³ führen zu einer entsprechenden Wettbewerbskomplexität.

Im Gegensatz zur der Nachfrager- und Wettbewerbskomplexität ist die Beschaffungskomplexität in der Stahl- und Feuerfestindustrie meistens am stärksten ausgeprägt. Die Verfügbarkeit von Rohstoffen, die Mitbewerber um diese, schwankende Preise und der komplizierte und lange Transport stellen hohe Anforderungen an die Planung und Ausführung (siehe Abschnitt 3.4.1). Die Materialflusstrukturen müssen immer effizienter gestaltet werden, um sich gegen Mitbewerber behaupten zu können.

Gesellschaftskomplexität

Da viele Unternehmen Standorte weltweit betreiben³³⁴, spielt diese Form der Komplexität oft eine wichtige Rolle in diesen Branchen. Die Unternehmen werden mit unterschiedlichen politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Systemen konfrontiert und müssen ihre Unternehmensgegebenheiten an das jeweilige Land abstimmen. Die Organisation der Beschaffung, Produktion und Distribution unterliegt neben kulturellen Faktoren auch bestimmten ökologischen Auflagen. Prozessabläufe müssen gegebenenfalls angepasst bzw. verfahrenstechnische Alternativen gesucht werden.

Korrelierte Unternehmenskomplexität

In diesem endogenen Komplexitätstreiber spielt die Dimension der technologischen Komplexität für die Stahl- und Feuerfestindustrie die wesentlichste Rolle aufgrund der zahlreichen technologischen Restriktionen³³⁵ im Produktionsablauf, z. B. bei der Lossequenzplanung oder der Rüstfamiliengruppierung. Die Kundenstrukturkomplexität ist meistens eher gering aufgrund oft gleich bleibender Industriekunden (viele Stammkunden aus bestimmten Branchen³³⁶) und ihre Wünsche. Die große Sortimentsbreite, die in den meisten Werken vorherrscht, trägt oft zu dem hohen Aufwand bei der Planung und Steuerung der Flüsse bei (Programmkomplexität). Aber auch die Produktkomplexität sollte nicht vernachlässigt werden, da eine Reihe an Serviceleistungen oft mit den Produkten verbunden sind.

³³² Vgl. RHI (2005), S. 12

³³³ Vgl. RHI (2005), S. 6

³³⁴ Vgl. RHI (2005), S. 5, Köhler (2006), S. 94ff.

³³⁵ Vgl. Heidrich (2002), S. 47, Oloff (2005), S.64f., Deuse, Deckert (2006), S. 86, Oloff (2006), S. 74f., Schemme (2006), S. 79

³³⁶ Vgl. RHI (2005), S. 6, Lungen, Steffen (2006), S. S94

Autonome Unternehmenskomplexität

Die Produktionsprogrammkomplexität kann zwischen den Werken variieren aufgrund unterschiedlicher Tiefe der Leistungserstellung. Die Prozesskomplexität, welche u. a. die zeitliche, räumliche, quantitative und qualitative Synchronisation determiniert, ist in beiden Branchen oft aufgrund von Prozessrestriktionen³³⁷ stark ausgeprägt. Auch die nächsten beiden Differenzierungsarten der autonomen Unternehmenspolitik: Organisationskomplexität und Komplexität der Informations-, Planungs-, Steuerungs- und Kontrollsysteme treten in diesen Branchen immer wieder auf.

Es wird nun detaillierter auf die genannten Komplexitätstreiber bzw. auf Erweiterungen dieser eingegangen: Abbildung 28 konkretisiert weitere Komplexitätstreiber (bzw. zeigt übereinstimmende Treiber mit der besprochenen strukturellen Komplexität im Unternehmen auf), welche sich in unterschiedlicher Intensität auf alle bzw. einige Bereiche auswirken. Diese Übersicht möglicher Komplexitätstreiber im Unternehmen wird in Verbindung mit den vorhin identifizierten Komplexitätsausprägungen im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie aufgegriffen und übereinstimmende Komplexitätstreiber nun detailliert erläutert.

Komplexitätstreiber			
Markt	Unternehmen		
	Strukturbezogen	Informations- und Kommunikationsbezogen	Personalbezogen
<ul style="list-style-type: none"> • Vielfalt kundenseitiger Anforderungen • Globalisierung • Dynamik der Märkte • Größe des Sortiments • Kundenanzahl • Länderspezifika • Nachfrageschwankungen • Lieferantenvielfalt • Rohstoffknappheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionsorientierung • Vielzahl an Hierarchieebenen • Schnittstellendichte • Länge der Entscheidungsprozesse • Übermaß an Kontrollinstanzen • Trennung von Aufgabe, Verantwortung und Kompetenz • Unnötige produktbezogene Vielfalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Hochgradiges Bringprinzip • Informationsasymmetrie • Medienbrüche • IuK System Misfit • Ausprägung des Formularwesens 	<ul style="list-style-type: none"> • Machtstreben • Bereichsegoismus • Abschiebung von Verantwortung • Mangel an Sozial- und Fachkompetenz • Mangel an Motivation und Identifikation mit Unternehmenszielen • Negative Emotionen • Interkulturelle Probleme

Abbildung 28: Mögliche Komplexitätstreiber im Unternehmen³³⁸

Folgende Komplexitätstreiber finden sich oft in den Ausprägungen der Unternehmen der Stahl- und Feuerfestindustrie wieder:

³³⁷ Vgl. Heidrich (2002), S. 47, Oloff (2005), S.64f., Deuse, Deckert (2006), S. 86, Oloff (2006), S. 74f., Schemme (2006), S. 79

³³⁸ Quelle: Wildemann (1999), S. 32

Die Globalisierung hat einen höheren Wettbewerbsdruck in die Stahl- und Feuerfestindustrie gebracht.³³⁹ Die effiziente Gestaltung der Materialflüsse innerbetrieblich und überbetrieblich ist notwendig, um konkurrenzfähig zu bleiben. Selbstorganisierende Kritizität oder neue emergente Eigenschaften können z. B. Folgen dieser fortschreitenden Globalisierung und der damit oft verbundenen Vergrößerung der Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und/oder Entsorgungsnetzwerke sein.

Durch starkes Wachstum im Bereich der Stahl- und Feuerfestindustrie kommt es immer wieder zu einer Verknappung bei Rohstoffen.³⁴⁰ Diese Entwicklung führte zu einer großen Komplexitätssteigerung im Bereich der Beschaffung und des Einkaufes (Beschaffungskomplexität und Wettbewerbskomplexität). Nach Wildemann können die Komplexitätstreiber Rohstoffknappheit sowie die Dynamik der Märkte an dieser Stelle als Komplexitätstreiber angeführt werden.

Auch werden durch die ständig steigenden Anforderungen an den Werkstoff Stahl oder die Eigenschaften feuerfester Produkte (Komplexitätstreiber: Vielfalt an Produktanforderungen), die Anforderungen an die Rohstoffe höher. Wenn die Nachfrage aber schon größer ist als das Angebot ist der Wunsch nach optimalen Rohstoffen eine weitere Schwierigkeit im Materialflusssystem. Ewers³⁴¹ meint dazu, „dass der Stahl von heute der Schrott von morgen ist.“

Wie auch in der korrelierten Unternehmenskomplexität erwähnt, ist die Sortimentsbreite ein nicht zu unterschätzender Komplexitätsfaktor für die Materialflussplanung und -steuerung in der Stahl- und Feuerfestindustrie. Jede neue Variante bedeutet oft einen modifizierten Materialflussablauf und neue Restriktionen für das System. Eine unnötige produktbezogene Vielfalt stellt eher die Ausnahme aufgrund der komplexen Abläufe für jede Variante dar.

Towill³⁴² führte als Merkmal komplexer Materialflusssysteme u. a. Bürokratie (viele Schnittstellen), lange Entscheidungsprozesse und viele Hierarchiestrukturen an, welche auch Wildemann als Komplexitätstreiber aufgreift. Diese sind auch typische Eigenschaften vieler Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie. Diese Charakteristika haben auch einen großen Anteil an der autonomen Unternehmenskomplexität der Stahl- und Feuerfestindustrie.

Informationssymmetrie ist ein entscheidender Faktor zur Schaffung von Transparenz im Materialfluss und Reduktion der autonomen Unternehmenspolitik oder z. B. selbstorganisierender Kritizität.

³³⁹ Vgl. Baumgartner (2006), S. 73

³⁴⁰ Vgl. Gronwald, Uhlig (2006), S. 21, Martens (2006), S. 82

³⁴¹ Ewers (2003), S. 50

³⁴² Vgl. Towill (1999), S. 11f.

Zusammengefasst unterliegt die Stahl- und Feuerfestindustrie, wie viele andere Industriearten auch, bestimmten Komplexitätstreibern. Mit punktuellen Maßnahmen ist der Komplexität meistens nicht beizukommen. Ein durchgängiges Komplexitätsmanagement ist erforderlich,³⁴³ da die Komplexitätstreiber zu steigenden Komplexitätskostenverläufe im Unternehmen führen. Die häufigsten Komplexitätstreiber: Globalisierung, Rohstoffknappheit, Dynamik der Märkte, Vielfalt and Produkthanforderungen, Sortimentsbreite, Bürokratie, lange Entscheidungswege, viele Hierachiestufen und Informationsasymmetrie wurden identifiziert und erläutert. Die festgestellten Komplexitätstreiber dienen im Abschnitt 4.7 als Basis zur Erörterung der Komplexitätskosten.

Maßnahmen zur Reduktion, Vermeidung bzw. Beherrschung der Komplexität bzw. Komplexitätstreiber im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie werden im nächsten Abschnitt erörtert. Denn je komplexer ein Materialflusssystem ist, desto kostenintensiver ist es meistens aufgrund des erhöhten Aufwandes bei der Planung, Steuerung etc. Die angeführten Vorschläge zur Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung in Abschnitt 3.5 tragen zu einer Reduktion von Komplexität natürlich auch bei.

4.6 Komplexitätsmanagement im Materialflusssystem

In diesem Abschnitt soll auf die Möglichkeiten zur Komplexitäts(treiber)beherrschung bzw. -reduktion oder -vermeidung eingegangen werden. Instrumente und Methoden zum Komplexitätsmanagement des Materialflusses in der Stahl- und Feuerfestindustrie werden erarbeitet und diskutiert und in Verbindung zu den erstellten Regeln der Materialflussvereinfachung gebracht. Am Beginn wird kurz auf den theoretischen Hintergrund des Komplexitätsmanagement eingegangen (Abschnitt 4.6.1), um eine Wissensgrundlage für die anschließend behandelten Punkte zu schaffen. In Abschnitt 4.6.2 sind Methoden zur Vermeidung, Beherrschung und Reduzierung von Komplexität erörtert und auf die Stahl- und Feuerfestindustrie übertragen (Abschnitt 4.6.3).

In der Theorie haben sich zahlreiche Konzepte entwickelt, deren Spannweite von systemorientierten ganzheitlichen Komplexitätsmanagementansätzen, wie z. B. Malik³⁴⁴, Bliss³⁴⁵, Willdemann³⁴⁶, Kirchhof³⁴⁷ oder von der Weth³⁴⁸ bis hin zu sehr spezifischen Untersuchungen einzelner Aspekte, wie Westphal³⁴⁹ geht.

³⁴³ Vgl. Wildemann (1999), S. 32

³⁴⁴ Vgl. Malik (2002)

³⁴⁵ Vgl. Bliss (2000)

³⁴⁶ Vgl. Wildemann (1999)

³⁴⁷ Vgl. Kirchhof (2003)

³⁴⁸ Vgl. von der Weth (2001)

³⁴⁹ Vgl. Westphal (2001)

Die Forderung nach einem umfassenden Komplexitätsmanagement ergibt sich vor allem aus der Tatsache, dass sich Komplexitätstreiber auf alle Unternehmensbereiche auswirken und damit punktuelle Maßnahmen zu keinen langfristigen Erfolg führen.

4.6.1 Komplexität und Varietät

Zur Einführung ins Komplexitätsmanagement sollen an dieser Stelle auf die Definition von Komplexitätsmanagement und die Aussagen nach Ashby und nach Luhmann zum Umgang mit Komplexität im Unternehmen diskutiert werden.

Schuh und Schwenk³⁵⁰ definieren Komplexitätsmanagement als „die Gestaltung, Steuerung und Entwicklung der Vielfalt des Leistungsspektrums (Produkte, Prozesse und Ressourcen) im Unternehmen“.

Als Grundproblem von Management kann man den Umgang und die Beherrschung von Komplexität sehen.³⁵¹ Malik³⁵² versteht unter Management, und daher weiter gefasst unter Komplexitätsmanagement „das ständige Bemühen, ein sehr komplexes System unter Kontrolle zu bringen und zu halten, das durch ein hohes Maß an Probabilismus gekennzeichnet ist, [...], dass es nur schwer, und häufig mit unerwünschten Nebenwirkungen, beeinflusst werden kann.

„Komplexitätsmanagement als ganzheitlicher Ansatz der Unternehmensführung bedeutet Entwicklung, Gestaltung und Lenkung der Vielzahl, Vielfalt und Veränderlichkeit der Gesamtheit der Verhaltensformen und Strukturen im System „Unternehmen“ mit allen darin eingeschlossenen Teilsystemen sowie als Teil der Umwelt“.³⁵³ Es zielt auf eine Stimmigkeit zwischen Komplexitätsbedarf und Komplexitätspotenzial ab.³⁵⁴

Wenn die Beherrschung der Komplexität ein Grundproblem des Managements ist, stellt sich die Frage, welche Regeln im Umgang mit Komplexität im Unternehmen beachtet werden müssen. Daher werden die Basisaussagen nach Ashby und Luhmann zum Umgang mit Komplexität im Unternehmen herangezogen.³⁵⁵

Fredmund Malik ist der Ansicht, dass Komplexität durch Varietät messbar ist. Unter Varietät versteht er „die Anzahl möglicher, unterscheidbarer Zustände, die ein System haben kann“³⁵⁶ bzw. „die Anzahl der unterscheidbaren Elemente einer Menge“.³⁵⁷

³⁵⁰ Vgl. Schuh, Schwenk (2001), S. 34

³⁵¹ Vgl. Bleicher (1995), S. 19, Malik (2002), S. 37, Schmidt (1992), S. 15

³⁵² Malik (2002), S. 25

³⁵³ Kirchhof (2003), S. 68

³⁵⁴ Vgl. Kirchhof (2003), S. 68

³⁵⁵ Vgl. Kirchhof (2003), S. 57

³⁵⁶ Malik (1998), S. 6

So sind einfache Systeme, Systeme die nur wenige Zustände haben können. Komplexe weisen dagegen eine Vielzahl an verschiedenen Zuständen auf.

Je komplexer ein System ist, umso größer ist sein Verhaltensspektrum, umso mehr Varianten entstehen aufgrund der Wechselwirkung mit der Umwelt. Gleichzeitig wird es schwieriger und anspruchsvoller, es unter Kontrolle zu halten.³⁵⁸ Dazu siehe auch Abschnitt 4.2 in dem auf Unterschiede zwischen einfachen, komplizierten und komplexen Systemen eingegangen wurde.

Nach dem Gesetz von Ashby: „Only variety can destroy variety“³⁵⁹, benötigen komplexe Systeme, komplexe Mittel, um diese zu steuern. „Um ein System unter Kontrolle zu bringen, benötigt man mindestens so viel Varietät (oder Komplexität), wie das System selbst hat“.³⁶⁰ Mit anderen Worten kann man es folgenderweise formulieren: „Die verfügbare Lenkungsvarietät muss relativ zu den beabsichtigten Zielen mindestens so groß sein, wie die Varietät des zu lenkenden Systems“.³⁶¹

Gemäß Ashby`s Gesetz ist also Unternehmenskomplexität eine positive Eigenschaft von Unternehmen, um auf eine komplexe Umwelt reagieren zu können. Je wandlungsfähiger ein System ist, desto größer sind seine Überlebenschancen. Ein einfaches System wird Schwierigkeiten haben in einem komplexen Umfeld (z. B. hoher Konkurrenzdruck, anspruchsvolle Kunden etc.) zu bestehen.

Luhmann geht von einem asymmetrischen Verhältnis der Komplexität der Systemumwelt zur Komplexität des Systems aus und bezeichnet dies als Komplexitätsgefälle.³⁶² Komplexität nach Luhmann bedeutet Selektionszwang.³⁶³ Er spricht von unbestimmter Komplexität, wenn das System noch keine Selektion vorgenommen hat, d. h. noch keine Elemente und Relationen festgelegt hat. Umwelt ist alles, was nicht System ist und wird damit zur unbestimmten Komplexität gerechnet. Wählt ein System bestimmte Elemente und Relationen aus, entsteht eine bestimmte Komplexität, welche auch als Systemkomplexität bezeichnet wird. Luhmann vertritt die Hypothese: „nur Komplexität reduziert Komplexität“³⁶⁴, indem die Umweltkomplexität durch den Aufbau einer Systemkomplexität reduziert wird.³⁶⁵ Das Unternehmen hat also verschiedene Selektionsmöglichkeiten, und wählt jenes Muster aus, dass Komplexität reduziert aber noch auf die Umwelt Reaktionen möglich macht.

³⁵⁷ Malik (2002), S. 186

³⁵⁸ Vgl. Malik (1998), S. 7

³⁵⁹ Ashby (1970), S. 202ff., Malik (1998), S. 9, Bach (1998), S. 91

³⁶⁰ Malik (1998), S. 9

³⁶¹ Malik (2002), S. 194

³⁶² Vgl. Luhmann (1968), S. 121f.

³⁶³ Vgl. Luhmann (1993), S. 47

³⁶⁴ Kirchhof (2003), S. 59

³⁶⁵ Vgl. Kirchhof (2003), S. 59

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus den beiden Basisaussagen von Ashby und Luhmann ableiten:³⁶⁶

- Unternehmen müssen eine bestimmte strukturelle Komplexität aufweisen zur Bewältigung von Umweltvarietät. Auch für zukünftige Entwicklungen müssen Unternehmen gewisse strukturelle Komplexität vorhalten.
- Zur Bewältigung situativer Varietät in der Um- und Innenwelt des Unternehmens durch Selektion muss das Unternehmen über funktionale Komplexität zur Komplexitätskontrolle verfügen. Dies lässt sich z. B. durch Organisationsprinzipien erzielen.
- Bei Veränderungen der strukturellen Komplexität muss auch die funktionale Komplexität adaptiert werden.

Unternehmen können entsprechend dieser Schlussfolgerungen die Komplexität erhöhen oder reduzieren bzw. eine Kombination aus beiden wählen. Dies bezieht sich sowohl auf die strukturelle als auch die funktionale Komplexität.³⁶⁷

An dieser Stelle soll auf weitere Ansätze zur Komplexitätsbeherrschung verwiesen werden, wie der Komplexitätsbeherrschung durch Ordnung³⁶⁸ oder der Komplexitätsbeherrschung durch Problemlösen³⁶⁹. Eine Behandlung all dieser theoretischen Ansätze würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Zusammengefasst lässt sich ableiten, dass Unternehmen eine gewisse Flexibilität aufweisen müssen, um auf eine steigende Komplexität in und außerhalb ihrer Systemgrenzen reagieren zu können. Diese Flexibilität (bzw. strukturelle Komplexität wie in Materialflusssystemen der beiden betrachteten Branchen detektiert wurde) muss auch im Materialfluss der Stahl- und Feuerfestindustrie im optimalen Maße vorherrschen, um langfristig wirtschaftlichen Erfolg zu haben. Diese Vermutung bestätigen auch Reiners und Sasse³⁷⁰ mit ihrer Aussage, dass für das langfristige Überleben am Markt es erforderlich ist, den wirtschaftlich optimalen Komplexitätsgrad herauszufinden.

4.6.2 Methoden zur Vermeidung, Beherrschung und Reduzierung von Komplexität

Es gibt, wie im Abschnitt 4.5.2 angesprochen, einige typische Gegebenheiten im Unternehmen bzw. in seiner Umwelt (Markt), die sich auf die Komplexität negativ auswirken. Für diese sollen nun praktische Mittel und Methoden zur Reduzierung der Komplexität untersucht werden.

³⁶⁶ Vgl. Kirchof (2003), S. 62f.

³⁶⁷ Vgl. Malik (2000), S. 197

³⁶⁸ Vgl. Beer(1972), Hayek (1967), Gomez et al. (1975)

³⁶⁹ Vgl. Hayek(1967), Popper (1972), Lindblom ((1959), Steinbrunner (1974)

³⁷⁰ Vgl. Reiners, Sasse (1999), S. 222

Bevor gezielt auf die einzelnen komplexitätssenkenden Methoden für die identifizierten Komplexitätstreiber der Stahl- und Feuerfestindustrie eingegangen wird, sollen kurz allgemeine Mittel zur Vermeidung, Reduktion und Beherrschung von Komplexität im Unternehmen präsentiert werden.

Die Portfoliomatrix in Abbildung 29 stellt generell die unterschiedlichen Strategien zum Komplexitätsmanagement für Wertschöpfungsketten dar. Die Dimension Supply Chain Komplexität beschreibt die dynamische und strukturelle Komplexität in der Supply Chain während die Supply Chain Kosten das Kostenniveau in der Wertschöpfungskette differenziert.

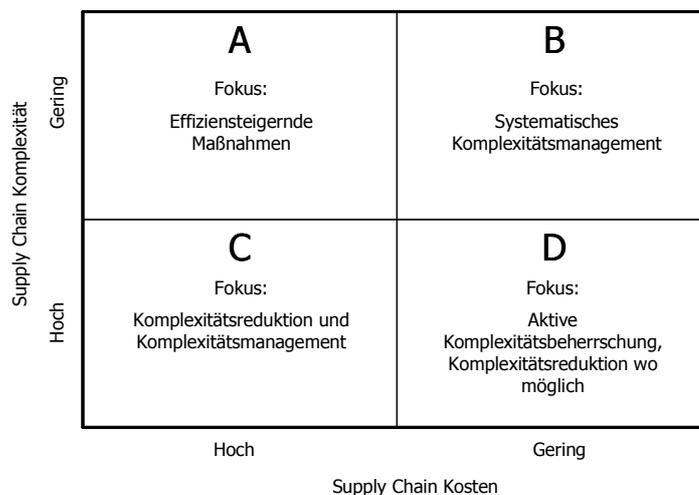


Abbildung 29: Supply Chain Komplexitätsmanagement Strategien³⁷¹

Die folgende Grafik (Abbildung 30) stellt nun konkrete Ansätze dar, die je nachdem welche Strategie im Unternehmen zur Komplexitätsbewältigung vorgesehen ist, umgesetzt werden können. Eine klare Trennlinie zwischen den Maßnahmen zur Vermeidung, Reduktion oder Beherrschung ist mitunter nicht möglich, sodass einige Methoden in mehrere Kategorien eingereiht wurden.³⁷²

Abbildung 30 zeigt eine allgemeine Übersicht von Vorschlägen in den Bereichen „Komponenten/Produkte“, „Prozesse“ und „Kundenstruktur/Programme“ um Komplexität entgegenzuwirken.

Ziel der Komplexitätsvermeidung ist es, in Produkt-/Prozessplanungs- und Entwicklungsaktivitäten durch präventive Maßnahmen, wie einer Modulbildung bei der Entwicklung und Aus-

³⁷¹ Quelle: Geimer (2005), S. 101

³⁷² Vgl. Winkler (2006), S. 24

gestaltung von Produkten und Prozessen, effizient auf die Vermeidung der Komplexität einzuwirken.³⁷³

Ziel der Komplexitätsreduzierung ist es, bereits vorhandene Komplexität durch Maßnahmen wie der Eliminierung komplexitätstreibender Märkte, Kunden oder Lieferanten bilanzwirksam zu reduzieren.³⁷⁴

Ziel der Komplexitätsbeherrschung ist es, die nicht vermeidbare Komplexität durch geeignete Mittel und Methoden effizient zu steuern. Dazu zählen z. B. die Optimierung der Rahmenbedingungen entlang der gesamten Entwicklungs- und Wertschöpfungskette.³⁷⁵

Komplexitätsmanagement				
Ansätze				
		Vermeidung	Reduktion	Beherrschung
Maßnahmen	Komponenten/ Produkte	<ul style="list-style-type: none"> • Modularisierung von Produktstrukturen • Einsatz von Gleichteilen • Standardisierung • Parallele Variantenentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von höherwertigen Varianten (größeres Leistungsspektrum) • Punkt der Variantenbildung so spät als möglich • Erhöhung des Standardisierungsgrades • Reduktion der Variantenvielfalt • Rüstarme Variantenproduktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Klar definierte Produkt- und Modulschnittstellen • Software („brain“) statt Hardware • Design to Logistics • Einrichtung von Bevorratungsebenen • Flexible Maschinenkonzepte
	Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Rüstfreie Variantenproduktion • Klare Zuweisung von Verantwortungen • Modulare Fertigungssegmentierung (selbststeuernde Regelkreise) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lieferantenbündelung (single sourcing) • Verringerung der Leistungstiefe (modular sourcing) • Medienbruchminimierung • Hierachiereduktion (Verkürzung der Entscheidungswege) • KVP-Programme 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Einsatz von Informationstechnologien (Visualisierung) • Aufgabenkoordination (Bring-/ Holsystem) • Definition überschaubarer Zielsysteme (für dezentrale Entscheidungsbereiche)
	Kundenstruktur/Programm	<ul style="list-style-type: none"> • Gezielte Abstimmung der Varianten auf die Marktforderung • Schaffung von homogenen Zielmärkten • gezielte Meinungsbildung (Marketing) beim Kunden 	<ul style="list-style-type: none"> • Bündelung von Länderspezifika • Optimierung der Programmtiefe • Kundenbereinigung durch Mindermengenzuschläge • Kombination von Modulen zu Leistungsbündeln (Vertriebspaket) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wissensaustausch mit dem Kunden • Frühzeitige Einbindung in den Produktenstehungsprozess beim Kunden • Aufbau von learning relationships mit den Abnehmern

Abbildung 30: Maßnahmen und Ansätze zum Komplexitätsmanagement³⁷⁶

Einige dieser angeführten Maßnahmen zur Vermeidung, Reduktion bzw. Beherrschung von Komplexität finden sich auch in den aufgestellten Grundsätzen zur Materialflussvereinfachung. So gibt es Übereinstimmungen z. B. bei den Ansätzen: Standardisierung (Regel Nummer sieben), Reduktion der Variantenvielfalt (Regel Nummer zwei), rüstarme Variantenproduktion (kann man mit dem siebenten Grundsatz nach Towill der Bildung von Produktgruppen in Verbindung sehen), Verringerung der Leistungstiefe (Regel Nummer acht), klare

³⁷³ Vgl. Wildemann (2005), S. 48ff.

³⁷⁴ Vgl. Wildemann (2005), S. 48ff.

³⁷⁵ Vgl. Wildemann (2005), S. 48ff.

³⁷⁶ in Anlehnung: Winkler (2006), S. 24

Zuordnung von Verantwortungen (Regel Nummer sechs) etc. Es zeigt sich, dass einige Grundsätze zur Komplexitätsbekämpfung auf eine Vereinfachung der Materialflussstruktur und -steuerung u. a. abzielen und damit die komplexen Eigenschaften des Systems versuchen in den Griff zu bekommen.

4.6.3 Maßnahmen in der Stahl- und Feuerfestindustrie um Komplexitätstreibern entgegenzuwirken

Dieser Abschnitt präsentiert nun gezielt Methoden und Mittel für die Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie um Komplexitätstreiber zu reduzieren, zu beherrschen und/oder zu vermeiden und damit auch die im nächsten Abschnitt behandelten Komplexitätskosten zu beeinflussen.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die häufigsten Komplexitätstreiber in der Stahl- und Feuerfestindustrie die im Abschnitt 4.5.2 identifiziert wurden.

Komplexitätstreiber
Steigender Wettbewerbsdruck/Globalisierung
Sortimentsbreite / Vielfalt an Produkthanforderungen
Rohstoffknappheit/ Dynamik der Märkte
Informationsasymmetrie
Vielzahl an Hierarchieebenen/ Länge der Entscheidungsprozesse/ Schnittstellendichte

Tabelle 9: Komplexitätstreiber im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie

Maßnahmen gegen die einzelnen Komplexitätstreiber werden nachfolgend für die angeführten Punkte aus Tabelle 9 der Reihe nach erörtert und eventuell auftretende Zielkonflikte erläutert:

Der **steigende Wettbewerbsdruck** in den Branchen der Stahl- und Feuerfestindustrie rührt vor allem durch die stark anwachsenden Produktionszahlen in Asien, Russland und Brasilien her.³⁷⁷ Einerseits kann eine Spezialisierung auf eine kundenorientierte und/oder hochqualitative Produktfertigung (wie z. B. hochlegierte Stähle oder geformte Produkte bzw. auch eine weiterführende Produktion von individuell nachbearbeiteten Blechen für die Automobilindustrie oder Flugzeugindustrie) die Marktstellung sichern.³⁷⁸ Einige Stahlerzeuger haben sich schon in diese Richtung entwickelt, um konkurrenzfähig zu bleiben.³⁷⁹ Andererseits er-

³⁷⁷ Vgl. Ameling (2006), S. S6

³⁷⁸ Vgl. Baumgartner (2006), S. 73

³⁷⁹ Vgl. Köhler (2006), S. 94ff.

geben sich aber dadurch auch neue, weitere Komplexitätsausprägungen im Materialflusssystem, z. B. durch zusätzliche Restriktionen.

Auch in der Feuerfestindustrie setzt man auf Qualität und High-Tech-Produkte. In China gibt es z. B. in dieser Branche tausende Firmen als Wettbewerber, wenige haben allerdings eine Größe, die auch international von Bedeutung wäre. Der Export aus China wächst aber, daher ist es wichtig, mit chinesischen Produkten im internationalen Wettbewerb zu bestehen.³⁸⁰

Die Stahl- und Feuerfestindustrie muss auf Erfahrung und Know-how zur Erzeugung hochqualitativer Produkte setzen. Durch einen starken Bindungsaufbau mittels Wissensaustausch zu den Kunden, frühzeitige Einbindung in den Produktenstehungsprozess beim Kunden und den Aufbau von learning relationships mit den Abnehmern können langfristige Partnerschaften geschlossen werden, die Komplexität in der Kundenstruktur besser beherrscht werden und dem Komplexitätstreiber „steigender Wettbewerbsdruck“ Einhalt geboten werden. Ein weiterer Ansatz, neben den bereits genannten, könnten gewisse Zusatzangebote der Branchen an ihre Kunden ergänzend zu dem Angebot aus dem Kerngeschäft darstellen, wie Analyse- und Beratertätigkeiten für die Produktion. Damit würde man eine weitere Abgrenzung zu den Mitbewerbern schaffen. Dazu meint Baumgartner:³⁸¹ „Klare Kundensegmente, eindeutige Leistungsversprechen und eine stringent auf die Kundenbedürfnisse ausgerichtete Organisation können den Kunden einen nachvollziehbaren Mehrwert bieten. Darüber hinaus müssen Marke, Systemangebot, Service, Schulung und Kundenbetreuung ein ineinandergreifendes Maßnahmenpaket bilden, das die Kundenbindung stärkt.“

Auf die **Sortimentsbreite** wirkt sich maßgeblich der Einfluss vom Vertrieb aus, welcher sich bemüht, auf die Vielfalt an Produkthanforderungen von Endkunden und der weiterverarbeitenden Industrie einzugehen. Je individueller für die einzelnen Kunden gefertigt werden kann, desto besser könnte sich das auf die eigene Positionierung am Markt auswirken (Steigerung der Konkurrenzfähigkeit - Komplexitätstreiber Wettbewerbsdruck wird reduziert), desto mehr wird aber der Komplexitätstreiber Sortimentsgröße gefördert, der auch zu einem komplexeren Materialfluss in der Produktion führen kann. Es kann somit ein Zielkonflikt zwischen der Vermeidung des steigenden Wettbewerbsdruckes und der Reduktion der Vielfalt an Produkten und damit der Flussvereinfachung entstehen. „Die Globalisierung erschwert das Variantenmanagement auf Produktebene. Die Elimination von Produktvarianten, die technischen oder rechtlichen Normen wie lokalen Anordnungen gerecht werden sollen, ist gleichzusetzen mit einem Marktaustritt“.³⁸² Daher muss ein gemeinsames Optimum gefunden

³⁸⁰ Vgl. Draxler (2005)

³⁸¹ Baumgartner (2006), S.73

³⁸² Krüger (2004), S. 107

werden, um beide Komplexitätstreiber beherrschen zu können. Methoden der Produktionsplanung wie eine deckungsbeitragsorientierte ABC Analyse, zur Untersuchung des monetären Nutzens der einzelnen Varianten, und eine ABC Analyse der Kunden könnte zusammengefasst Aufschluss über vorteilhafte bzw. problematische Produkt- und Kundenkombinationen bieten.

Durch eine steigende Sortimentsbreite kann es dazu kommen, dass kleinere Chargen benötigt werden und damit auf mehr Flexibilität in der Fertigung gesetzt wird. „Die wirtschaftlichen Losgrößen sind durch die Technik der einzelnen Anlagen in hohem Maße vorbestimmt: Dort wo eine 130-t-Pfanne ist, wird keine 20-t Charge gefahren. Wenn aber Neuinvestitionen oder größere Reparaturen anstehen, sollten die Möglichkeiten für kleinere Einheiten zu Gunsten einer höheren Produktionsflexibilität geprüft werden“.³⁸³ Auch hier muss eine genaue Abwägung des Kosten/Nutzen Faktor vorgenommen werden.

Bei kritischen Varianten sollte, bevor diese aus dem Programm genommen werden, überprüft werden, ob diese Produkte noch profitabel gemacht werden können. Das könnte durch Anhebung der Preise, Einführung von Mindestbestelllosgrößen und/oder Senkung der Herstellkosten umgesetzt werden.³⁸⁴ Variantenmanagement nach Ehrenspiel et al.³⁸⁵ umfasst „alle Maßnahmen mit denen Variantenvielfalt innerhalb eines Unternehmens bewusst beeinflusst wird. Dies gilt also für Produkte sowie betroffene Prozesse. Das Ziel ist dabei, die Reduzierung und Beherrschung der Komplexität, d. h. minimale interne Komplexität bzw. Variantenvielfalt bei gleichzeitig genügend viel angebotenen Varianten nach außen, d. h. zum Kunden hin.“

Die **Rohstoffknappheit** und der damit verbundene Preisanstieg am Rohstoffmarkt sorgen für einige Schwierigkeiten in der Beschaffung³⁸⁶ und damit im Materialflusssystem. Die Unternehmen der Stahl- und Feuerfestindustrie sollten alternative Einsatzstoffe für Engpassmaterialien in Betracht ziehen. Die Eigenschaften von z. B. feuerfesten Materialien kommen aufgrund des Zusammenspiels mehrerer Komponenten nach definierten Behandlungsprozeduren zustande (wie in der Stahlindustrie auch). Eine verstärkte Entwicklung alternativer Rezepturen für gewisse Produkte würde bei dem einen oder anderen Rohstoff eine Erleichterung in der Beschaffung bewirken. Der Forschungsaufwand wird durch die steigenden Rohstoffpreise gerechtfertigt. Da in absehbarer Zeit keine degressive Entwicklung in der Stahl- und Feuerfestindustrie prognostiziert ist³⁸⁷, könnte die Maßnahme von Erfolg gekrönt sein.

³⁸³ Scheidl, von Woedtke (2003), S. 51

³⁸⁴ Vgl. Wildemann (1999), S. 3

³⁸⁵ Ehrenspiel et al. (2005), S. 282

³⁸⁶ Vgl. Gronwald, Uhlig (2006), S. 21ff., Martens (2006), S. 83ff.

³⁸⁷ Vgl. IG BCE Industriegruppe (2007), Ameling (März 2007), S. 2ff., Ameling (2006), S. S6, Bein (2007), S. 66

Als Folge ist aber mit einer Verringerung der standardisierten Abläufe im Materialflusssystem zu rechnen und damit mit einem höheren Planungs- und Steuerungsaufwand der Materialflüsse (steigende autonome Unternehmenspolitik).

Weitere Möglichkeiten, um die Rohstoffknappheit zu reduzieren, könnten die Wiederaufnahme von Rohstoffabbau in bestimmten Regionen bzw. auch die Erschließung neuer Rohstoffquellen sein.³⁸⁸ Der in einigen Gebieten eingestellte Abbau von z. B. Eisenerz in Deutschland aufgrund des geringeren Eisen-Anteils³⁸⁹ und der hohen Abbaukosten könnte wieder lukrativ sein. Eine Erweiterung der Unternehmenskompetenzen durch einen eigenen Abbau von Rohstoffen bedingt einerseits eine Reduktion der Abhängigkeit von Lieferanten und schwankenden Rohstoffpreisen, andererseits widerspricht dies nützlichen Regeln zur Flussvereinfachung wie der Konzentration auf Kernkompetenz und steigert die strukturelle Komplexität.

Je stärker **bürokratische Hürden** durch z. B. eine Vielzahl an Hierarchieebenen, lang dauernde Entscheidungsprozesse, starke Arbeitsteiligkeit und eine hohe Schnittstellendichte im System ausgeprägt sind, desto größer ist die autonome und korrelierte Unternehmenskomplexität und desto unflexibler ist das ganze Materialflusssystem. Schwerfälligkeiten im Management wurde von Bain³⁹⁰ als stabilitätsgefährdender Faktor belegt. Schnelle Reaktionen auf unvorhergesehene Störungen sind selten in einem solchen starren System. Starke Arbeitsteiligkeit wirkt sich z. B. negativ auf die Länge der Prozesse und/oder auf das soziale Miteinander im Betrieb aus. Eine Reduktion der Schnittstellen und klar definierte Zuständigkeiten finden sich auch in den Regeln zur Flussvereinfachung wieder und im Maßnahmenkatalog zur Reduktion/ Vermeidung/ Beherrschung von Komplexität (Abbildung 30). Eine Reduktion vorherrschender Bürokratie im System ist oft mit Schwierigkeiten verbunden, da der Aufbruch lang vorhandener Strukturen v. a. ein Umdenken bei dem Produktionsfaktor Mensch fordert. Prozessorientierung und Teamorganisation sind wesentliche Mittel zur Reduktion von Bürokratie im Materialflusssystem. Guimaraes et al.³⁹¹ stellten in einer empirischen Studie fest, dass effizient gestaltete Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine die wirksamste Maßnahme ist, um negative Effekte komplexer Systeme auf die Systemleistung zu vermindern.

Dies führt gleich zum nächsten Komplexitätstreiber, einem **nicht durchgängigen Informationssystem** sowohl im Betrieb als auch in der Supply Chain. Effektives Schnittstellenmanagement, Festlegen von Verantwortungen im Bereich auch im Informationswesen und einfach gestaltete Informationsweitergabe fördern Transparenz bei den Materialflussabläufen

³⁸⁸ Vgl. Martens (2006), S. 83

³⁸⁹ Vgl. Lüngen, Steffen (2006), S. S73

³⁹⁰ Vgl. Bain (1968), S. 173

³⁹¹ Vgl. Guimaraes et al. (1999), S. 1256ff.

im Unternehmen. „Eine durchgängige und prozessorientierte Vernetzung der Produktions-, Logistik- und Managementprozesse z. B. in der Stahlerzeugung, im Walzwerk und in der nachgeschalteten Bearbeitung bei gleichzeitiger Überwachung aller Anlagenzustände schafft Transparenz im Betriebsablauf. Der so entstehende Gesamtüberblick und der Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zustand der Produktion ermöglichen betriebswirtschaftlich fundierte Entscheidungen zugunsten einer Verbesserung der Produktivität“.³⁹² „Nur durch eine optimale Gestaltung der Schnittstellen können Kosteneinsparung durch Optimierung des Informationsflusses erreicht werden“.³⁹³

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass sich einige Maßnahmen finden lassen, welche den Komplexitätstreibern im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie entgegenwirken. Einige dieser Methoden finden sich auch in den Regeln zur Materialflussvereinfachung wieder, wie auch schon bei den Maßnahmen zur Komplexitätsbekämpfung festgestellt wurde. Die meisten komplexitätssenkenden Maßnahmen sind mit einem Umdenken der Mitarbeiter, Führungskräfte etc. aber auch mit gewissen finanziellen Aufwand verbunden und daher sollte eine objektive Analyse über das Nutzen der Methode versus die Kosten der Komplexität vorgenommen werden.

Der nächste Abschnitt befasst sich daher mit Komplexitätskosten im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie und schließt damit das Kapitel von Komplexität und ihren Auswirkungen ab.

4.7 Komplexitätskosten und ihre Ausprägungen

Wie im vorigen Abschnitt besprochen, wirken sich z. B. viele Varianten stark auf die Komplexität im Materialfluss und damit auch auf die Kosten für den Betrieb aus. Der Begriff der Komplexitätskosten hat sich entwickelt, um Kosten zu beschreiben, die „auf Faktorverbräuche, die in der Vielschichtigkeit der Produktionskonzeption – [...] – begründet sind zurückgehen“³⁹⁴. In diesem Abschnitt sollen nun Komplexitätskosten im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie untersucht werden u. a. mit Bezug auf die Variantenvielfalt als Komplexitätskostentreiber. Dabei wird im Abschnitt 4.7.1 auf die Definition und Arten von Komplexitätskosten eingegangen, um den Begriff Komplexitätskosten festzulegen. Im nächsten Abschnitt werden generelle Ausprägungen von Komplexitätskosten in Materialflusssystemen gesammelt und im Kontext des Materialflusssystems der Stahl- und Feuerfestindustrie aufbereitet (Abschnitt 4.7.2). Dabei werden die Auswirkungen auf die Kosten im Materialflusssystem durch die erarbeiteten Komplexitätstreiber beurteilt.

³⁹² Bürvenich, Hensel (2004), S. 68

³⁹³ Heidrich (2002), S. 49

³⁹⁴ Adam, Rollberg (1995), S. 667

4.7.1 Definition und Arten von Komplexitätskosten

In diesem Kapitel wird auf die Definition und auf Ausprägungen der Komplexitätskosten eingegangen, um ein Grundverständnis des Begriffes und der Zusammenhänge zwischen Komplexität und Komplexitätskosten zu schaffen.

Komplexitätskosten werden in der Literatur vor allem auf das Problem, der mit der variantenreichen Fertigung einhergehenden progressiv verlaufenden Stückkostenkurve zurückgeführt³⁹⁵. Auch die leistungswirtschaftliche Komplexität findet als ein bedeutsamer Komplexitätskostentreiber immer mehr an Berücksichtigung³⁹⁶.

Doch gibt es weit mehr Einflussgrößen die untersucht werden müssen. Daher wird an dieser Stelle der Begriff der Komplexitätskosten konkretisiert. Folgende Überlegungen zu Komplexitätskosten sind in der Literatur auffindbar:

Unter Komplexitätskosten werden Kosten verstanden, die sich mit der Vielfalt vorhandener Produktionsprogramme und Wertschöpfungsprozesse im Unternehmen verändern. Man unterscheidet direkte, z. B. durch die Einführung einer neuen Produktvariante, von indirekten Komplexitätskosten wie Opportunitätskosten durch zusätzlichen Abstimmungsbedarf bei der Ausweitung des Produktspektrums.³⁹⁷ Nach dieser Definition beziehen sich Komplexitätskosten v. a. auf die korrelierte und autonome Unternehmenskomplexität nach Kirchhof. Markt-, Gesellschaftskomplexität sowie die funktionale Komplexität im Unternehmen werden nicht berücksichtigt.

Komplexitätskosten gehen auf Faktorverbräuche zurück, die im Produktkonzept, in der Programmzusammensetzung, in der Prozessgestaltung und im Fertigungssystem begründet liegen.³⁹⁸ Auch bei dieser Begriffserklärung zielt man auf Kostenwirkungen der korrelierten und autonomen Unternehmenskomplexität ab.

„Die Entstehung von Komplexitätskosten steht mit der Leistungsbreite und der Leistungstiefe, also den wesentlichen Dimensionen der Betriebsgröße in unmittelbarem Zusammenhang“³⁹⁹. Auch Gutenberg hat schon sehr früh angeführt, dass die Betriebsgröße eine wesentliche Kosteneinflussgröße darstellt.⁴⁰⁰ Diese Definition verweist auf die Programmkomplexität (Teil der korrelierten Unternehmenskomplexität) und auf die Produktionsprogramm-

³⁹⁵ Vgl. Fischer (1988), S. 68

³⁹⁶ Männel (1992), S. 112

³⁹⁷ Vgl. Wirtschaftslexikon 24 (2007)

³⁹⁸ Vgl. Adam, Rollberg (1959), S. 667

³⁹⁹ Becker (1992), S. 171

⁴⁰⁰ Vgl. Gutenberg (1979), S. 346

komplexität (Teil der autonomen Unternehmenskomplexität) als wesentliche Einflussgröße der Komplexitätskosten.

Syska⁴⁰¹ führt an, dass eine Trennung hinsichtlich prozessinhärenter und produktkohärenter Komplexitätskosten notwendig ist und verweist auf die Differenzierung zur Ableitung von Komplexitätskosten nach Wildemann⁴⁰². Dieser stellt folgende Punkte zur Herleitung komplexitätsbedingte Kosten dar:

- prozessbezogene Kosten, bedingt durch die fixierte Aufbau- und Ablauforganisation
- prozessbezogene Kosten, bedingt durch zu gering ausgeprägte Mitarbeiterqualifikation und fehlende Zusammenführung von Aufgabe, Kompetenz und Verantwortung
- prozessbezogene Kosten, bedingt durch Medienbrüche
- prozessbezogene Kosten, bedingt durch Dateninkonsistenz im Informations- bzw. Kommunikationsfluss
- produktinduzierte prozessbezogene Kosten der vermeidbaren Aktivitäten in indirekten und direkten Bereichen
- produktinduzierte Mehrkosten durch vermeidbare Materialvielfalt bei Einstandspreisdifferenzen
- produktinduzierte Mehrkosten wegen zu geringer Standardisierung und Mehrfachverwendung sowie zu geringer Normteilquote in indirekten und direkten Bereichen

In dieser Auflistung finden sich einige Parallelen zu den im Abschnitt 4.4 erläuterten Komplexitätsausprägungen der strukturellen Komplexität sowie zu den nach Wildemann in Abbildung 28 erläuterten generellen Komplexitätstreibern im Unternehmen. Eine Berücksichtigung der Auswirkungen von Marktkomplexität bzw. von Gesellschaftskomplexität auf Kosten im Unternehmen findet sich in keiner der bisher erläuterten Definitionen von Komplexitätskosten wieder.

Einen weiteren Ansatz liefert die Unterteilung in Kosten, die im strategisch/taktischen und operativen Bereich entstehen, nach Becker⁴⁰³: Komplexitätskosten entstehen durch steigende Kosten des dispositiven Faktors und der elementaren Faktoren in komplexen Systemen.

Komplexitätskosten des elementaren Faktors entstehen als Folge des Einsatzes zunehmend komplexerer Repetier- und Potenzialfaktoren, wie z. B. durch die Verwendung neuer Rohstoffe oder Werkstoffe, die Nutzung hochtechnisierter Anlagen, die Inanspruchnahme spezialisierter Dienstleistungen etc., sowie der Erstellung möglichst kundenindividueller und somit meist variantenreicher Produkte.⁴⁰⁴ Becker⁴⁰⁵ benennt diese Kosten als Ausführungskosten. Die Kosten des dispositiven Faktors beziehen sich auf steigende Koordinationskosten im

⁴⁰¹ Vgl. Syska (2006), S. 78f.

⁴⁰² Vgl. Wildemann (2002), S. 184

⁴⁰³ Vgl. Becker (1992), S. 171ff.; Becker (2001), S. 420ff.

⁴⁰⁴ Vgl. Pfeiffer et al. (1992), S. 864ff.

⁴⁰⁵ Vgl. Becker (1992), S. 172; Becker (2001), S. 421

komplexen System (nach Albach⁴⁰⁶ Such-, Informationskosten, Entscheidungskosten, Kontrollkosten und Konfliktkosten), bei Becker⁴⁰⁷ noch um den Begriff der Steuerungskosten erweitert. Becker führt die Kosten dieses Faktors auch unter den Begriff der Führungskosten. Auch diese Begriffserklärung der Komplexitätskosten bezieht sich v. a. auf die autonome und korrelierte Unternehmenskomplexität.

Die Abbildung 31 nach Becker⁴⁰⁸ beinhaltet die insgesamt aus den Kosten des dispositiven Faktors und der elementaren Faktoren resultierende Stückkostenkurve, die in Abhängigkeit der Betriebsgröße eintreten kann. Sämtliche Kostenverläufe zeigen die zwar nicht zwingend, aber mit hoher Wahrscheinlichkeit bei steigender Systemgröße auftretenden komplexitätsbedingten Mehrkosten.

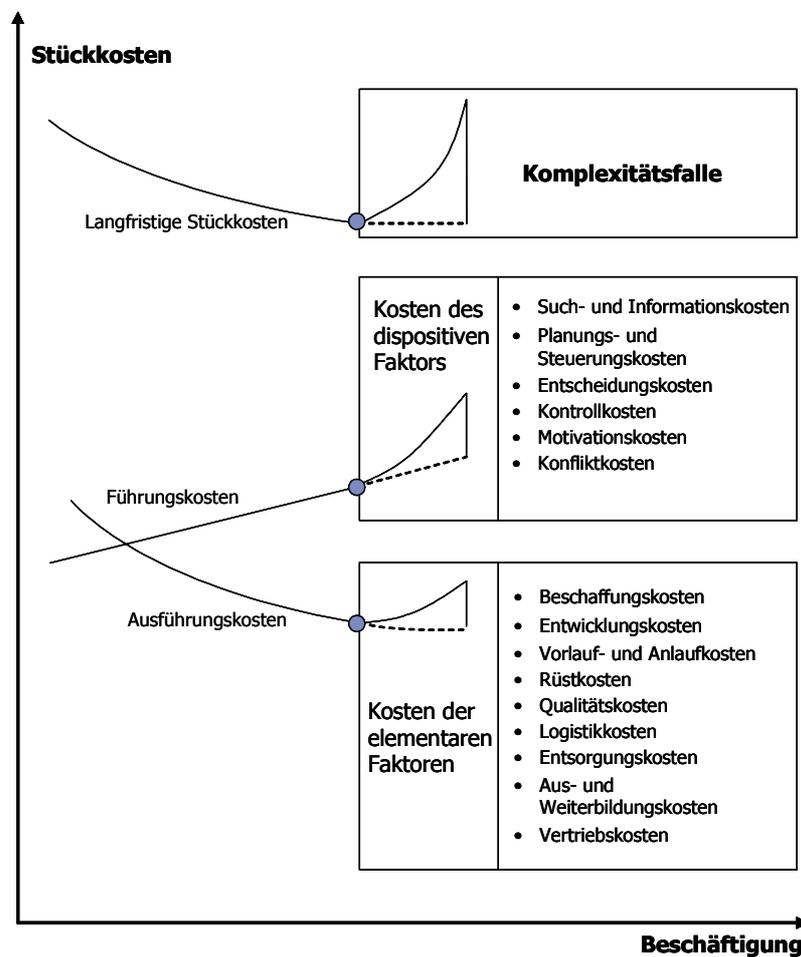


Abbildung 31: Veränderung des langfristigen Stückkostenverlaufs durch das Auftreten von Komplexitätskosten⁴⁰⁹

⁴⁰⁶ Vgl. Ahlbach (1988), S. 1164

⁴⁰⁷ Vgl. Becker (2001), S. 422

⁴⁰⁸ Vgl. Becker (1992), S. 172; Becker (2001), S. 422

⁴⁰⁹ Quelle: Becker (2001), S. 422

Die Kosten des dispositiven Faktors wachsen bei niedriger Komplexität zunächst proportional und bei hoher Komplexität dann progressiv an. Die, in Abhängigkeit der Beschäftigung, degressiv verlaufende Stückkostenkurve der elementaren Faktoren kann durch einen Anstieg der Kosten dieses Faktors, z. B. bei den Kosten der Entwicklung von Produkt- und Prozesstechnologien, den Variantenwechselkosten, den Kosten der Qualitätssicherung, der Entsorgung etc., einer Abflachung und im extremsten Fall sogar eine Überkompensation unterliegen. Der langfristige Stückkostenverlauf verdeutlicht, dass die nach vorherrschender Meinung möglichen erreichbaren Economies of Scale bei einem Beschäftigungszuwachs, sich durch eine Steigerung der Komplexität in das Gegenteil kehren können (nach Becker⁴¹⁰ „Diseconomies of Scale“ genannt) und das Unternehmen gefährden.⁴¹¹ Gelingt es nicht, komplexitätsbedingten Kosten entsprechende zusätzliche Erlöse gegenüberzustellen, verschlechtert sich die Erfolgslage mit steigender Vielfalt, und der Betrieb tappt in die existenzbedrohende Komplexitätskostenfalle.⁴¹² Der Komplexitätskostenfalle kann mit Erhöhung des Standardisierungsgrades, des Mehrfachverwendungsgrades und der Normteilquote begegnet werden.⁴¹³ Die so genannten Kosten des dispositiven Faktors beziehen sich vorwiegend auf die autonome Unternehmenskomplexität, während in den Kosten des elementaren Faktors Marktkomplexität, korrelierte und autonome Unternehmenskomplexität Berücksichtigung finden.

Wildemann⁴¹⁴ nennt folgende Kostenarten der Komplexität, welche sich den Kosten des dispositiven Faktors und der elementaren Faktoren zuordnen lassen:

- Kommunikations-/Informationsaustauschkosten
- Koordinationskosten
- Entscheidungs- oder Beschlusskosten
- Abstimmungskosten
- Anpassungskosten
- Doppelerfassungskosten
- Suchkosten
- Kosten der Verwechslung
- Qualitätsbezogene Abweichungskosten
- Planungs- und Steuerungskosten
- Datenpflege- und Systemkosten
- Lieferantenwechsel- und -pflegekosten
- Mehrkosten durch erhöhte Einstandspreise
- zusätzliche Kapitalbindungskosten
- Kosten für nicht vom Kunden benötigte Funktionalität
- Kosten der Absentismus (motivationsbedingte Ausfallzeiten)

⁴¹⁰ Becker (1992), S. 172

⁴¹¹ Vgl. Becker (1992), S. 172; Becker (2001), S. 421

⁴¹² Adam, Rollberg (1959), S. 668

⁴¹³ Reiner (2004), S. 55

⁴¹⁴ Vgl. Wildemann (2002), S. 185

Reiners und Sasse haben noch einen anderen Ansatz gewählt um die Komplexitätskosten zu unterteilen:

- die einmaligen Komplexitätskosten
- die laufenden Komplexitätskosten und
- komplexitätsbedingte Opportunitätskosten⁴¹⁵, die durch das „Nicht-Nutzen-Können alternativer Einsatzmöglichkeiten von Ressourcen“, wie z. B. der zusätzliche Aufwand für Manager, entstehen.

Dabei greifen die Autoren in ihrer entwickelten Abbildung (siehe unten) auf u. a. identifizierte Kostenwirkungen von Komplexität im Unternehmen nach Homburg und Deich⁴¹⁶, Männel,⁴¹⁷ Roever⁴¹⁸ sowie Rathnow⁴¹⁹ zurück.

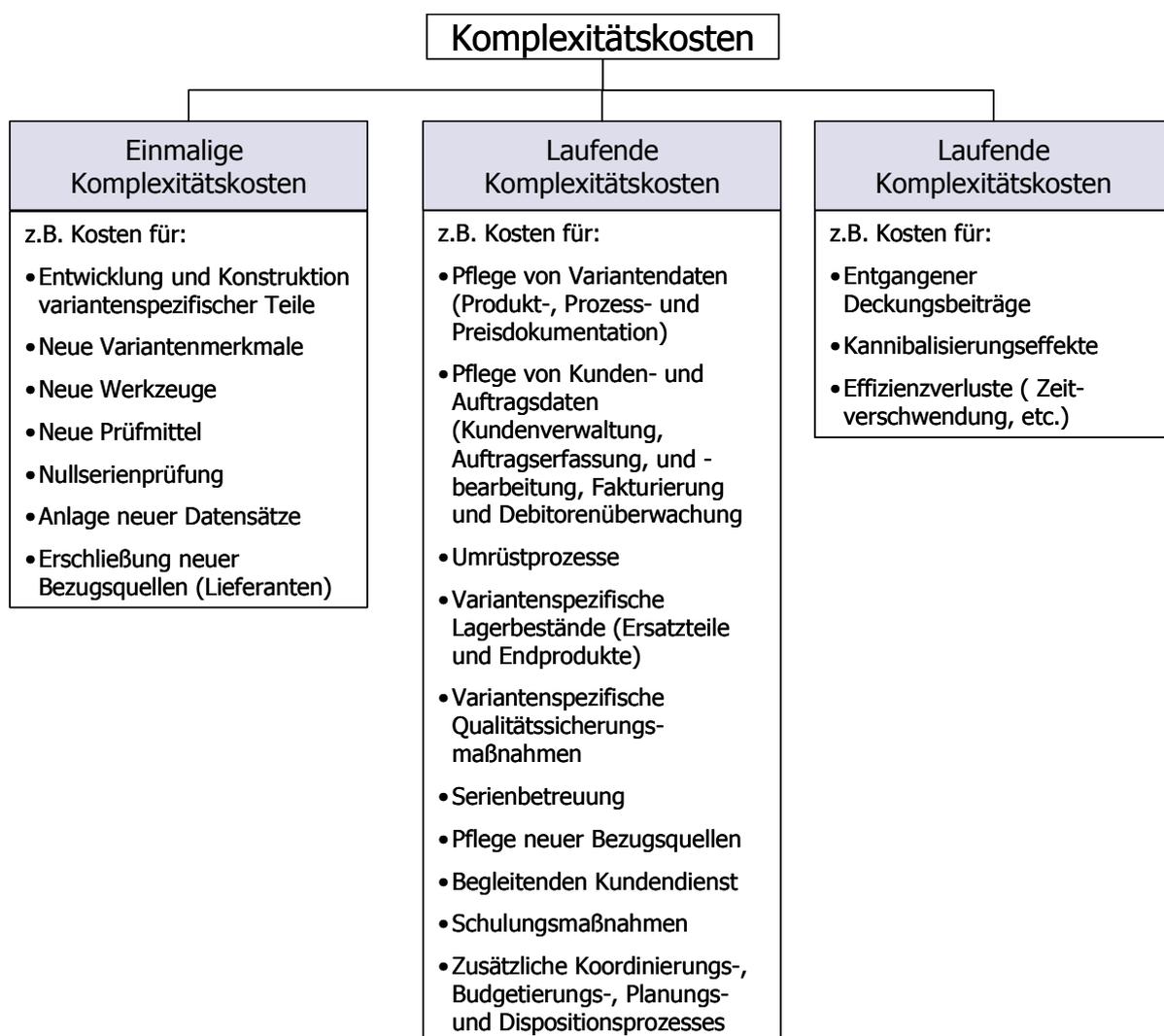


Abbildung 32: Komplexitätskostenkategorien⁴²⁰

⁴¹⁵ Reiners, Sasse (1999), S. 225

⁴¹⁶ Vgl. Homburg, Deich (1997), S. 155ff.

⁴¹⁷ Vgl. Männel (1998), S. 113

⁴¹⁸ Vgl. Roever (1994), S. 120ff.

⁴¹⁹ Vgl. Rathnow (1993), S. 20ff.

In ihrer Einteilung geben Reiners und Sasse beispielhafte Kosten für die erarbeiteten Kategorien an. Eine Detaillierung wird nicht gemacht und in welcher Weise diese Komplexitätskosten im Unternehmen nun abgebildet bzw. bewertet werden können, bleiben Sie auch schuldig.

Komplexitätskosten treten nicht punktuell auf, sondern erfassen alle Bereiche des Unternehmens⁴²¹. Eine neue Variante verursacht z. B. Entwicklungsarbeit am Anfang bei der Produkt- bzw. Variantenkreation aber auch laufende Kosten durch die eventuelle Überarbeitung oder Aktualisierung der Produktgegebenheiten. Neben der Produktentwicklung müssen die Abläufe in der Fertigung, Beschaffung, Distribution etc. angepasst werden.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass komplexe Systeme in allen Bereichen des Systems zusätzliche Kosten durch den erhöhten Aufwand im Umgang mit ihnen verursachen. Komplexitätskosten sind also hauptsächlich in der Produktionskonzeption begründet. Bei steigender Komplexität im Unternehmen entsteht u. a. ein komplexerer Prozess der Planung und Steuerung sowie in der Ausführung im Unternehmen. Der Begriff der Komplexitätskosten ist daher sehr weit gefasst. Eine einheitliche Unterteilung gibt es nicht; es wird von direkten und indirekten komplexitätsbedingten Kosten wie auch von einer Unterteilung in Kosten des dispositiven Faktors und der elementaren Faktoren, prozessinhärenter und produktkohärenten Kosten etc. ausgegangen und auch die Ausprägungen von Komplexitätskostenarten sind oft unterschiedlich benannt. In keiner erläuterten Definition von Komplexitätskosten werden alle Aspekte der strukturellen Komplexität im Unternehmen berücksichtigt. Dies ist vermutlich auch schwer zu schaffen, da die strukturelle Komplexität u. a. Komplexitätstreiber wie die Wettbewerbskomplexität inkludiert, welche oft schwer in Zahlen fassbar ist.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Komplexitätskosten *als komplexitätsbedingte Kosten des Mehraufwandes in der Führung (strategischer/taktischer Bereich) und in der Ausführung (operativer Bereich) im Materialflusssystem* verstanden werden.

Eine Berücksichtigung der Kosten aller Komplexitätsaspekte im Unternehmen im Begriff Komplexitätskosten ist schwierig bzw. ist nicht machbar. Daher erläutert der nächste Abschnitt die Auswirkungen der entwickelten Komplexitätstreiber für die Stahl- und Feuerfestindustrie auf die in der besprochenen Literatur⁴²², im Zusammenhang mit Komplexitätskosten im Unternehmen angeführten, Kostenfaktoren.

⁴²⁰ Quelle: Reiners, Sasse (1999), S. 226

⁴²¹ Wildemann (2005), S. 226

⁴²² Vgl. Reiners, Sasse (1999), S. 226, Becker (2001), S. 422, Wildemann (2002), S. 185

4.7.2 Komplexitätsbedingte Kosten im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie

Die identifizierten Komplexitätstreiber für den Materialfluss in der Stahl- und Feuerfestindustrie aus Abschnitt 4.6 werden nun hinsichtlich ihrer Wirkung auf definierte Größen im System untersucht, um eine Bewertung der entstandenen Kosten für den jeweiligen Komplexitätstreiber abgeben zu können.

Die nachfolgende Tabelle 10 zeigt Komplexitätskostenursachen bei steigender Variantenvielfalt im System auf. Typische Komplexitätskostentreiber für die Stahl- und Feuerfestindustrie finden sich in der aufwendigeren Planung von neuen Rüstfamilien und deren Integration in den Produktionsablauf. Diese Kostentreiber können, wie bei Becker⁴²³ angesprochen, den Kosten des dispositiven Faktors (erhöhter Planungs- und Steuerungsaufwand etc.) und den Kosten des elementaren Faktors (zusätzliche Beschaffungskosten etc.) zugeordnet werden.

Bereich / Lebenszyklus	F&E	Produktion	Einkauf	Vertrieb und Service	Distribution
Produktentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliche Zeichnungen • Tests und Versuche • Festlegung von Qualitätsprüfungen 	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliche Werkzeuge oder Maschinen • zusätzliche verfahrenstechnische Bedingungen • zusätzliche Arbeitspläne, Stücklisten, Rohstoffmischungen • steigende Anzahl Teilenummern 	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliche Rohstoffe, Kaufteile oder Eigenfertigungsteile • zusätzliche Lieferantenauswahl- und -suche • zusätzliche Verträge 	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliche Mitarbeiter-schulung • zusätzliche Dokumentation • aufwendigere Preissetzung 	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliche Verpackungen • zusätzliche Transportmöglichkeiten
Produktionsphase	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung aller Varianten an Änderungen • eventuell Tests und Versuche alternativer Rohstoffe • Pflege von Stammdaten aufwendiger 	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzliche Rüstfamilien • zusätzliche Wartungsarbeiten • komplexere Produktionsplanung und Steuerung • aufwendigere Qualitätssicherung • höhere Anlaufkosten • komplexere Prozesse aufgrund neuer verfahrenstechnischer Bedingungen • zusätzliche Konflikte beim Ablauf 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Einstandspreise auf Grund geringer Stück- oder Mengenzahlen • geringe Anzahl möglicher Lieferanten • zusätzlich Rohstoffengpässe • erhöhte Anzahl an Bestellungen 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Bestände von Endprodukten • mehr Fehler in der Auftragsabwicklung • größerer Anteil fehlerhafter Produkte • Verwechslungsgefahr 	<ul style="list-style-type: none"> • steigender Aufwand • zusätzliche Tourenplanung
Produktauslauf		<ul style="list-style-type: none"> • aufwendigere Auslaufplanung 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Aufwendungen für Ent-sorgungen 	<ul style="list-style-type: none"> • aufwendigere Auslaufplanung 	

Tabelle 10: Komplexitätskostenursachen bei steigender Variantenvielfalt⁴²⁴

Die nachfolgende Tabelle 11 versucht nun eine Einschätzung der üblichen Kostenanstiege durch die identifizierten Komplexitätstreiber (vgl. Abschnitt 4.6) im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie zu geben. Dabei wurde eine Checkliste mit mehreren Kosten-

⁴²³ Becker (2001, 1992)

⁴²⁴ in Anlehnung: Wildemann (2005), S. 188 modifiziert nach Rathnow (1994), S. 24, Kaiser (1995), S. 29, Meyer (2007), S. 186f. sowie nach eigenen Überlegungen

faktoren aufgestellt, die den Unternehmen Transparenz über die wahrscheinlich zu erwartenden Kostenwirkungen geben soll. Es gibt gewisse Überlappungen zwischen einzelnen Kostengrößen, da eine exakte Abgrenzung einzelner Kosten voneinander nicht vollständig möglich ist.

Insgesamt wurde aus den vorher diskutierten Quellen⁴²⁵ die Zusammenstellung von Kostenarten in Tabelle 11 entwickelt. Da die Autoren die einzelnen Kostenarten aber nicht eindeutig definieren, verbleibt es dem Unternehmen im Einzelnen festzulegen, was jeweils unter Planungskosten etc. zu verstehen ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt hierzu im Zwecke der generellen Beurteilung der Kostenwirkungen folgender Vorschlag der Begriffserklärungen:

- Planungskosten sind Kosten für die Planung von Beschaffung, Produktion und Distribution, Instandhaltung, Entsorgung etc.
- Koordinations- und Kontrollkosten sind die Kosten für die Steuerung im Betrieb.
- Konfliktkosten beziehen sich Maßnahmen zur Konfliktlösung sowie die durch Konflikte entstehende Kosten.
- Kommunikations- und Informationsaustauschkosten betreffen die Informationsweitergabe zwischen Personen und technischen Systemen.
- Suchkosten bezeichnen Kosten, welche bei der Suche nach fehlenden Materialien, Daten, Informationen, Equipment etc. entstehen.
- Datenpflege- und Systemkosten entstehen bei der Datenverarbeitung, -bearbeitung, -aufbereitung und -dokumentation.
- Lieferantenpflegekosten sind Kosten, die durch die Unterhaltung von Lieferantenbeziehungen entstehen
- Beschaffungskosten sind die Prozesskosten der Beschaffung, wie z. B. Transportkosten, Bestellkosten.
- Anpassungskosten beziehen sich auf technische Adaptierungen, maschinelle Investitionen etc. im Prozessablauf.
- Entwicklungskosten sind Kosten der Innovation und Forschung im Unternehmen.
- Vorlauf- und Anlaufkosten bezeichnen Kosten im Rahmen der Einführung neuer Produkte, Anlagen, etc., in deren Startphase wie z. B. Nullserienprüfung.
- Rüstkosten entstehen durch notwendige Änderungen der Einstellungen an Maschinen, Werkzeuge, bei Wechsel von Fertigungslosen etc. und umfassen die Kosten für die Arbeitstätigkeit sowie anteilige Kosten der eingesetzten Betriebsmittel, als auch Opportunitätskosten der nicht-produzierenden Maschine.
- Wartungs- und Instandhaltungskosten sind Kosten, die für die Erhaltung der Betriebsmittel in einsatzfähigem Zustand anfallen. Dazu zählen Kosten für die Arbeitstätigkeit, die notwendigen Materialien und Opportunitätskosten der nicht-produzierenden Maschine.
- Qualitätskosten sind Kosten der Qualitätsprüfung, der Fehlerbehebung und der Fehlerverhütung.

⁴²⁵ Vgl. Reiners, Sasse (1999), S. 226, Becker (2001), S. 422, Wildemann (2002), S. 185

- Kapitalbindungskosten sind Kosten für das im Unternehmen investierte Kapital (z. B. in Form von Lagerbeständen), die im wesentlichen Zinskosten umfassen.
- Personalproduktivitätskosten sind Kosten des Absentismus, Mangels an Fachkompetenz und Motivation etc.
- Schulungskosten entstehen u. a. durch die Einschulung von Mitarbeitern auf Produkte, veränderte Abläufe etc.
- Vertriebskosten beziehen sich auf die Prozesskosten bei der Kundenabwicklung.

In der ersten Zeile stehen die Komplexitätstreiber (vgl. Abschnitt 4.5.2) im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie und in der ersten Spalte Kostenarten, auf die diese mehr oder weniger starken Einfluss haben.

Die Stärke des Einflusses eines Komplexitätstreibers auf einen Kostenfaktor ist in drei Stufen unterteilt: Ein Doppelplus (++) bedeutet einen starke Erhöhung der entsprechenden Kosten, ein einzelnes Plus (+) signalisiert einen leichten Kostenanstieg und ein Bindestrich (-) steht für eine neutrale Wirkung. Die Kostenwirkungen wurden im Rahmen von Expertengesprächen erarbeitet bzw. aus der Literatur⁴²⁶ entnommen. Eine Erörterung der entsprechenden erhöhenden Wirkungen der Komplexitätstreiber erfolgt im Anschluss an die Darstellung.

Komplexitätstreiber \ Kostenfaktor	Sortimentsbreite/ Variantenvielfalt	Rohstoffknappheit	Informationsasymmetrie	Vielzahl an Hierarchieebenen/ Hohe Schnittstellendichte/ Starke Arbeitsteiligkeit
Planungskosten	++	++	++	++
Koordinationskosten	++	++	++	++
Kontrollkosten	++	++	++	++
Konfliktkosten	-	-	+	++
Kommunikations- und Informationsaustauschkosten	+	-	++	++
Suchkosten	-	-	++	-
Datenpflege- und Systemkosten	++	-	+	+

⁴²⁶ Vgl. Banker et al. (1990), S. 269ff., Adam, Rollberg (1959), S. 667ff., Reiners, Sasse (1999), S. 222ff., Wildemann (2005), S. 33f.

Lieferantenpflegekosten	+	++	-	++
Beschaffungskosten	+	++	+	+
Anpassungskosten	+	+	-	-
Entwicklungskosten	+	+	-	-
Vorlauf- und Anlaufkosten	++	-	-	-
Rüstkosten	++	-	-	-
Wartungs- und Instandhaltungskosten	+	-	+	-
Qualitätskosten	+	+	++	-
Kapitalbindungskosten	++	+	++	-
Personalproduktivitätskosten	-	-	+	+
Schulungskosten	++	-	-	+
Vertriebskosten	+	-	+	++

Tabelle 11: Kostenwirkungen der Komplexitätstreiber im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie (eigene Darstellung)

Alle vier Arten der Komplexitätstreiber können zu einem starken Anstieg der Planungs- und Steuerungskosten im Materialflusssystem führen. Je komplexer ein System ist, desto mehr Komponenten und gegenseitige Beziehungen bzw. Beeinflussungen umfasst es, und desto schwieriger planbar und steuerbar wird es oft. So ist ein starker Anstieg bei den Kosten durch den erhöhten Aufwand im Bereich der Planung, Koordination und Kontrolle im Umgang mit den Komplexitätstreibern sehr wahrscheinlich und wenig überraschend.

Die abweichenden Kostenwirkungen der einzelnen Komplexitätstreiber im Materialflusssystem werden nun einzeln erläutert:

Der Komplexitätstreiber **Sortimentsbreite/ Variantenvielfalt** kann sich weiters stark auf die Datenpflege- und Systemkosten auswirken, da jede neue Variante neue Kostenstellen, neue Stamm-, Ablauf-, Analysedaten etc. mit sich bringt und die Pflege der Daten immer anspruchsvoller wird, je mehr Varianten vorliegen. Auch die Vorlauf- und Anlaufkosten sowie Rüstkosten können stark ansteigen, da u. a. einige neue Tests notwendig sind, bevor alle

Einstellungen für neue Varianten den vorgegebenen Richtlinien entsprechen und eine durch Variantenreichtum bedingte Erhöhung der Rüstvorgänge stattfindet. Zusätzliche Kapitalbindungskosten können ebenfalls stark anwachsen, da u. a. neue Rohstoffe für die Erzeugung der Varianten notwendig sind und damit eine Vergrößerung des Lagerraumes und Erhöhung des Lagervolumens bedingt wird, welcher sich als ein typischer Multiplikator bei den Kosten erweisen kann. Schulungskosten, sowohl in der Beschaffung, Produktion, Distribution, Vertrieb und Entsorgung, steigen meistens durch großen Variantenreichtum stark an, da viel Wissen u. a. über die einzelnen Erzeugnisse und ihre Fertigungsschritte, Eigenschaften, Rohstoffe, Vertriebswege, Kunden etc. bekannt sein muss.

Variantenvielfalt kann aber auch zu steigenden Kommunikations- und Informationsaustauschkosten führen aufgrund der z. B. zunehmenden Datenmenge, Richtlinien bei der Produktion und Transport. Durch ein breites Sortiment steigen auch oft die Anzahl an Lieferanten und Rohstofflieferungen. Damit einher geht oft ein Wachstum der Lieferantenpflegekosten und Beschaffungskosten. Bei hohem Variantenreichtum müssen oft Anpassungen im Betrieb vorgenommen werden, z. B. die Anschaffung neuer Maschinen oder ein Umbau in der Lagerhalle, Produktion. Die Entwicklungskosten nehmen durch zusätzliche Tests, Prüfungen etc. ebenfalls zu. Ein erhöhter Bedarf an Rüstvorgängen bedingt oft einen steigenden Wartungs- und Instandhaltungsaufwand und dementsprechend auch zunehmende Kosten in diesem Bereich. Vertriebskosten steigen z. B. durch den notwendigen Einsatz vieler unterschiedlicher Packmittel, Transportmodi oft an.

Wie gerade erläutert, führt Variantenvielfalt oft zu stark ansteigenden Komplexitätskosten bei vielen Kostenarten (Tabelle 11). Nach Wildemann⁴²⁷ führt eine Variantenverdopplung zu

- einer Kostensteigerung von 20-30%
- einer geringeren Anzahl an Lernvorgängen
- einer größeren Komplexität der Abläufe
- steigenden Koordinierungskosten

Die Kostensteigerungen sind umso stärker, je traditioneller der Produktionsbetrieb organisiert ist (Abbildung 33).⁴²⁸ Und auch die Wahrscheinlichkeit, dass die roulierende Absatzplanung dem tatsächlichen Bedarf entspricht, nimmt mit zunehmender Variantenvielfalt ab.⁴²⁹

⁴²⁷ Vgl. Wildemann (2005), S. 33

⁴²⁸ Vgl. Wildemann (2005), S. 33

⁴²⁹ Vgl. Gudehus (2005), S. 253

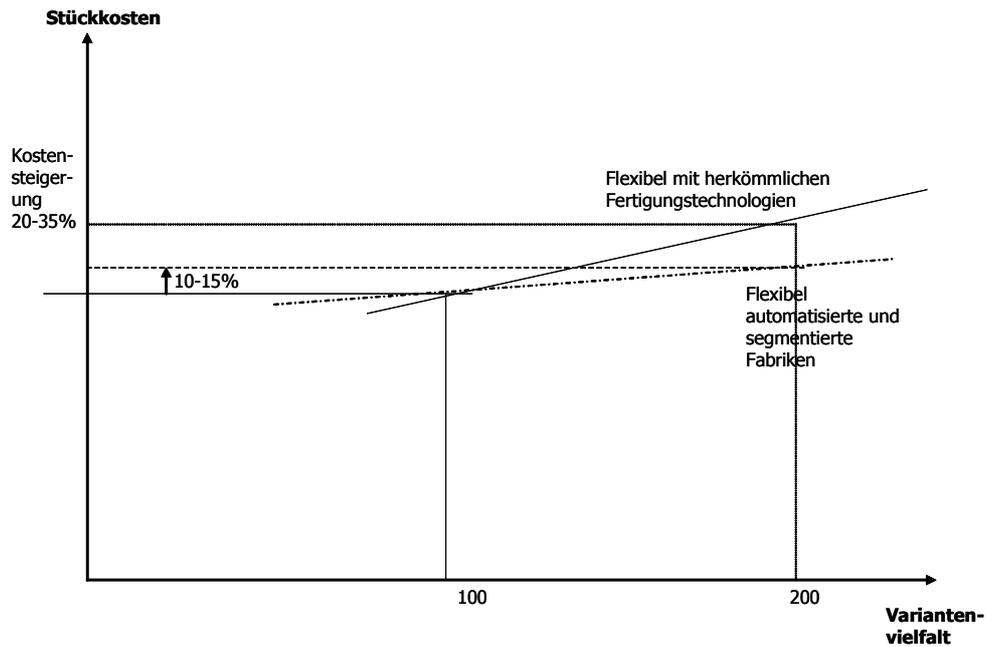


Abbildung 33: Auswirkungen einer Variantenverdopplung auf die Stückkosten⁴³⁰

Wie schon bei der Erörterung der Komplexitätstreiber im Abschnitt 4.6.3 angemerkt, bringt die Variantenvielfalt aber auch potentielle Vorteile mit sich (positive Komplexität).⁴³¹

- Steigerung der Marktanteile
- Aufbau von Markteintrittsbarrieren
- Befriedigung jedes Kundenwunsches
- schnellere Amortisation der Basisentwicklungen

So ist es wichtig eine optimale Abstimmung zwischen den Wirkungen der Variantenvielfalt zu finden, d. h. eine Abwägung zwischen den Komplexitätskosten, die durch Variantenvielfalt im Betrieb entstehen und den Erlös, der durch die Sortimentsbreite erzielt wird, muss gemacht werden.

Die Kostenwirkungen des nächsten analysierten Komplexitätstreiber, der **Rohstoffknappheit**, wirken sich oft besonders stark auf die Komplexität im Bereich der Lieferantenpflegekosten sowie Beschaffungskosten aus. Der Aufbau strategischer Lieferantenbeziehungen, die Erschließung neuer Bezugsquellen und Transportwege, etc. sind in der Stahl- und Feuerfestindustrie in Zeiten der Rohstoffverknappung⁴³² oft sehr aufwendige, und damit sehr kostenintensive Tätigkeiten. Die Rohstoffverknappung kann sich auch auf die Anpassungs- und Entwicklungskosten auswirken. Eventuell muss auf alternative oder minderwertige Rohstoffe

⁴³⁰ Quelle: Wildemann (2005), S. 33

⁴³¹ Vgl. Wildemann (2005), S. 43

⁴³² Vgl. Martens (2006), S. 82ff.

zurückgegriffen werden und damit neue Einstellungen im Betrieb getroffen werden bzw. die Entwicklung neuer Rezepturen, Abläufe etc. notwendig wird.⁴³³ Durch den Einsatz neuer oder minderwertiger Rohstoffe können die Kosten der Qualitätsprüfung und Fehlerbehandlung ansteigen. Rohstoffverknappung kann auch oft zu Hamsterkäufen bzw. zu festgelegten Abnahmemengen und damit zu einer zusätzlichen Kapitalbindung im System führen.

Durch **Informationsasymmetrie** kommt es verstärkt zu stark steigenden Kommunikations- und Informationsaustauschkosten, da u. a. oft zusätzlich nachgefragt werden muss bei Arbeitsprozessen, Auftragsabwicklungen etc. Eine andere Wirkung sind auch oft stark steigende Suchkosten aufgrund fehlender Information und Daten. Arbeitszeit muss genutzt werden, um sich die benötigten Anweisungen etc. zu besorgen. Stark zunehmende Qualitätskosten können auch vorkommen, da die Fehlerrate aufgrund von Fehl- bzw. Missinformation zunimmt. Auch stark steigende zusätzliche Kapitalbindungskosten sind oft beobachtbar aufgrund des Sicherheitsdenkens in der Beschaffung und Produktion, wenn Informationen über Bestände, Kundenwünsche, Rohstofflieferungen etc. nicht durchgängig transparent sind.

Informationsasymmetrie bedingt auch steigendes Konfliktpotential im Arbeitsumfeld. Neben zunehmenden Konfliktkosten, können auch die Personalproduktivitätskosten davon beeinflusst werden und ansteigen. Erhält der Mitarbeiter oft falsche oder keine Informationen, hat er oft einen großen Aufwand die benötigten Informationen zu besorgen (Kommunikations- und Informationsaustauschkosten, Suchkosten). Das trägt natürlich zu einer gewissen Demotivation bei und damit ist oft ein Rückgang seiner Produktivität verbunden. Die Datenpflege wird auch meistens aufwendiger wenn kein durchgängiger, effizient gesteuerter Informationsfluss vorliegt. Das hat natürlich auch Auswirkungen im Bereich der Beschaffung, der Wartung- und Instandhaltung sowie im Vertrieb. Durch fehlende Informationen bzw. falsche Daten kann der Aufwand in diesen Bereichen ansteigen und damit wiederum die Kosten beeinflussen.

Eine **Vielzahl an Hierarchieebenen, hohe Schnittstellendichte und starke Arbeitsteiligkeit** wirken sich oft neben den stark ansteigenden Planungs- und Steuerungskosten besonders auf Konfliktkosten, Kommunikations- und Informationsaustauschkosten, Lieferantenpflegekosten und Vertriebskosten aus. Konflikte im Arbeitsumfeld, in der Führung sind durch starke Arbeitsteiligkeit („Spezialistenwesen“), viele Schnittstellen etc. oft vorprogrammiert. Durch die hohe Schnittstellendichte und die Vielzahl an Hierarchieebenen ist es oft sehr aufwendig Informationen z. B. in geeigneter Form an alle User weiterzuleiten (Kommunikations- und Informationsaustauschkosten steigen stark). Durch diesen Komplexitätstreiber kön-

⁴³³ Vgl. Fransoo, Rutten (1993), S. 50f.

nen auch die Lieferantenpflegekosten stark ansteigen, wenn es z. B. mehrere Ansprechpartner für einen Kunden gibt und dadurch ein großer und langwieriger Abstimmungsbedarf zwischen Einkauf, Produktion und Vertrieb nötig ist. Damit werden natürlich auch oft die Beschaffungskosten in Mitleidenschaft gezogen und steigen zwangsbedingt an.

Die Datenpflege wird durch starken Bürokratismus im System oft erschwert und aufwendiger. So gibt es meistens u. a. unnötig viele Kostenstellen, die die Datenpflege- und Systemkosten in die Höhe treiben. Lang dauernde Entscheidungsprozesse, hohe Schnittstellendichte und starre Arbeitsstrukturen können sich auch negativ auf die Motivation des Personals bei der Ausführung auswirken, und damit auf die Personalproduktivitätskosten. Schulungskosten des Personals steigen auch oft aufgrund des erhöhten Abstimmungsbedarfes und des gegebenen Organisationsprofils an.

Neben diesen Kostenarten, die durch Komplexität beeinflusst werden, ist es auch wichtig im Betrieb zu klären, wer die wachsenden Komplexitätskosten zu tragen hat. „Komplexitätskosten dürfen nicht sozialisiert werden, d. h. auf alle Produkte (Standardware und Exoten) gleichmäßig verteilt werden“.⁴³⁴ Sonst besteht die Gefahr, dass die Standardprodukte auf dem Markt nicht mehr konkurrenzfähig sind.

Viele der Komplexitätstreiber und ihre Wirkungen auf Kosten im Unternehmen sind sicher kein Spezifikum der Stahl- und Feuerfestindustrie. Auch in der Stückgutindustrie lassen sich Komplexitätstreiber wie Informationsasymmetrie oder Variantenvielfalt identifizieren. Die Rohstoffverknappung und ihre Auswirkungen sind v. a. für die Prozessindustrie schlagend. Durch den Wirtschaftsboom im Stahl- und Feuerfestsektor⁴³⁵ spielt dieser Komplexitätstreiber aber speziell in diesen beiden Branchen der Prozessindustrie eine große Rolle.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass neben den üblicherweise stark ansteigenden Planungs- und Steuerungskosten durch die Komplexitätstreiber, sich diese oft sehr unterschiedlich auf andere Kostenfaktoren auswirken. Die Übersicht (Tabelle 11) soll als Hilfestellung verstanden werden, um komplexitätsbedingte Kosten bei typischerweise vorkommenden Komplexitätstreibern in Materialflusssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie zu identifizieren und quantifizieren. Generelle Verfahren oder Methoden zur Komplexitätskostenbestimmung sind in der Literatur selten vorhanden. Es gibt wenige Versuche eine Quantifizierung von Komplexitätskosten durchzuführen, wie z. B. von Reiners und Sasse⁴³⁶, die bedeutsame vielfaltsinduzierte Teilprozesse und deren Kostenverhalten im Regelfall abbildeten, aber keine

⁴³⁴ Adam, Rollberg (1995), S. 668f.

⁴³⁵ Vgl. Ameling (2006), S. 57, Bein (2007), S. 66ff., Handelsblatt Jahrestagung Stahlmarkt 2007 (2007), S. 106ff.

⁴³⁶ Vgl. Reiners, Sasse (1999), S. 222ff.

genauen Angaben zur Herleitung machten. Einen weiteren Ansatz lieferte Wu et al.⁴³⁷, die Komplexitätsindexmaße aus der Informationstheorie zur Berechnung der betrieblichen Komplexitätskosten aufgriffen, die Verknüpfung zwischen der betrieblichen Komplexität und den „Betriebskosten einer Supply Chain“ mittels Simulation und Warteschlangenmodell bewiesen und operative Komplexität als eine bedeutende Kostenquelle identifizierten. Banker et al.⁴³⁸ haben im Rahmen eines Praxisprojektes eine Methode zur Ermittlung von produkt- und prozesskomplexitätsbedingten Kosten für ein spezifisches Unternehmen entwickelt, dessen Anwendbarkeit aber auf andere Unternehmen mit vielen Schwierigkeiten verbunden ist. Eine projektspezifische Arbeit von Kriegl⁴³⁹ beschäftigt sich mit der Ermittlung von Komplexitätskosten unter besonderer Berücksichtigung der Variantenvielfalt am Beispiel eines Herstellers der Feuerfestindustrie unter zu Hilfenahme der Prozesskostenrechnung. Das Thema Komplexitätskosten ist seit einigen Jahren präsent in Wirtschaft und Praxis, doch gibt es bis jetzt keine allgemein gültigen Konzepte, Formeln etc. zur exakten Bestimmung dieser Kosten. Reiner und Sasse⁴⁴⁰ führen dazu an, dass in der traditionellen Kostenrechnung eine mangelhafte Erfassungs-, Abbildungs- und Verrechnungsmöglichkeit der Komplexitätskosten vorherrscht.

Für die Messung und Berechnung von Komplexitätskosten ist noch keine allgemein anwendbare Lösung gefunden und es Bedarf noch einiger wissenschaftlichen Arbeit auf diesem Gebiet.

Im Kapitel Komplexität wurde für das Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie aufgezeigt, dass bestimmte komplexe Eigenschaften und Komplexitätsarten in unterschiedlichem Ausmaße in diesen Systemen vorhanden sind und damit die Planung und Steuerung dieser Systeme zusätzlich zu gegebenen Restriktionen erschweren. Neben dieser Identifizierung von Komplexität wurden Maßnahmen zur Reduktion, Vermeidung bzw. Beherrschung von Komplexität und Komplexitätstreibern in diesen Branchen vorgeschlagen und diskutiert. Durch Umsetzung der Regeln zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung aus Abschnitt 3.5 könnte u. a. die Entstehung von Komplexität im Materialflusssystem eingeschränkt werden. Diese erarbeiteten Maßnahmen können aber auch in vielen anderen komplexen Systemen angewendet werden; dies zeigt sich durch die Übereinstimmung einiger Regeln mit allgemeinen Möglichkeiten zur Komplexitätsreduktion, -beherrschung und -vermeidung aus der Literatur. Komplexe Systeme, wie Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie, bedingen durch den hohen Steuerungs- und Planungsaufwand zusätzliche

⁴³⁷ Vgl. Wu et al. (2007), S. 217ff.

⁴³⁸ Vgl. Banker et al. (1990), S. 269ff.

⁴³⁹ Vgl. Kriegl (1996)

⁴⁴⁰ Vgl. Reiners, Sasse (1999), S. 227f.

Kosten. Dass Komplexität hohe Kosten verursacht ist für die meisten Unternehmen nur selten klar bzw. abschätzbar. Bei der Untersuchung und Analyse von Komplexitätskosten im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie musste festgestellt werden, dass die Komplexitätskosten sehr schwer in Zahlen fassbar sind, messbar sind, und oft auf eine subjektive Einschätzung eines Experten zurückgegriffen wird. Es gibt kaum Ansätze zur Entwicklung einer allgemein gültigen Quantifizierungsmethode für diese Kosten, da dieses Thema sehr komplex ist um es in einem allgemein gültigen Weg zu behandeln. Einer der Gründe ist sicherlich die fehlende Basis in der Kostenrechnung zur Erfassung und Bewertung der Komplexitätskosten und der oft nicht einheitlichen Definition welche Kostenaspekte komplexitätsbedingt sind oder nicht. Eine Vertiefung dieses Themas wird an dieser Stelle verworfen, da dies sicherlich den Rahmen dieser Dissertation sprengen würde.

5 Konzept zur Bewertung von Komplexität in der Prozessindustrie

Nach Analyse und Untersuchungen zum Materialfluss und der Komplexität im gewählten Branchencluster der Prozessindustrie, soll nun auf Bewertungsmöglichkeiten von Komplexität in Produktionssystemen der Stahl- und Feuerfestindustrie eingegangen werden. Im Abschnitt 5.1 wird auf generelle Größen zur Komplexitätsbewertung eingegangen, um einen Überblick über die vorhandenen Komplexitätsbewertungsmaße zu geben. Im Abschnitt 5.2 wird aufgezeigt, wie sich Komplexität für Varianten analysieren und bewerten lässt. Im nachfolgenden Abschnitt 5.3 wird die Umsetzung dieser Methode am Beispiel einer gewählten Fertigungsart der Feuerfestindustrie aufgezeigt.

5.1 Messung und Abbildung von Komplexität

Dieser Abschnitt zeigt mögliche Maße zur Bewertung bzw. Messung von Komplexität auf, um eine Übersicht über die Vielfalt sowie über das Herkunftsgebiet der einzelnen Maße zu informieren und dabei Schwierigkeiten im Umgang mit der Messung von Komplexität in komplexen Systemen zu erläutern. Dabei wird auch eine Größe zur Komplexitätsmessung von Algorithmen, die Laufzeitkomplexität erläutert, welche anschließend dazu verwendet wird Komplexität im Materialflusssystem der Feuerfestindustrie zu evaluieren.

Laut Flückinger und Rauterberg⁴⁴¹ sind die wichtigsten Maße axiomatische Komplexitätstheorie, algorithmische Komplexität, logische Tiefe und thermodynamische Tiefe.

Folgende Aufzählung soll einen Überblick und kurze Beschreibung der einzelnen Maße geben:⁴⁴²

- **Axiomatische Komplexitätstheorie, Berechnungskomplexität:** Die wichtigsten mathematischen Komplexitätsmaße werden in der axiomatischen *Komplexitätstheorie* behandelt. Basis für alle diese Betrachtungen ist die Turingmaschine, mit deren Hilfe verschiedene Komplexitätsmaße eingeführt werden können, die alle eine gemeinsame mathematische Theorie haben. Dabei werden folgende Maße unterschieden: Die *Bandkomplexität*, d.h. wie viel Band der Turingmaschine wurde belegt, die *Zeitkomplexität*, d.h. wie viele Schritte hat die Turingmaschine benötigt, zu enden, und die *Umkehrkomplexität*, wie oft hat der Lese-Schreibkopf der Turingmaschine die Richtung gewechselt.⁴⁴³
- **Algorithmische Komplexität:** Ähnlich der Komplexitätstheorie geht die algorithmische Komplexität *auch* von der Turingmaschine aus. Sie definiert die Komplexität eines Problems als die Länge der kürzesten Turingmaschine, die dieses Problem lösen kann.⁴⁴⁴ Diese Größe wird auch Kolmogorow-Komplexität genannt.⁴⁴⁵

⁴⁴¹ Vgl. Flückinger, Rauterberg (1995), S. 2

⁴⁴² Vgl. Flückinger, Rauterberg (1995), S. 6ff.

⁴⁴³ Vgl. Für tiefer gehende Informationen wird an dieser Stelle auf Schöning (1985) verwiesen.

⁴⁴⁴ Vgl. Hierzu vergleiche Chaitin (1974).

⁴⁴⁵ Vgl. Richter, Rost (2004), S. 121

- Logische Tiefe: Die logische Tiefe berechnet die Komplexität eines Problems. Es ist jene Zeit, welche das kürzeste Programm benötigt, um das vorliegende Problem zu lösen. Die logische Tiefe ist nahe verwandt mit der Berechnungskomplexität. Die Berechnungskomplexität betrachtet das schnellste Programm, wogegen die logische Tiefe das kürzeste betrachtet.⁴⁴⁶
- *Komplexität der Kommunikation*: Die Komplexität einer Kommunikation zwischen zwei Partnern ist definiert durch die Anzahl der zwischen den Partnern hin und her gesandter Bits. Die Partner müssen sich ausgehend von zwei unterschiedlichen Positionen auf eine der möglichen Lösungen einigen. Jene Bits werden gezählt, die im besten, d. h. im minimalen Fall hin und her geschickt werden müssen. „Die generelle Beobachtung ist, dass je ungeordneter das Problem ist, desto mehr Bits müssen kommuniziert werden und desto komplexer ist die Kommunikation. Komplexität und Unordnung sind verwandt.“⁴⁴⁷
- Bedingte Komplexität: Die Komplexität eines dynamischen Systems kann durch Symmetrie beschrieben werden. Dabei unterscheidet man die gewöhnliche Symmetrie, d.h. wiederholte Strukturen, aber auch statistische Regularität. Ein System ist komplex, falls es aus vielen Symmetrien zusammengesetzt ist.⁴⁴⁸
- *Thermodynamische Tiefe*: Die thermodynamische Tiefe ist ähnlich der logischen Tiefe. Sie stammt aber aus der Physik und nicht aus der Mathematik. Die thermodynamische Tiefe ist definiert „als die Menge von Information (nach Shannon) die beim tatsächlichen Entstehungs- und Entwicklungsprozess eines Objektes (oder Systems) aussondiert wurde (Exformation).“ Dynamische Systeme reichen in ihrem Ordnungsgrad von völliger Ordnung bis zu Chaos.⁴⁴⁹ Lloyd und Pagels erkannten, dass Komplexität irgendwo in der Mitte der Reichweite des Ordnungsgrades am höchsten ist.
- *Informationstheorie*: Als wichtiger Bestandteil vieler Betrachtungen über Komplexität ist das Shannon'sche Informationsmaß.⁴⁵⁰ Es misst Information aus der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses.⁴⁵¹
- *Inkongruität*: Die Inkongruität ist ein Maß aus der Softwareergonomie. In diesem Gebiet der Informatik und der Arbeitspsychologie geht es darum herauszufinden wie benutzerfreundlich Software ist. Eine grundlegende Frage für diese Untersuchungen ist: Wie komplex ist ein Programm?⁴⁵²

Eine weitere wichtige Größe ist die Komplexität von Algorithmen, welche nicht mit der algorithmischen Komplexität verwechselt werden darf. Dabei lassen sich zwei Maße unterscheiden, die so genannte Laufzeitkomplexität oder Zeitkomplexität und die Speicherplatzkomplexität, welche auch Raumkomplexität genannt wird.⁴⁵³

Laufzeitkomplexität:

Bei der Laufzeitkomplexität verfolgt man im Allgemeinen drei Grundgedanken:

⁴⁴⁶ Vgl. Flückinger, Rauterberg (1995), S. 8f.

⁴⁴⁷ Vgl. Flückinger, Rauterberg (1995), S. 11

⁴⁴⁸ Für tiefer gehende Betrachtungen vergleiche Crutchfield, Young (1989)

⁴⁴⁹ Hierzu vergleiche Lloyd, Pagels (1988).

⁴⁵⁰ Vgl. Shannon, Weaver (1949)

⁴⁵¹ Weiterentwicklungen siehe Traub, Wasilikowski, Wozniakowski (1988); Traub (1988)

⁴⁵² Vgl. Flückinger, Rauterberg (1995), S. 16f.

⁴⁵³ Schöning (1997), S. 151f; RTC (2004)

- Der erste ist die Betrachtung der Laufzeit in Abhängigkeit der Eingabedaten des Algorithmus. Diese Abhängigkeitsuntersuchung ist wichtig, da man bei der Laufzeitbetrachtung das Verhalten eines Algorithmus' bei wachsender Anzahl der Eingabewerte untersuchen will.⁴⁵⁴
- Zum Zweiten sollen Konstanten außer Acht gelassen werden. Dieses Ziel ist zu verfolgen, da mittels der O-Notation eine Klasse von Funktionen angegeben werden soll, die die Laufzeit eines Algorithmus' beschreiben, ohne von konstanten Faktoren wie dem verwendeten Rechnermodell, der eingesetzten Programmiersprache etc. abhängig zu sein. Bei der O-Notation soll ohne Bedeutung sein, wie viel Zeit ein Rechner für eine "Basis-Operation" in Anspruch nimmt, ob der Algorithmus also auf einem Supercomputer oder einem PC läuft - es soll nur untersucht werden, wie sich der Algorithmus bei n Eingabewerten verhält, wie viele Basis-Operationen in diesem Fall ausgeführt werden müssen.⁴⁵⁵
- Der dritte Grundgedanke richtet sich an die Untersuchung einer oberen Schranke, d.h. man untersucht mit der O-Notation immer die Laufzeit im ungünstigsten Fall, im "worst case".⁴⁵⁶ Neben der Betrachtung des „worst case“, der maximalen Anzahl an Schritte, die ein Algorithmus ausführt, werden auch untere Schranken „best case“ ermittelt sowie die durchschnittliche Anzahl an auszuführenden Basisoperationen bzw. Schritten.

Für die einzelnen Fachgebiete wurde – wie auch der Begriff Komplexität – unterschiedliche Maßgrößen für die Messung von Komplexität entwickelt. Dadurch kann es auch zu unterschiedlichen Erkenntnissen bei einem Problem kommen:

Komplexität als Maß für die Struktur eines Systems hat eine wichtige Verbindung mit der Shannon'schen Information dieser Struktur. Die Shannon'sche Information ist maximal, wenn das System völlig ungeordnet ist, also keine sichtbaren Strukturen aufweist. Ist das System völlig geordnet, dann ist die Komplexität des Systems klein. Somit stellt sich die Frage, wie groß die Komplexität ist, wenn das System völlig ungeordnet ist. Die algorithmische Komplexität gibt diesem System maximale Komplexität, es ist völlig zufällig. Das Gegenteil ist bei der bedingten Komplexität oder auch der logische Tiefen der Fall, beide geben diesem System eine sehr kleine Komplexität. Bei diesen beiden Komplexitätsmaßen ist die Komplexität dort maximal, wo die Struktur am aufwendigsten zu berechnen ist. Bei der bedingten Komplexität ist die Struktur aus mehreren Symmetrien aufgebaut, bei der logischen Tiefe braucht die Berechnung immensen Aufwand. Die thermodynamische Tiefe und die Inkongruität messen ähnlich: sie sind irgendwo zwischen totaler Ordnung und Chaos am größten.⁴⁵⁷

⁴⁵⁴ RTC (2004)

⁴⁵⁵ RTC (2004)

⁴⁵⁶ RTC (2004)

⁴⁵⁷ Vgl. Flückinger, Rauterberg (1995), S. 23

5.2 Bewertung von Komplexität im Materialflusssystem der Feuerfestindustrie

Komplexität im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie hat viele unterschiedliche Ursachen wie z. B. Variantenreichtum etc. (siehe Erläuterungen Kapitel 4). Die Planung und Steuerung vieler Varianten und ihres Ablaufes im Produktionsgeschehen ist daher oft mit einem großen Aufwand verbunden.⁴⁵⁸ In diesem Abschnitt soll nun mittels Anlehnung an die Messgröße der Laufzeitkomplexität von Algorithmen ein neues Instrument vorgestellt werden, mit dem Aussagen zur Komplexität im System getroffen werden können. Man kann damit den „Komplexitätsgrad“ unterschiedlicher Variantenkombinationen im Produktionsgeschehen einschätzen d. h. durch den Vergleich verschiedener Variantenkombinationen lässt sich feststellen, welche Kombination(en) den geringsten Aufwand im System bedeutet und damit die Planung und Steuerung der Abläufe vereinfacht. Weiters kann mit Hilfe dieses Konzeptes die Auswirkung neuer Anlagen bzw. erhöhter Fassungsvermögen auf den Komplexitätsgrad für gegebene Variantenkombinationen beurteilt werden.

Annahme: Eine wiederholbare und standardisierte Produktion läuft nach einem bestimmten Algorithmus ab, der aus einzelnen Teilschritten besteht, z. B. Unterfunktionen, Schleifen, etc.

Anhand eines konkreten standardisierten Produktionsablaufes in einer Sparte der Feuerfestindustrie (geformte, ungebrannte Steine) sollen für jeden Produktionsschritt und anschließend für die gesamte Produktion für verschiedene Variantenkombinationen bzw. veränderte Produktionsszenarien (mehr/weniger Anlagen, veränderte Fassungsvermögen) Komplexität mittels Anlehnung an die Größe der Laufzeitkomplexität als „benötigte Schrittzahl“ quantifiziert werden. Unter Schrittzahl wird im Produktionsgeschehen z. B. die Anzahl an Sintervorgängen, an Mischvorgängen etc. verstanden.

Komplexität ergibt sich allgemein über die Anzahl an Elementen und ihrer Beziehungen im System.⁴⁵⁹ Die Schritte sind einerseits als Elemente im obigen Sinn zu sehen und erzeugen andererseits auch Abhängigkeiten, in zeitlicher und technologischer Hinsicht, d. h. je mehr Schritte in einem Produktionsablauf vorhanden sind, desto mehr potenzielle Abhängigkeiten können sich im System ergeben.

Die Größenordnung an Schritten bei gegebener Variantenkombination wird beim jeweiligen Fertigungsabschnitt angegeben. Hierbei soll die maximale Anzahl an benötigten Schritten, „worst case“, die minimale Anzahl an benötigten Schritten, „best case“ und die durchschnittliche Anzahl an benötigten Schritten, „average case“ ermittelt werden. Zeit spielt in dieser

⁴⁵⁸ Vgl. Wildemann (2005), S. 33ff.

⁴⁵⁹ Vgl. Tang und Salminen (2001), S.125ff.; Heina (1999); Beer (1992)

Betrachtung keine Rolle, was auch einen Grundgedanke der Laufzeitkomplexität darstellt. Es geht nicht darum, wie lange die einzelnen Operationen bzw. Schritte brauchen, sondern wie viele Schritte im jeweiligen Fall auszuführen sind (siehe auch Erklärung Laufzeitkomplexität im Abschnitt 5.1).

Bei der Interpretation der Ergebnisse kann ein Gewichtungsfaktor für die einzelnen Prozessabschnitte berücksichtigt werden, da Schritte in sich wiederum Teilschritte aufweisen können. Damit kann es unterschiedliche Komplexitätsgrade der einzelnen Prozessabschnitte geben, z. B. in zeitlicher oder technologischer Natur. Um eine realitätsnähere Abbildung der Komplexitätsdimension zu schaffen, soll daher ein Vorschlag zur Einführung eines Gewichtungsfaktors in einem konkreten Szenario für die einzelnen Schritte aufgezeigt werden.

Die Frage die sich bei der Berechnung der Schrittzahl stellt: Lassen sich mittels der Komplexitätsanalyse, des im Modell aufgezeigten und der realen Welt angenäherten Produktionssituation, sinnvolle Rückschlüsse auf Komplexität und Möglichkeiten zur Vereinfachung im Produktionsprozess machen?

Durch die Gegenüberstellung der Komplexität, ausgedrückt über die Schrittzahl verschiedener Variantenkombinationen, kann festgestellt werden, welche Kombinationen die Komplexität in der Produktion durch eine geringe Schrittzahl potenziell reduzieren bzw. bei welchem Fertigungsabschnitt die Anschaffung einer neuen Anlage bzw. Änderung des Fassungsvermögens die Schrittzahl stark beeinflusst.

Für die Praxis heißt das, wenn man die Schrittzahl verschiedener Variantenkombinationen bestimmt, die schrittminimale(n) Kombination(en) zu einem komplexitätsärmeren System führt bzw. führen und Maßnahmen zur Vereinfachung im System daraus abgeleitet werden können. Man erhält durch diese Berechnung eine neue Entscheidungsvariable für die Produktionsplanung, welche Einfluss auf die Reihenfolgeplanung haben kann.

Anhand einer konkreten Fertigungslinie eines Feuerfestherstellers soll die Berechnung der Komplexitäten für verschiedene Variantenkombinationen und die daraus sich ergebenden Rückschlüsse auf das Produktionssystem aufgezeigt werden. Im Rahmen von Interviews bzw. aus Firmendaten werden die benötigten Werte (Produktvarianten, Fertigungsaufträge, Aggregatsgrößen, -anzahl, Maximalmengen, Mindestmengen etc.) ermittelt.

Der allgemeine Prozessablauf bei geformten, ungebrannten Steinen ist Abbildung 34 zu entnehmen. Der rot markierte Bereich stellt die Abschnitte in der Produktion dar, welche die Analyse betrachtet. Grundsätzlich läuft folgender Prozess ab: Es gibt meistens mehrere Silos aus denen Rohstoffe für die Mischung bestimmter Varianten entnommen werden. Manche

dieser Rohstoffe müssen bevor sie zusammengemischt werden, gesintert werden. Dann wird gemischt. Anschließend werden die einzelnen Mischungen in Formen gepresst, dabei können die Formate aber variieren d. h. aus einer Mischungsvariante können mehrere Varianten beim Pressen werden. Nach dem Pressen wird getrocknet, meistens in Öfen. Anschließend werden noch manche Varianten getempert, auch in einem Ofen, andere nicht.

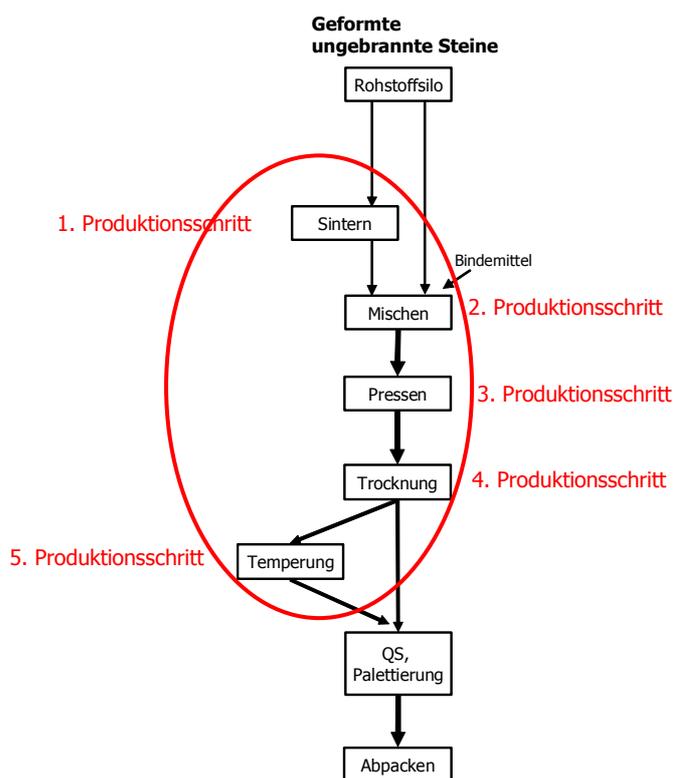


Abbildung 34: Produktionsablauf bei geformten, ungebrannten Steinen (Eigendarstellung in Anlehnung an BMLFUW⁴⁶⁰)

Da bestimmte Temperaturen für die einzelnen Varianten in den Öfen vorherrschen müssen, müssen einige Varianten einzeln getempert werden. Die Rohstoffe können nicht gemeinsam gesintert werden. Manche Produktionsschritte müssen sozusagen variantenrein durchgeschritten werden.

Die aufgestellten Formeln sind auch leicht für andere Fertigungslinien, z. B. für gebrannte Steine modifizierbar, wie auch anhand eines Praxisbeispiels im nächsten Abschnitt verdeutlicht wird.

⁴⁶⁰ Vgl. BMLFUW (2003), S. 25ff.

Folgende Notation liegt den Formeln zugrunde:

S^{\max}	maximale Anzahl an Schritten „worst case“ (s ..Sintern, m ..Mischen, p ..Pressen, t ..Trocknen, te ..Tempern)
S^{\min}	minimale Anzahl an Schritten „best case“ (s ..Sintern, m ..Mischen, p ..Pressen, t ..Trocknen, te ..Tempern)
S^{\emptyset}	durchschnittliche Anzahl an Schritten (s ..Sintern, m ..Mischen, p ..Pressen, t ..Trocknen, te ..Tempern)
n	Anzahl an Varianten (s ..Sintern, m ..Mischen, p ..Pressen, t ..Trocknen, te ..Tempern)
k	Anzahl an Mengen
i	Laufvariable für Varianten ($i=1$ bis n)
j	Laufvariable für Mengen ($j=1$ bis k)
m_{ij}	Menge j der Variante i (die in einem Produktionsdurchlauf produzierte Menge z.B. aufgrund technologischer Gegebenheiten)
a_{ij}	Anzahl der Fertigungsaufträge für Variante i in der Menge j
a_i	Anzahl der Fertigungsaufträge für Variante i
F	Fassungsvermögen der jeweiligen Aggregate (s ..Sinterofen, m ..Mischer, p ..Presse, t ..Trocknungsofen, te ..Temperofen)
K	Anzahl an Aggregaten (s ..Sinterofen, m ..Mischer, p ..Presse, t ..Trocknungsofen, te ..Temperofen)

Abbildung 35: Abkürzungsverzeichnis

Maximale Anzahl an Schritten („worst case“)

$$\sum_{i=1}^n S^{\max}(n) = \sum_{i=1}^n \left\lceil \frac{\max(m_i)}{F * K} \right\rceil \quad (1)$$

Falls das Fassungsvermögen unterschiedlich ist lautet der Nenner: $F_1 + F_2 + \dots + F_n$

Bei der Berechnung der oberen Schranke nimmt man für die einzelnen Varianten die Maximalmenge, die in einem Produktionsdurchlauf aufgrund technologischer, verfahrenstechni-

scher etc. Gründe erzeugt wird und dividiert diese durch die Aggregatsgröße multipliziert mit der Anzahl an Aggregaten. Die Summe aus den einzelnen Varianten ergibt für eine bestimmte Variantenkombination die maximale Anzahl an Schritten beim jeweiligen Produktionsschritt. Zur Evaluierung dieser maximalen Menge in einem Produktionsdurchlauf kann auf Vergangenheitswerte zurückgegriffen werden, oder durch Befragungen die benötigten Informationen beschafft werden.

In den angegebenen Formeln besteht die Annahme, dass falls mehrere Anlagen zum Sintern etc. vorhanden sind, diese gleich groß sind. Im Nenner der jeweiligen Formel multipliziert man somit das Fassungsvermögen mit der Anzahl an vorhandenen Anlagen. Falls diese Annahme in einem Unternehmen nicht zutrifft, kann man im Nenner durch einfache Addition der unterschiedlichen Fassungsvermögen diese Prämisse umgehen.

Aus der nachfolgenden Abbildung 36 (Beispiel) kann für n Varianten die jeweilige Schwankungsbreite der produzierten Mengen sowie die Maximalmenge (zur Berechnung der oberen Schranke) und die Mindestmenge (zur Berechnung der unteren Schranke) abgelesen werden.

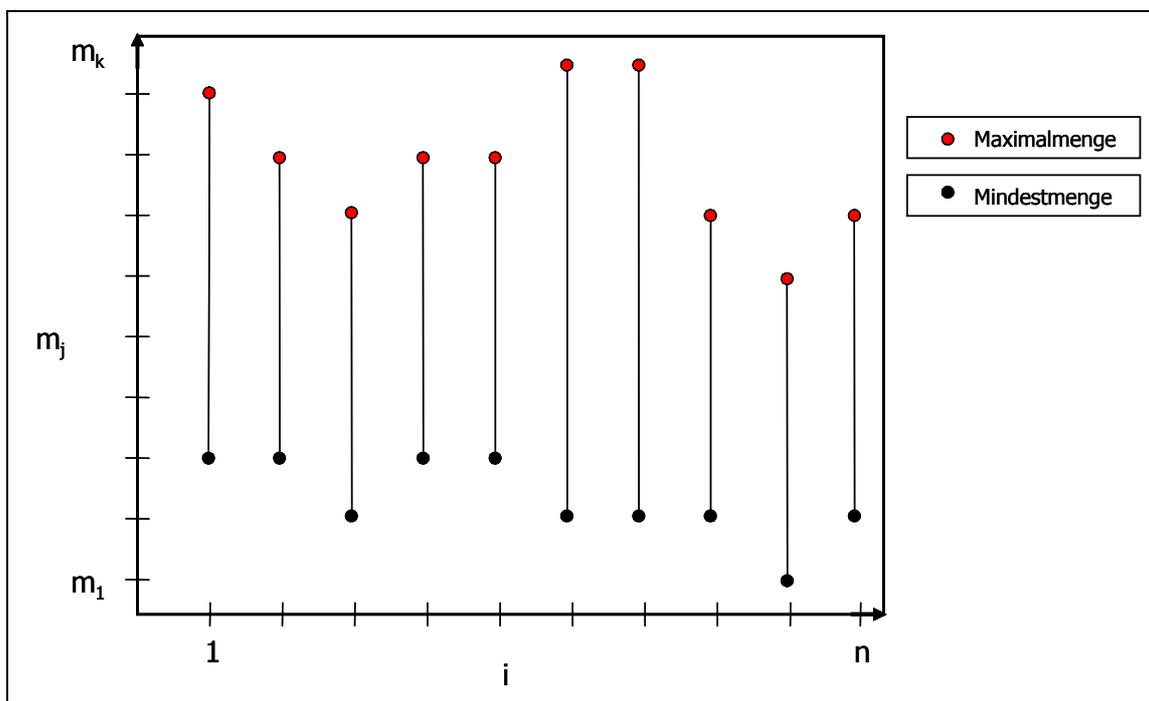


Abbildung 36: Grafische Darstellung der Schwankungsbreiten an produzierten Mengen einzelner Varianten (eigene Darstellung, beispielhaft)

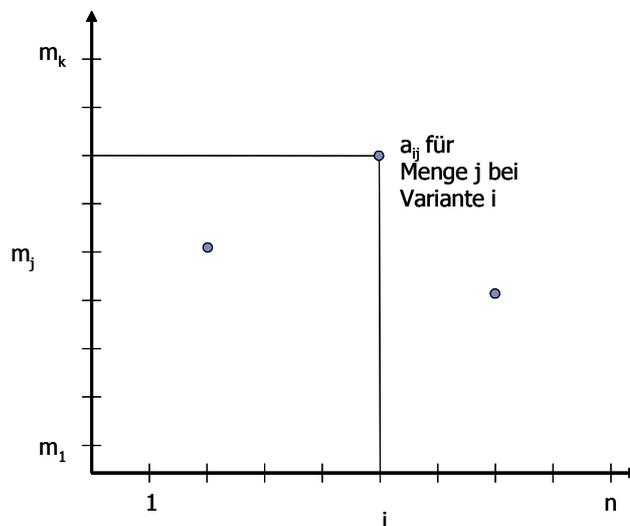
Minimale Anzahl an Schritten („best case“)

$$\sum_{i=1}^n S^{\min}(n) = \sum_{i=1}^n \left\lceil \frac{\min(m_i)}{F * K} \right\rceil \quad (2)$$

Bei der Berechnung der minimalen Schrittzahl, „best case“, wird von der Mindestmenge einzelner Varianten ausgegangen. Die Formel unterscheidet sich somit nur durch die betrachteten Mengen für die einzelnen Varianten von der Formel für den „worst case“.

Durchschnittliche Anzahl an Schritten

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S^{\phi}(n) &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F * K} \right\rceil * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F * K} \right\rceil * a_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$



Für die durchschnittliche Anzahl an benötigten Schritten von n Varianten bildet man die Summe über das Produkt der Anzahl der Schritte pro möglicher Produktionsmenge j und Variante i $\left(\left\lceil \frac{m_{ij}}{F * K} \right\rceil \right)$ und der Anzahl an Fertigungsaufträgen der Produktionsmenge j und Variante i (a_{ij}) und dividiert diese durch die Anzahl der Fertigungsaufträge für Variante i (a_i) und summiert dies über die n Varianten auf. Mathematisch korrekt ausgedrückt, bildet man

somit die Summe der durchschnittlichen Produktionsschritte für n Varianten. Diese Berechnung bezieht sich auf ein Zeitintervall. Man kann somit von einem „average case“ eines bestimmten Zeitintervalls sprechen. Je mehr Zeitintervalle beobachtet werden, desto genauer können die Berechnung der allgemein gültigen durchschnittlichen Schrittzahl und die Bewertung des „average case“ erfolgen.

Generell werden Varianten, welche in einem Produktionsprozess gemeinsam verarbeitet werden können, als eine Variante in diesem Prozess behandelt. Es gibt einige Prozesse in denen eine Zusammenfassung einzelner Varianten nicht möglich ist.

Für den gegebenen Produktionsverlauf in Abbildung 34 ergeben sich folgende Komplexitätsbewertungsformeln:

- 1. Produktionsschritt: Sintern

Maximale Anzahl an Schritten („worst case“)

$$\sum_{i=1}^{n_S} S^{\max}(n_S) = \sum_{i=1}^{n_S} \left[\frac{\max(m_i)}{F^S * K^S} \right] \quad (4)$$

Minimale Anzahl an Schritten („best case“)

$$\sum_{i=1}^{n_S} S^{\min}(n_S) = \sum_{i=1}^{n_S} \left[\frac{\max(m_i)}{F^S * K^S} \right] \quad (5)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_S} S^{\phi}(n_S) &= \sum_{i=1}^{n_S} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^S * K^S} \right] * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_S} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^S * K^S} \right] * a_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

Beim Sintern wird für die einzelnen Varianten die Anzahl an Schritten berechnet, welche die Verarbeitung ihrer Rohstoffe benötigt. n_S steht in diesem Fall für die unterschiedlichen Varianten an Rohstoffen, die gesintert werden müssen.

- 2. Produktionsschritt: Mischen

Maximale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_M} S^{\max}(n_M) = \sum_{i=1}^{n_M} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{F^M * K^M} \right\rceil \quad (7)$$

Minimale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_M} S^{\min}(n_M) = \sum_{i=1}^{n_M} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{F^M * K^M} \right\rceil \quad (8)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_M} S^{\phi}(n_M) &= \sum_{i=1}^{n_M} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^M * K^M} \right\rceil * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_M} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^M * K^M} \right\rceil * a_{ij} \end{aligned} \quad (9)$$

- 3. Produktionsschritt: Pressen

Maximale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_P} S^{\max}(n_P) = \sum_{i=1}^{n_P} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{F^P * K^P} \right\rceil \quad (10)$$

Minimale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_P} S^{\min}(n_P) = \sum_{i=1}^{n_P} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{F^P * K^P} \right\rceil \quad (11)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_P} S^\phi(n_P) &= \sum_{i=1}^{n_P} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^P * K^P} \right] * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_P} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^P * K^P} \right] * a_{ij} \end{aligned} \quad (12)$$

- 4. Produktionsschritt: Trocknen

Maximale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_T} S^{\max}(n_T) = \sum_{i=1}^{n_T} \left[\frac{\max(m_i)}{F^T * K^T} \right] \quad (13)$$

Minimale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_T} S^{\min}(n_T) = \sum_{i=1}^{n_T} \left[\frac{\max(m_i)}{F^T * K^T} \right] \quad (14)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_T} S^\phi(n_T) &= \sum_{i=1}^{n_T} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^T * K^T} \right] * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_T} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^T * K^T} \right] * a_{ij} \end{aligned} \quad (15)$$

- 5. Produktionsschritt: Tempern

Maximale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\max}(n_{TE}) = \sum_{i=1}^{n_{TE}} \left[\frac{\max(m_i)}{F^{TE} * K^{TE}} \right] \quad (16)$$

Minimale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\min}(n_{TE}) = \sum_{i=1}^{n_{TE}} \left[\frac{\max(m_i)}{F^{TE} * K^{TE}} \right] \quad (17)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\phi}(n_{TE}) &= \sum_{i=1}^{n_{TE}} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^{TE} * K^{TE}} \right] * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_{TE}} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F^{TE} * K^{TE}} \right] * a_{ij} \end{aligned} \quad (18)$$

Für den gesamten gegebenen Produktionsprozess ergibt sich die maximale, minimale bzw. durchschnittliche Anzahl an Schritten der jeweiligen Variantenkombination aus der Summe der Schrittzahl der Einzelprozesse:

Maximale Anzahl an Schritten für eine gegebene Variantenkombination im gesamten Prozess:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S^{\max}(n)_{GES} &= \sum_{i=1}^{n_S} S^{\max}(n_S) + \sum_{i=1}^{n_M} S^{\max}(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\max}(n_P) + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_T} S^{\max}(n_T) + \sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\max}(n_{TE}) = \sum_{i=1}^{n_S} \left[\frac{\max(m_i)}{F^S * K^S} \right] + \\ &\sum_{i=1}^{n_M} \left[\frac{\max(m_i)}{F^M * K^M} \right] + \sum_{i=1}^{n_P} \left[\frac{\max(m_i)}{F^P * K^P} \right] + \sum_{i=1}^{n_T} \left[\frac{\max(m_i)}{F^T * K^T} \right] + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_{TE}} \left[\frac{\max(m_i)}{F^{TE} * K^{TE}} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

Minimale Anzahl an Schritten für eine gegebene Variantenkombination im gesamten Prozess:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n S^{\min}(n) &= \sum_{i=1}^{n_S} S^{\min}(n_S) + \sum_{i=1}^{n_M} S^{\min}(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\min}(n_P) + \\
 &+ \sum_{i=1}^{n_T} S^{\min}(n_T) + \sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\min}(n_{TE}) = \sum_{i=1}^{n_S} \left\lceil \frac{\min(m_i)}{F^S * K^S} \right\rceil + \\
 &\sum_{i=1}^{n_M} \left\lceil \frac{\min(m_i)}{F^M * K^M} \right\rceil + \sum_{i=1}^{n_P} \left\lceil \frac{\min(m_i)}{F^P * K^P} \right\rceil + \sum_{i=1}^{n_T} \left\lceil \frac{\min(m_i)}{F^T * K^T} \right\rceil + \\
 &+ \sum_{i=1}^{n_{TE}} \left\lceil \frac{\min(m_i)}{F^{TE} * K^{TE}} \right\rceil
 \end{aligned} \tag{20}$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten für eine gegebene Variantenkombination im gesamten Prozess:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n S^{\phi}(n) &= \sum_{i=1}^{n_S} S^{\phi}(n_S) + \sum_{i=1}^{n_M} S^{\phi}(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\phi}(n_P) + \sum_{i=1}^{n_T} S^{\phi}(n_T) + \\
 &+ \sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\phi}(n_{TE}) = \sum_{i=1}^{n_S} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^S * K^S} \right\rceil * a_{ij} + \\
 &+ \sum_{i=1}^{n_M} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^M * K^M} \right\rceil * a_{ij} + \sum_{i=1}^{n_P} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^P * K^P} \right\rceil * a_{ij} + \\
 &+ \sum_{i=1}^{n_T} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^T * K^T} \right\rceil * a_{ij} + \sum_{i=1}^{n_{TE}} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^{TE} * K^{TE}} \right\rceil * a_{ij}
 \end{aligned} \tag{21}$$

Die aufgestellten Formeln geben die Größenordnung der Schritte einzelner Variantenkombinationen für den jeweiligen Fall, maximale, minimale oder mittlere Anzahl an benötigten Produktionsschritten, an. Mittels der berechneten Skalare (reellen Zahlen) kann eine Komplexitätsaussage hinsichtlich der Variantenkombinationen bei definierten Prozessparametern abgegeben werden. Die berechneten Größen lassen einen Rückschluss auf jene „optimale“ Variantenkombination zu, die zu einer potentiellen Reduktion der Abhängigkeiten und der Elemente im System, und damit zu einem komplexitätsärmeren System, führt.

Als Planungsparameter bei der Reihenfolgeplanung kann die durchschnittliche Schrittzahl einzelner Variantenkombinationen bzw. Kenntnisse über die tatsächlich zu erwartenden Schrittzahl eine entscheidende Rolle spielen. Zur Berechnung der exakten Schrittzahl dienen die folgenden Formeln:

$$\sum_{i=1}^n S(n) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{m_i}{F * K} \right] \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S(n) &= \sum_{i=1}^{n_S} S(n_S) + \sum_{i=1}^{n_M} S(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S(n_P) + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_T} S(n_T) + \sum_{i=1}^{n_{TE}} S(n_{TE}) = \end{aligned} \quad (23)$$

Formel 22 gibt die Anzahl der Schritte einer bestimmten Variantenkombination für einen Prozessschritt wieder und Formel 23 ergibt die Summe der Schritte, die eine bestimmte Variantenkombination in der Produktion benötigt.

Entscheidungen im Produktionsprozess werden aber grundsätzlich nicht aufgrund einer einzigen Dimension, in diesem Fall Komplexität, getroffen. Es handelt sich um ein mehrdimensionales Entscheidungsproblem, in dem auch Kosten, Deckungsbeiträge, Liefertermine, Durchlaufzeit etc. eine Rolle spielen. Eine „schrittminimale“ Variantenkombination ist nicht gleich bedeutend mit einer kosten- bzw. ertragsoptimalen Kombination.

Eine hierarchische Zerlegung der Schritte in Teilschritte bewirkt unterschiedliche Komplexitätsgrade, z. B. hinsichtlich des Zeitaufwandes oder der Kostenstruktur. Gewichtungsfaktoren dienen zur Bewertung einzelner Faktoren eines Lösungsansatzes hinsichtlich definierter Größen.⁴⁶¹ Auf diese Weise wird die relevante Bedeutung der einzelnen Schrittmengen wesentlich differenzierter dargestellt⁴⁶² und man bewirkt, dass entscheidende Faktoren größeren Einfluss auf das Ergebnis haben.

Gewichtungsfaktoren für die Schritte im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie können z. B. eine Wertung nach:

- Zeit
- Kosten
- Ressourceneinsatz

vornehmen oder eine Kombination aus mehreren Faktoren sein.

Die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren kann z. B. auf einer subjektiven Einschätzung bzw. Gewichtung aufgrund von Erfahrungswerten einer fachkundigen Person des Unternehmens beruhen (qualitativ), oder mittels quantitativer Berechnung basierend z. B. auf Unter-

⁴⁶¹ Vgl. Schindewolf (2002), S. 102, Lödding (2004), S. 393

⁴⁶² Vgl. Niklas (2002), S. 7f.

nehmensdaten erfolgen. Bei der quantitativen Berechnung können unterschiedliche Variablen (Zeit, Aufwand etc.) verschieden gewichtet werden. In Summe ergibt sich ein gewichteter Mittelwert⁴⁶³ von definierten Kriterien, welcher als Gewichtungsfaktor in der Kalkulation Berücksichtigung finden kann.

Die gewählten Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Prozesse können dann in die Gesamtformel integriert werden, um eine „realitätsgetreuere“ Abbildung der Komplexität einzelner Variantenkombinationen zu erzeugen.

Maximale Anzahl an Schritten für eine gegebene Variantenkombination im gesamten Prozess unter Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren α :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S^{\max}(n)_{GES} &= \sum_{i=1}^{n_S} S^{\max}(n_S) * \alpha_S + \sum_{i=1}^{n_M} S^{\max}(n_M) * \alpha_M + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\max}(n_P) * \alpha_P + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_T} S^{\max}(n_T) * \alpha_T + \sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\max}(n_{TE}) * \alpha_{TE} \end{aligned} \quad (24)$$

Minimale Anzahl an Schritten für eine gegebene Variantenkombination im gesamten Prozess:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S^{\min}(n)_{GES} &= \sum_{i=1}^{n_S} S^{\min}(n_S) * \alpha_S + \sum_{i=1}^{n_M} S^{\min}(n_M) * \alpha_M + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\min}(n_P) * \alpha_P + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_T} S^{\min}(n_T) * \alpha_T + \sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\min}(n_{TE}) * \alpha_{TE} \end{aligned} \quad (25)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten für eine gegebene Variantenkombination im gesamten Prozess:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S^{\phi}(n)_{GES} &= \sum_{i=1}^{n_S} S^{\phi}(n_S) * \alpha_S + \sum_{i=1}^{n_M} S^{\phi}(n_M) * \alpha_M + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\phi}(n_P) * \alpha_P + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_T} S^{\phi}(n_T) * \alpha_T + \sum_{i=1}^{n_{TE}} S^{\phi}(n_{TE}) * \alpha_{TE} \end{aligned} \quad (26)$$

Alle Faktoren, die in diesem Entscheidungsproblem im Produktionsprozess mitspielen (Liefertreue, Aufwand, Kosten, Zeit etc.), in einem Gewichtungsfaktor zu berücksichtigen ist schwierig. Die Berechnung eines allgemein gültigen Gewichtungsfaktors, der alle wichtigen Einflüsse auf die Planung entsprechend einkalkuliert, wird aufgrund sich laufend verändernder Gesichtspunkte, Schwerpunkte etc. nicht möglich sein. Größen wie Zeit oder Kosten

⁴⁶³ Vgl. Sauerbier (2003), S. 22

könnten z. B. als Gewichtungsfaktor herangezogen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Berechnung können danach kritisch, unter Einbeziehung anderer notwendiger Kriterien, wie z. B. der Liefertreue, begutachtet werden. Eine Nutzwertanalyse, welche mehrere Planungsparameter der einzelnen Variantenkombinationen berücksichtigt, u. a. die entwickelte Komplexitätsgröße, den gewünschten Servicegrad, verschiedene Kostenparameter etc., kann eine genauere Beurteilung für die „unternehmensoptimale“ Produktionsreihenfolge bringen.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Modifikation von Rechengrößen nahe liegender Fachgebiete, in dem Fall der Informatik, Lösungsansätze für Problemstellungen in der Logistik wie die besprochene „komplexitätsminimale“ Variantenkombination bieten kann. Für Probleme im Materialflusssystem der Stahl- und Feuerfestindustrie sind oft viele Einflussgrößen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.2, 3.3 und 3.4). Daher muss im Anschluss an jede Bewertung eine kritische Betrachtung der Ergebnisse unter Miteinbeziehung spezifischer Ziele des jeweiligen Materialflusssystems durchgeführt werden, um die optimale Variantenreihenfolge für das jeweilige Unternehmen zu definieren.

5.3 Beurteilung der Komplexität von Variantenkombinationen anhand eines konkreten Beispiels

Nun wird anhand eines konkreten Prozessablaufes für geformte, gebrannte Produkte die minimale, mittlere und maximale Schrittzahl für bestimmte Variantenkombinationen ermittelt. Aufgrund besserer Zugänglichkeit zu Daten und Informationen wurde die Produktion von geformten, gebrannten Steinen herangezogen. Der Prozess im betrachteten Werk weicht daher vom dargestellten und diskutierten Produktionsablauf in Abbildung 34 im vorigen Abschnitt ab (siehe Abbildung 37).

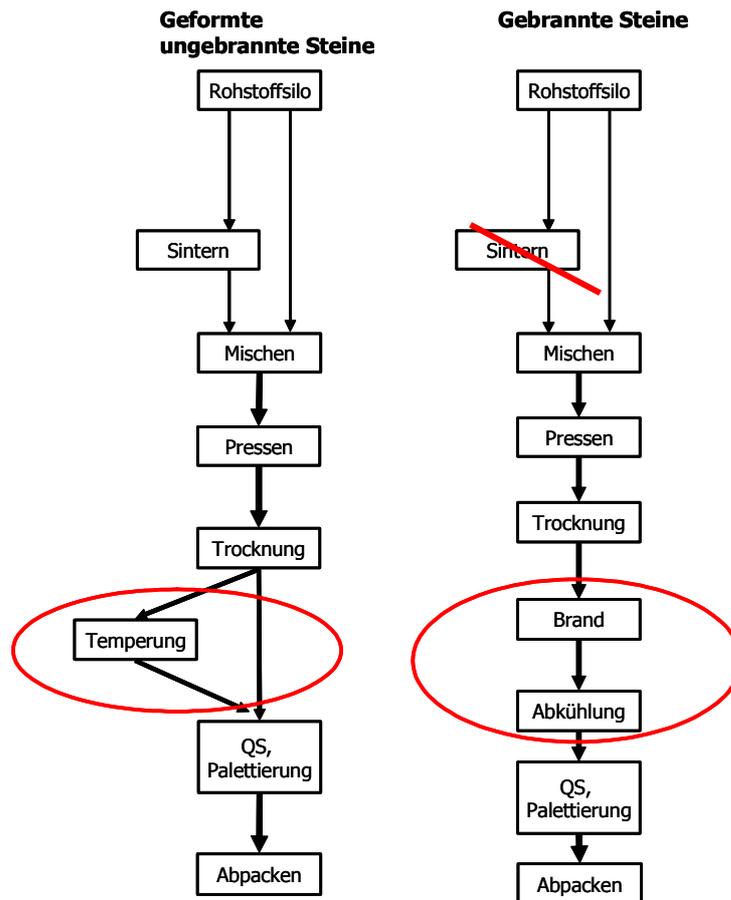


Abbildung 37: Unterschiede geformte, ungebrannte Produktlinie zu gebrannten Produkten (Eigendarstellung in Anlehnung an BMLFUW⁴⁶⁴)

Im konkreten Fall werden die Rohstoffe schon gesintert zugekauft, sodass der Prozessschritt „Sintern“ im betrachteten Werk nicht stattfindet. Im untersuchten Prozessablauf gibt es somit fünf wesentliche Prozessschritte auf die sich die Komplexitätsuntersuchung bezieht: Das Mischen, das Pressen, das Trocknen, der Brand und der Abkühlprozess. Im Unterschied zum Prozess bei geformten, ungebrannten Steinen werden anstelle des Temperns die Produkte bei definierten Temperaturen gebrannt und danach abgekühlt. Der Abkühlprozess unterliegt keinen bestimmten Restriktionen.

Folgende Daten bzw. Informationen wurden im Rahmen von Interviews erhoben:

- Der Prozessablauf
- Die Anzahl an Varianten
- Anzahl an Aggregaten pro Prozessschritt
- Fassungsvermögen bzw. Durchsatz pro definierter Zeiteinheit der Aggregate
- Maximalmenge der Varianten
- Mindestmenge der Varianten

⁴⁶⁴ Vgl. BMLFUW (2003), S. 25ff.

- Anzahl an Aufträgen für Menge j und Variante i
- Mengen j der Varianten i
- Benennung der Varianten, die gemeinsam gebrannt werden können

Folgende Änderungen bzw. neue Prozesse gibt es zum bisher behandelten Verlauf:

Produktionsschritt: Trocknungsprozess (T)

Da der Trocknungsprozess im betrachteten Werk nicht in einem Trocknungsofen vorgenommen wird, sondern in einem temperierten Raum, kann das Fassungsvermögen mit unendlich angenommen werden.⁴⁶⁵ Da auch alle Varianten im selben Raum getrocknet werden können (daher ist $n_T=1$), ergibt sich eine Größenordnung der Schritte von 1, sowohl im „worst case“, „average case“ als auch im „best case“. M steht in den folgenden Formeln für eine sehr große reelle Zahl, die in jedem Fall größer ist als die Summe der Maximalmengen der untersuchten Variantenkombination.

Maximale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_T} S^{\max}(n_T) = \sum_{i=1}^{n_T} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{M} \right\rceil = 1 \quad (27)$$

Minimale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_T} S^{\max}(n_T) = \sum_{i=1}^{n_T} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{M} \right\rceil = 1 \quad (28)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_T} S^{\phi}(n_T) &= \sum_{i=1}^{n_T} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{M} \right\rceil * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_T} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{M} \right\rceil * a_{ij} = 1 \end{aligned} \quad (29)$$

⁴⁶⁵ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

Diese Größenordnung gilt auch für den Abkühlungsprozess, da für diesen ebenfalls keine limitierenden Ressourcen vorhanden sind⁴⁶⁶, und auch keine Trennung nach Varianten durchgeführt wird ($n_A=1$).

Produktionsschritt: Abkühlprozess (A)

Maximale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_A} S^{\max}(n_A) = \sum_{i=1}^{n_A} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{M} \right\rceil = 1 \quad (30)$$

Minimale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_A} S^{\max}(n_A) = \sum_{i=1}^{n_A} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{M} \right\rceil = 1 \quad (31)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_A} S^{\phi}(n_A) &= \sum_{i=1}^{n_A} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{M} \right\rceil * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_A} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{M} \right\rceil * a_{ij} = 1 \end{aligned} \quad (32)$$

Produktionsschritt: Brand (B)

Maximale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_B} S^{\max}(n_B) = \sum_{i=1}^{n_B} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{F^B * K^B} \right\rceil \quad (33)$$

⁴⁶⁶ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

Minimale Anzahl an Schritten:

$$\sum_{i=1}^{n_B} S^{\min}(n_B) = \sum_{i=1}^{n_B} \left\lceil \frac{\max(m_i)}{F^B * K^B} \right\rceil \quad (34)$$

Durchschnittliche Anzahl an Schritten:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_B} S^{\phi}(n_B) &= \sum_{i=1}^{n_B} \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^B * K^B} \right\rceil * a_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_B} \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left\lceil \frac{m_{ij}}{F^B * K^B} \right\rceil * a_{ij} \end{aligned} \quad (35)$$

Die Bewertungsformeln für die anderen Prozesse können aus Abschnitt 5.2 übernommen werden.

Grundsätzlich gibt es in diesem konkreten Szenario neun unterschiedliche gebrannte Steinvarianten. Da es nur selten Abweichungen bei den Formaten (Form der gebrannten Steine) gibt, werden diese nicht berücksichtigt.⁴⁶⁷

Die Rohstoffe der Produkte sind bereits gesintert. Das Mischen und das Pressen erfolgt variantenrein.⁴⁶⁸

In der Stahl- und Feuerfestindustrie ist ein Ziel, wie bereits in Abschnitt 3.2 besprochen, Rüstfamilien zu bilden, um die Rüsttätigkeiten zu minimieren und die Auslastung zu maximieren. Diese Rüstfamilien fließen auch in die Komplexitätsbewertung mit ein.

Für das gegebene Szenario können die Varianten 1, 2, 3, 5 und 6 gemeinsam gebrannt werden, die Varianten 7 und 8 weisen ebenfalls eine gleiche Brenntemperatur auf. Die Varianten 4 und 9 müssen separat gebrannt werden.⁴⁶⁹ Zwei oder mehrere Varianten einer Rüstfamilie werden nicht als unterschiedliche Varianten berücksichtigt, sondern als eine Variante im Prozessschritt behandelt.

⁴⁶⁷ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

⁴⁶⁸ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

⁴⁶⁹ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

Abbildung 38 gibt eine Übersicht über die Anzahl und das Fassungsvermögen der Aggregate der einzelnen Produktionsprozesse wieder. Alle Varianten können auf den beiden unterschiedlichen Pressen verarbeitet werden.

Aggregat	Fassungsvermögen	Anzahl
Mischer	1800kg	4
Presse Typ 1	17kg	2
Presse Typ 2	28,5kg	2
Trocknungsraum	M	1
Tunnelofen	8,5t pro Wagen (82 Wägen) = 697t	1
Abkühlungsraum	M	1

Abbildung 38: Übersicht über das Fassungsvermögen/die Anzahl an Aggregaten und die benötigte Zeit⁴⁷⁰

Aus Aufzeichnungen der Fertigungsaufträge und Befragungen lassen sich Maximal- und Mindestmengen ermitteln. Abbildung 39 gibt eine Übersicht über die Maximal- und Mindestmengen der neun Varianten, die im betrachteten Unternehmen erzeugt werden. Die untere Grenze beträgt bis auf Ausnahmefällen (Variante 9) meistens 25 Tonnen.

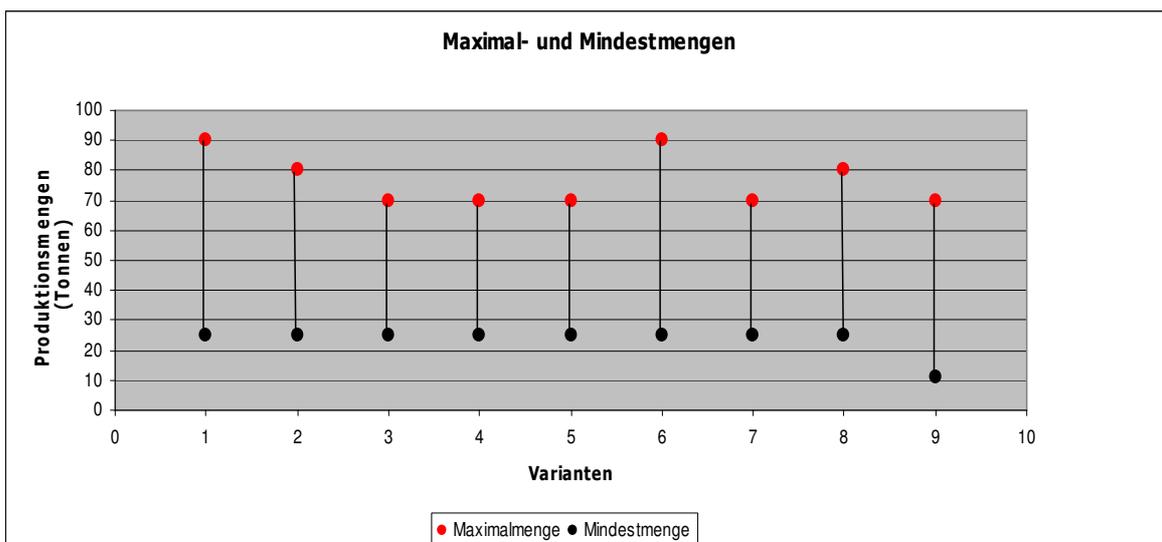


Abbildung 39: Übersicht über die Schwankungsbreite der Produktionsmengen der Varianten⁴⁷¹

⁴⁷⁰ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

⁴⁷¹ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

Da im konkreten Fall das Unternehmen keine Übersicht über die einzelnen Fertigungsaufträge für die Varianten liefern konnte, kann nicht mit der Formel 3 gerechnet werden, da sowohl die Anzahl der Aufträge für Menge j und Variante i (a_{ij}) als auch die einzelnen Mengen j der Fertigungsaufträge nicht bekannt sind. Das Unternehmen konnte nur die durchschnittlichen Mengen der Fertigungsaufträge für die einzelnen Varianten aus der unternehmenseigenen Datenbank generieren. D. h. aus den zur Verfügung gestellten Daten ist es nur möglich die Produktionsschritte der durchschnittlichen Mengen für die Variantenkombinationen zu berechnen, jedoch nicht die durchschnittliche Anzahl an Produktionsschritten. Zur Veranschaulichung wird daher im weiteren Verlauf die durchschnittliche Schrittzahl durch die Produktionsschritte für die durchschnittlichen Mengen der Varianten angenähert. Formel 3 muss modifiziert werden. W_i stellt die Gesamtmenge der Variante i dar:

$$\sum_{i=1}^n S^*(n) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\frac{1}{a_i} * W_i}{F * K} \right] \quad (36)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^k m_{ij} * a_{ij}$$

Beim Vergleich der beiden Formeln (Formel 3 und Formel 36) anhand typischer Daten aus der Feuerfestindustrie wurde festgestellt, dass die Unterschiede bei den Schrittzahlen minimal sind. Es haben sich Abweichungen im geringen Prozentbereich ergeben.⁴⁷² Eine allgemein gültige Aussage über die Größe der Abweichungen in den Schrittzahlen beider Berechnungsarten kann aber nicht aufgrund der Untersuchungen mit generierten Daten gemacht werden. Es wird sicher auch Fälle geben, in denen eine größere Abweichung feststellbar ist. Die Bewertung der Produktionsschritte der durchschnittlichen Produktionsmengen kann aber grundsätzlich als Annäherung an die Größe der durchschnittlichen Produktionsschritte gesehen werden.

In Abbildung 40 ist eine Übersicht der durchschnittlichen Produktionsmengen der einzelnen Varianten über den Zeitraum 2007 gegeben.

⁴⁷² Beispiele siehe Anhang

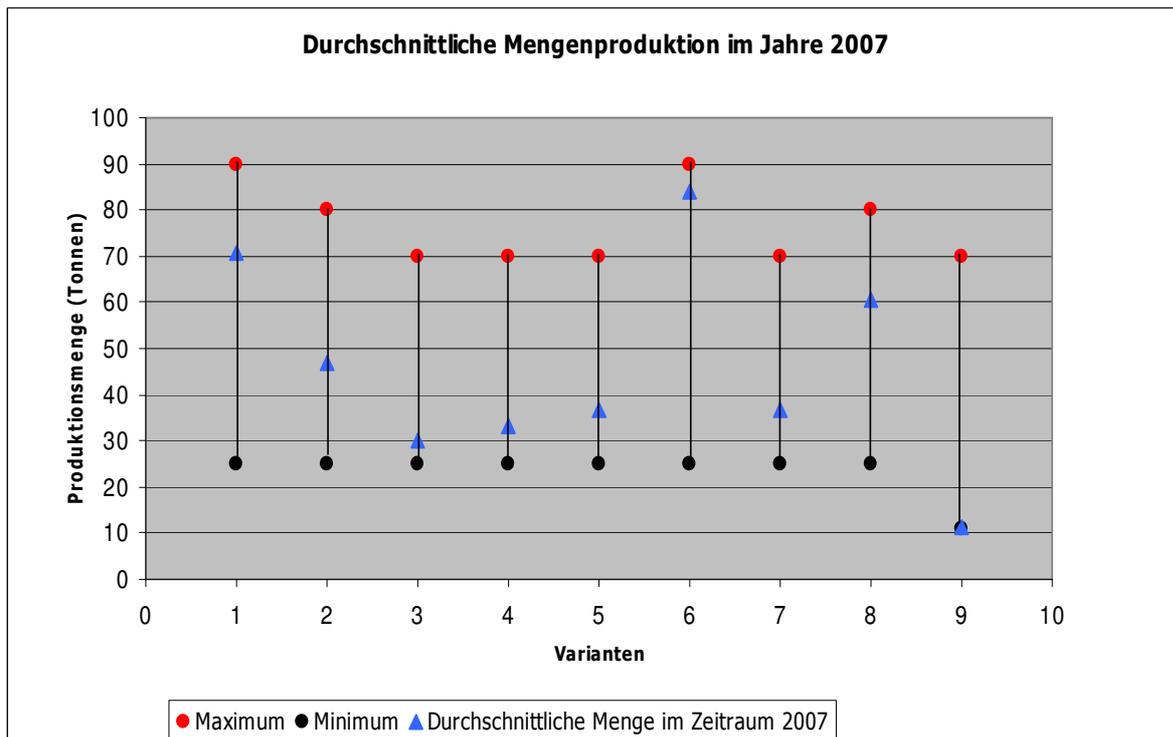


Abbildung 40: Durchschnittliche Produktionsmenge der Varianten im Zeitraum 2007⁴⁷³

In der Annahme, dass immer zwei bis drei Varianten als Fertigungsauftrag in die Produktion kommen, ergeben sich die folgende Anzahl an Variantenkombinationsmöglichkeiten:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (37)$$

Es resultieren 84 verschiedene Variantenkombinationen aus der Überlegung, dass drei Varianten produziert werden und 36 Kombinationsmöglichkeiten wenn zwei Varianten in die Produktion eingelastet werden (vgl. Tabelle 23 im Anhang).

Folgende Formeln werden für die Berechnung der maximalen und minimalen Produktionsschritte des gesamten betrachteten Prozesses von Variantenkombinationen verwendet:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S^{\max}(n)_{GES} &= \sum_{i=1}^{n_M} S^{\max}(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\max}(n_P) + \sum_{i=1}^{n_T} S^{\max}(n_T) + \sum_{i=1}^{n_B} S^{\max}(n_B) + \\ &+ \sum_{i=1}^{n_A} S^{\max}(n_A) = \sum_{i=1}^{n_M} S^{\max}(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\max}(n_P) + 1 + \sum_{i=1}^{n_B} S^{\max}(n_B) + 1 \end{aligned} \quad (38)$$

⁴⁷³ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

$$\sum_{i=1}^n S^{\min}(n) = \sum_{i=1}^{n_M} S^{\min}(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\min}(n_P) + \sum_{i=1}^{n_T} S^{\min}(n_T) + \sum_{i=1}^{n_B} S^{\min}(n_B) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{n_A} S^{\min}(n_A) = \sum_{i=1}^{n_M} S^{\min}(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^{\min}(n_P) + 1 + \sum_{i=1}^{n_B} S^{\min}(n_B) + 1$$
(39)

Zur Berechnung der Produktionsschritte für die durchschnittlichen Mengen einzelner Variantenkombination ergibt sich folgende Gesamtformel:

$$\sum_{i=1}^n S^*(n) = \sum_{i=1}^{n_M} S^*(n_M) + \sum_{i=1}^{n_P} S^*(n_P) + \sum_{i=1}^{n_T} S^*(n_T) + \sum_{i=1}^{n_B} S^*(n_B) + \sum_{i=1}^{n_A} S^*(n_A) =$$

$$\sum_{i=1}^{n_M} \left[\frac{1}{F^M * K^M} * \frac{a_i * W_i}{a_i} \right] + \sum_{i=1}^{n_P} \left[\frac{1}{F^P * K^P} * \frac{a_i * W_i}{a_i} \right] + 1 + \sum_{i=1}^{n_B} \left[\frac{1}{F^B * K^B} * \frac{a_i * W_i}{a_i} \right] + 1$$
(40)

Nun werden für die einzelnen Variantenkombinationen mittels der definierten Formeln die maximale und minimale Schrittzahl, sowie die Schrittzahl bei durchschnittlicher Produktionsmenge berechnet. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse für die Kombinationsmöglichkeiten von drei Varianten abgebildet (Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43).

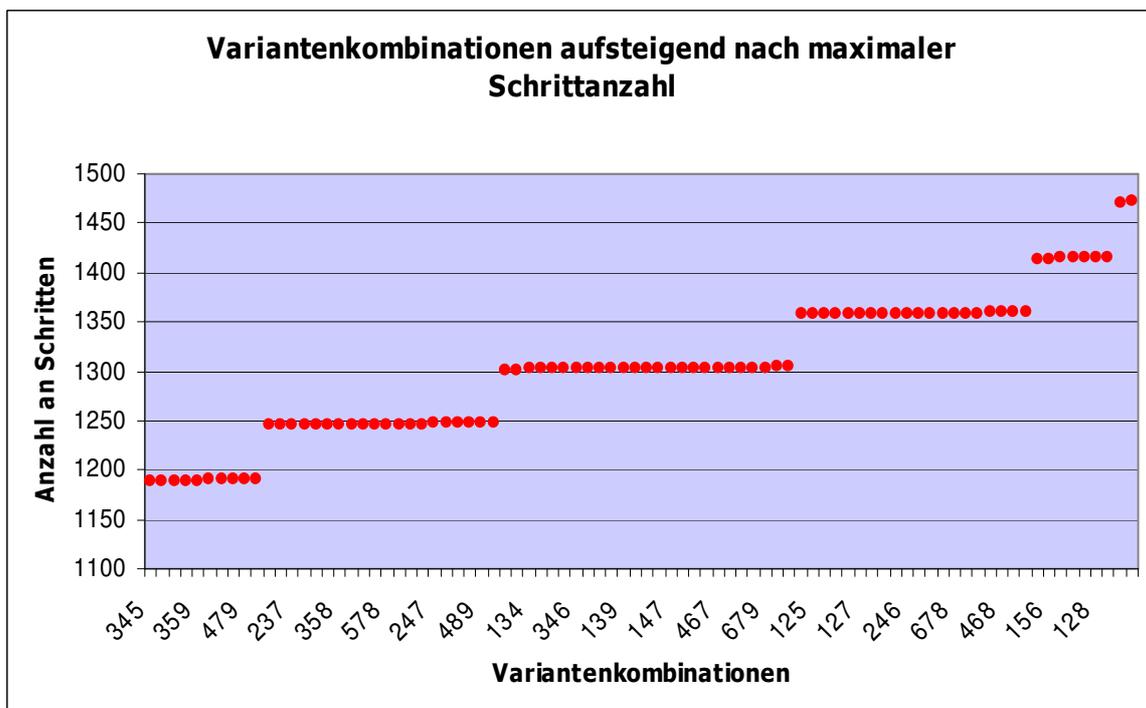


Abbildung 41: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl

Variatenkombination	Maximale Schrittzahl
345	1189
347	1189
357	1189
457	1189
359	1189
349	1190
379	1190
459	1190
479	1190
579	1190

Tabelle 12: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variatenkombinationen im „worst case“⁴⁷⁴

In Tabelle 12 sind die ersten 10 Varianten kombinationen angeführt, die bei der Produktion ausgehend von den Maximalmengen, die wenigsten Schritte benötigen.

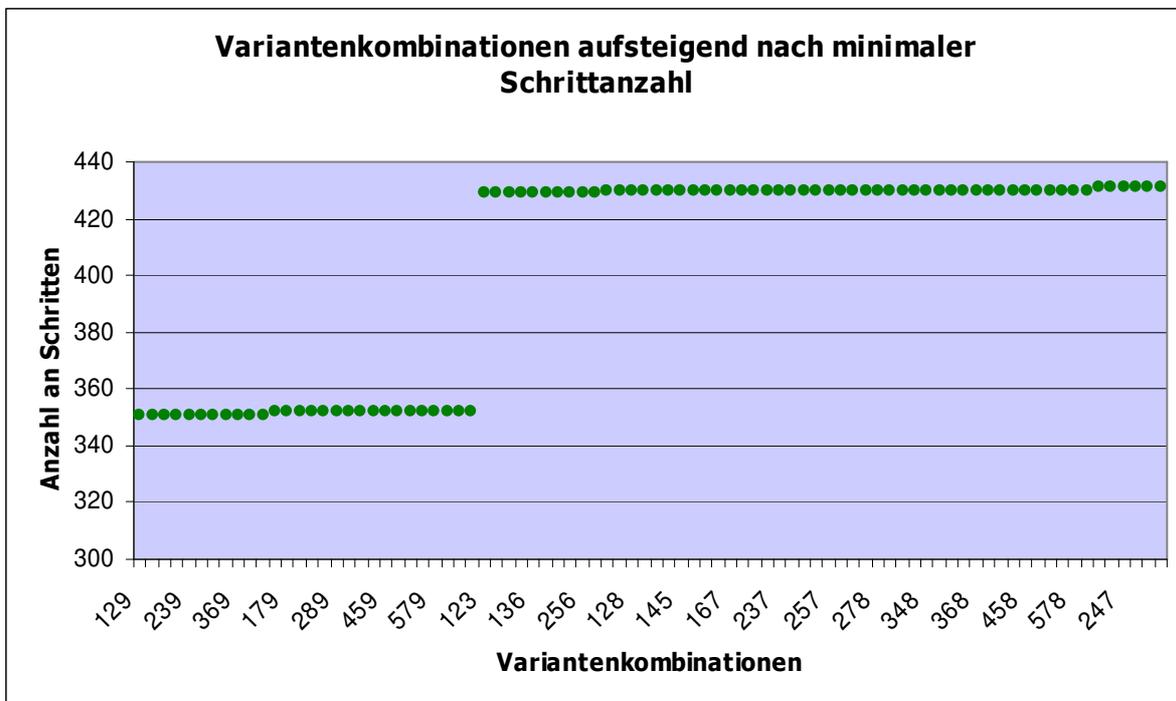


Abbildung 42: Varianten kombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl

⁴⁷⁴ Die vollständige Reihung der Varianten kombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 24)

Variantenkombination	Minimale Anzahl an Schritten
129	351
139	351
159	351
169	351
239	351
259	351
269	351
359	351
369	351
569	351

Tabelle 13: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „best case“⁴⁷⁵

In Tabelle 13 sind die ersten 10 Variantenkombinationen angeführt, die bei der Produktion ausgehend von den Mindestmengen, die wenigsten Schritte benötigen.

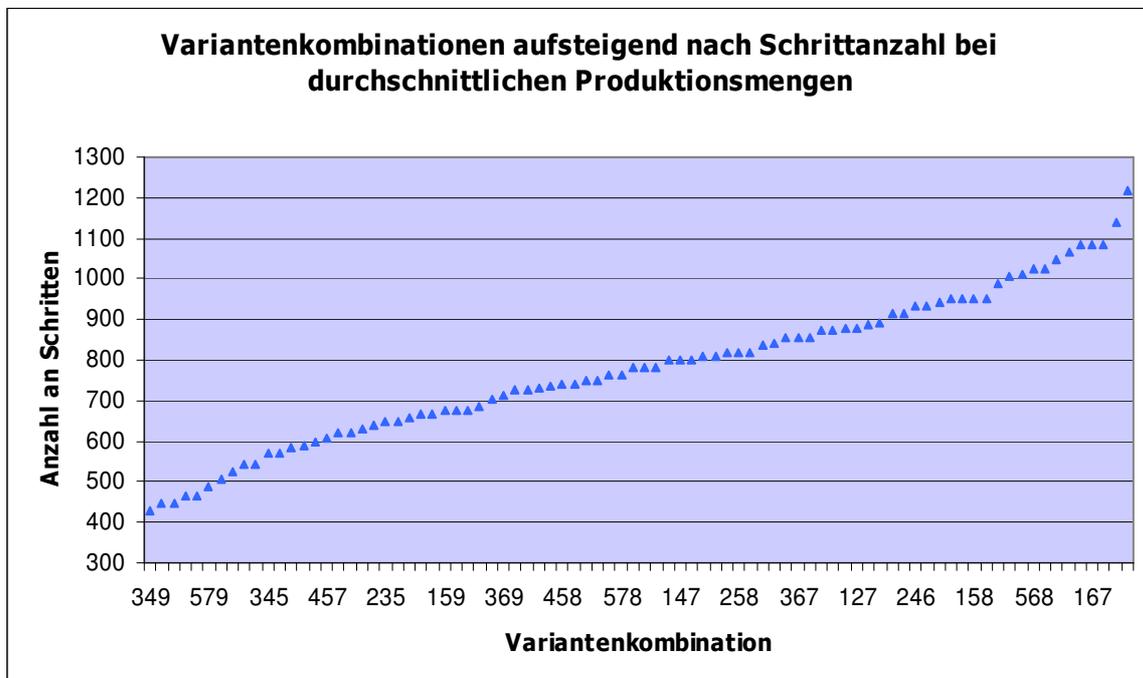


Abbildung 43: Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen

⁴⁷⁵ Die vollständige Reihung der Variantenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 25)

Variatenkombination	Anzahl an Schritten
349	429
359	448
379	449
459	466
479	466
579	486
239	506
249	524
259	543
279	544

Tabelle 14: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variatenkombinationen nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen⁴⁷⁶

In Tabelle 14 sind die ersten 10 Variatenkombinationen angeführt, die bei der Produktion ausgehend von den Durchschnittsmengen, die wenigsten Schritte benötigen.

Da die Variante 9 nur sehr selten produziert wird, soll der Fall noch untersucht werden, wie sich die Reihung der Variatenkombinationen entwickelt, wenn die Variante 9 nicht produziert wird. Es ergeben sich 56 mögliche Variatenkombinationen.

$$\binom{8}{3} = \frac{8!}{3!(8-3)!} = 56 \quad (41)$$

Für diese Möglichkeiten wird die Schrittzahl der durchschnittlichen Produktionsmengen berechnet und es ergibt sich das folgenden Bild (siehe Abbildung 44 und Tabelle 15):

⁴⁷⁶ Die vollständige Reihung der Variatenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 26)

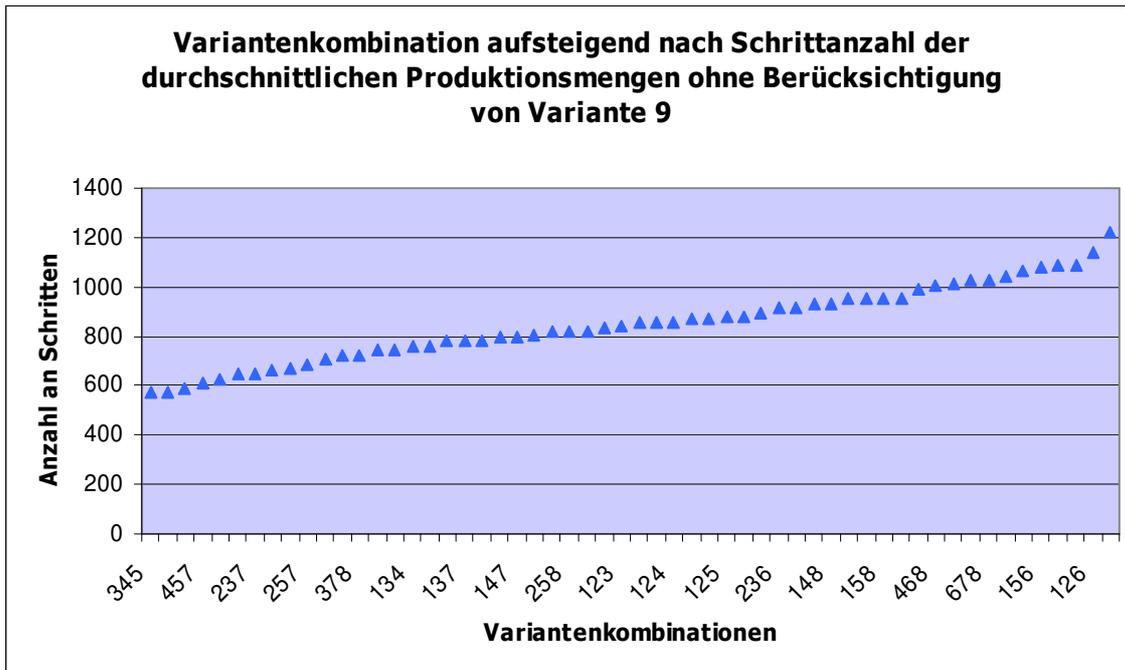


Abbildung 44: Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen ohne Berücksichtigung der Variante 9

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
345	571
347	571
357	591
457	608
234	629
235	648
237	649
245	666
247	667
257	686

Tabelle 15: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen ohne Variante 9⁴⁷⁷

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 45 und Abbildung 46) geben die „worst case“ Reihung bzw. die „best case“ Reihung unter Vernachlässigung von Variante 9 wieder.

⁴⁷⁷ Die vollständige Reihung der Variantenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 27)

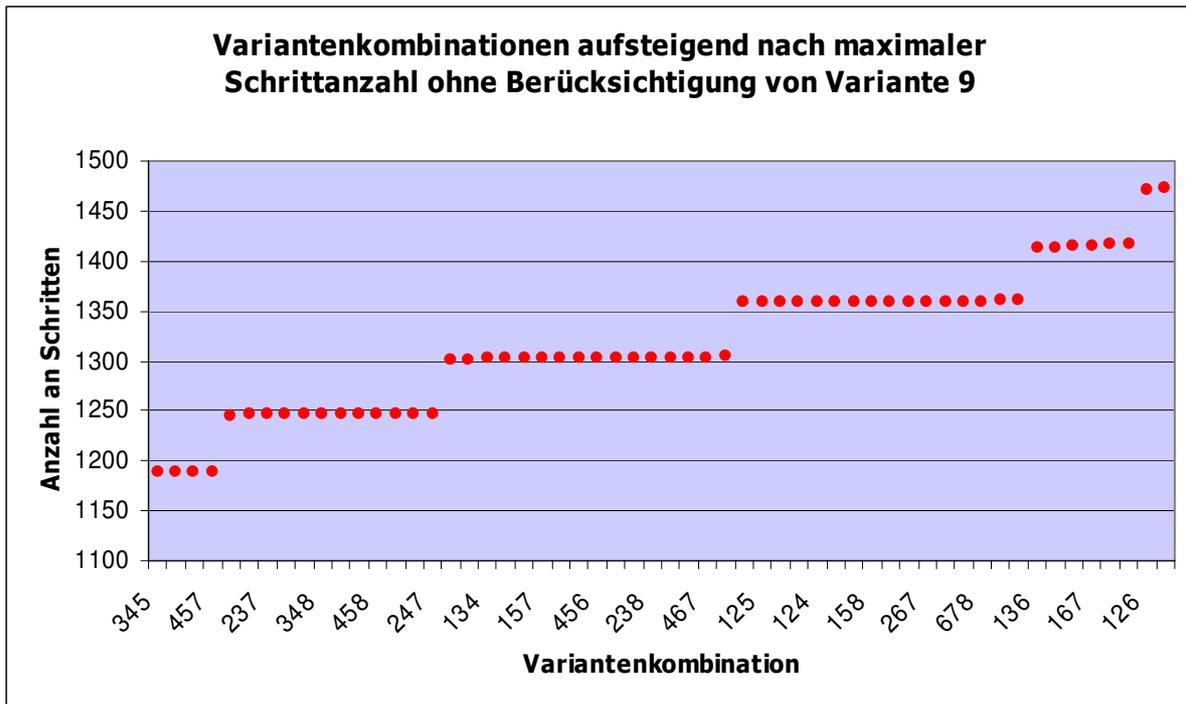


Abbildung 45: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl ohne Berücksichtigung der Variante 9

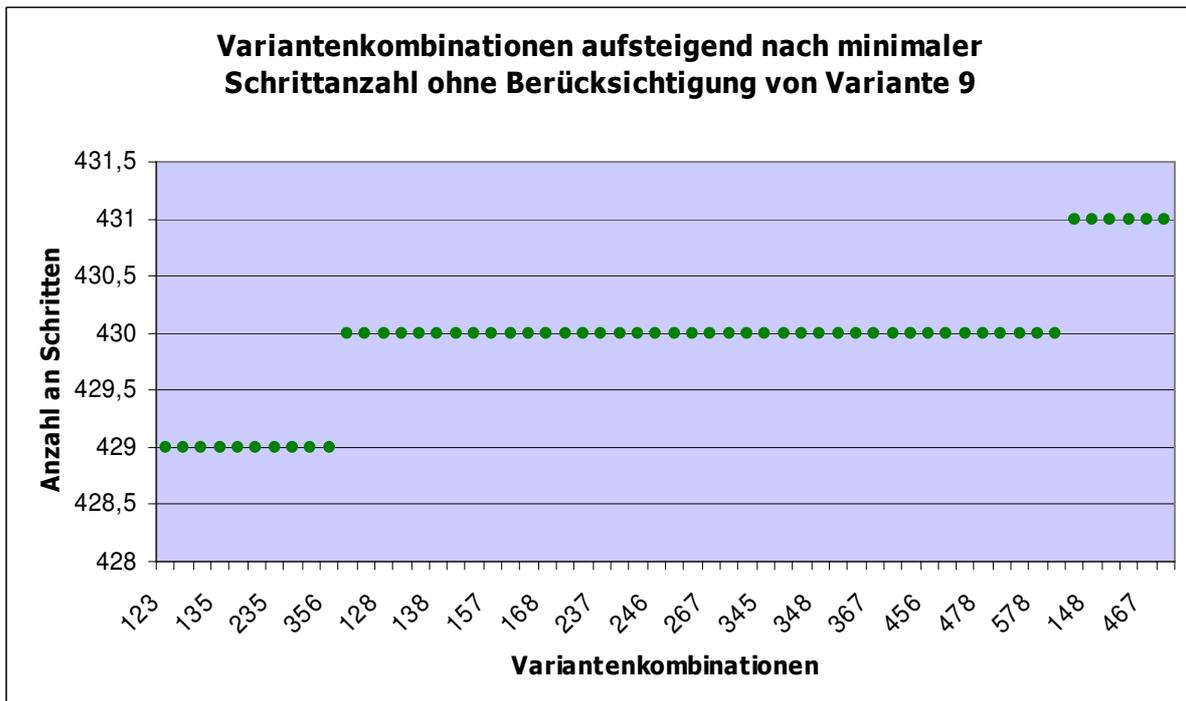


Abbildung 46: Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl ohne Berücksichtigung der Variante 9

Bei der Einlastung von nur zwei Varianten gibt es weniger zu betrachtende Kombinationsmöglichkeiten. Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49, Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 dargestellt.

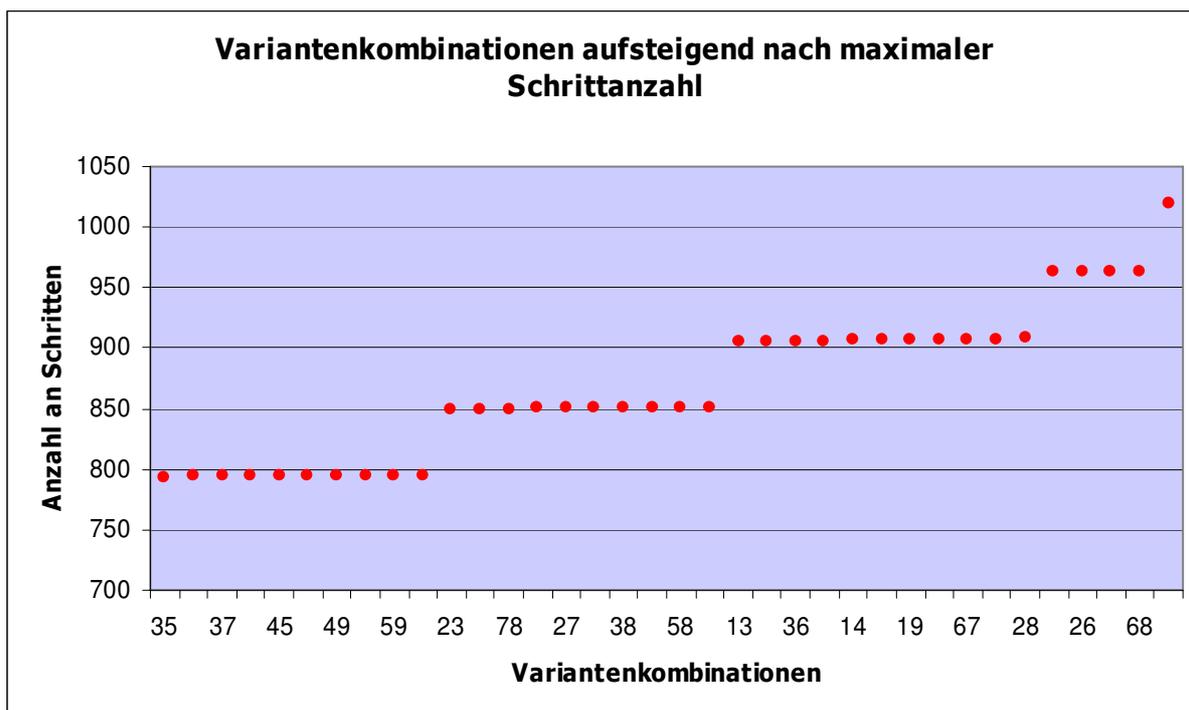


Abbildung 47: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl

Variantenkombination	Maximale Anzahl an Schritten
35	793
34	794
37	794
39	794
45	794
47	794
49	794
57	794
59	794
79	794

Tabelle 16: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „worst case“⁴⁷⁸

⁴⁷⁸ Die vollständige Reihung der Variantenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 28)

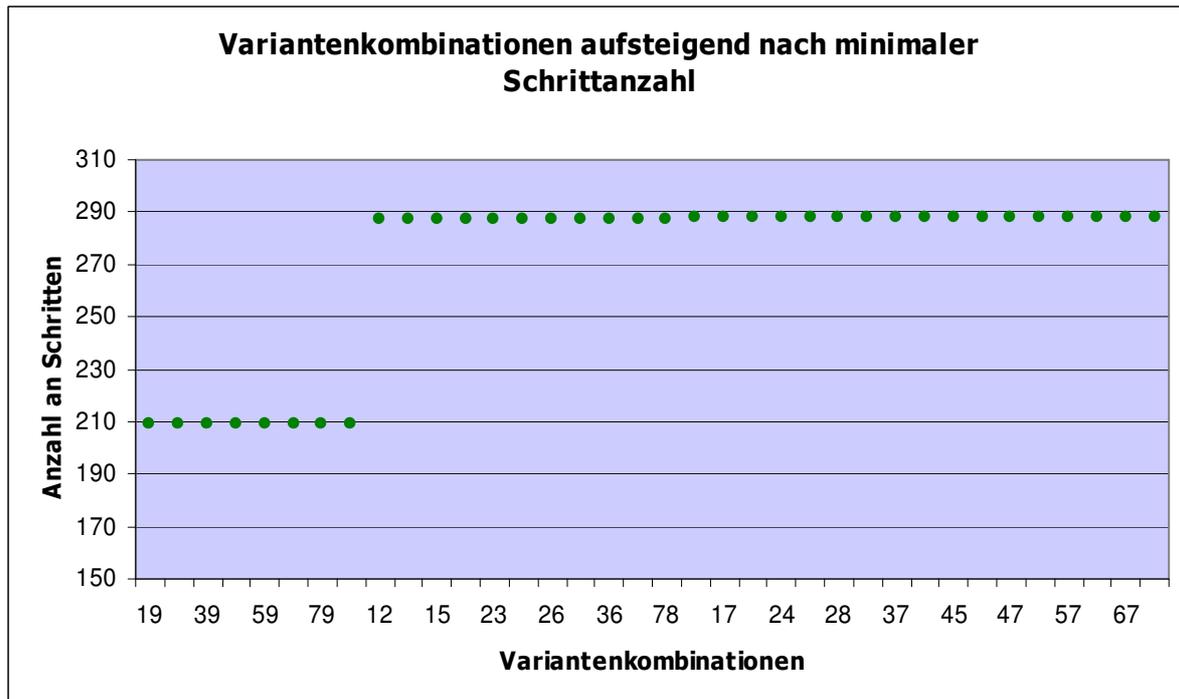


Abbildung 48: Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittanzahl

Variantenkombination	Minimale Anzahl an Schritten
19	209
29	209
39	209
49	209
59	209
69	209
79	209
89	209
12	287
13	287

Tabelle 17: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „best case“⁴⁷⁹

⁴⁷⁹ Die vollständige Reihung der Variantenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 29)

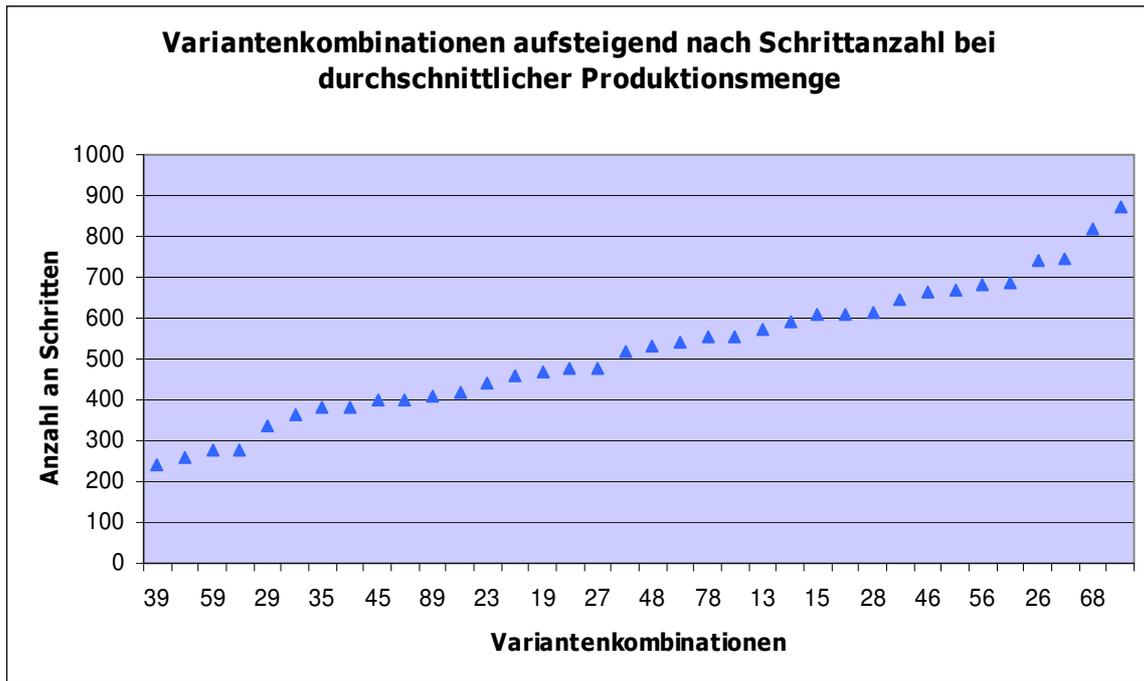


Abbildung 49: Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
39	240
49	257
59	277
79	277
29	335
34	363
35	382
37	383
45	400
47	400

Tabelle 18: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen⁴⁸⁰

Da Variante 9 eine sehr geringe Mindestmenge in der Produktion als Vorgabe hat und im Jahr 2007 auch eine davon kaum abweichende durchschnittliche Produktionsmenge, sind Kombinationen mit dieser Variante v. a. bei den „schritt optimalen“ Variantenkombinationen zu finden.

Die berechneten Größenordnungen der Schritte für die einzelnen Variantenkombinationen können nun bei der Planung der „optimalen“ Produktionsreihenfolge miteinbezogen werden. Durch Variation der Anzahl an Aggregaten bzw. des Fassungsvermögens einzelner Anlagen können Auswirkungen auf die Schrittzahl und damit auf die Komplexität untersucht werden.

⁴⁸⁰ Die vollständige Reihung der Variantenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 30)

Die folgende Abbildung gibt die Auswirkungen auf die Schrittzahl bei durchschnittlichen Mengen im Gesamtprozess wieder, wenn die beiden Pressen vom Typus 1 durch Pressen vom Typus 2 ersetzt würden, d. h. dass in diesem Fall dann vier Pressen von Typus 2 im Produktionsschritt „Pressen“ zur Verfügung stehen und sich das Fassungsvermögen erhöhen würde.

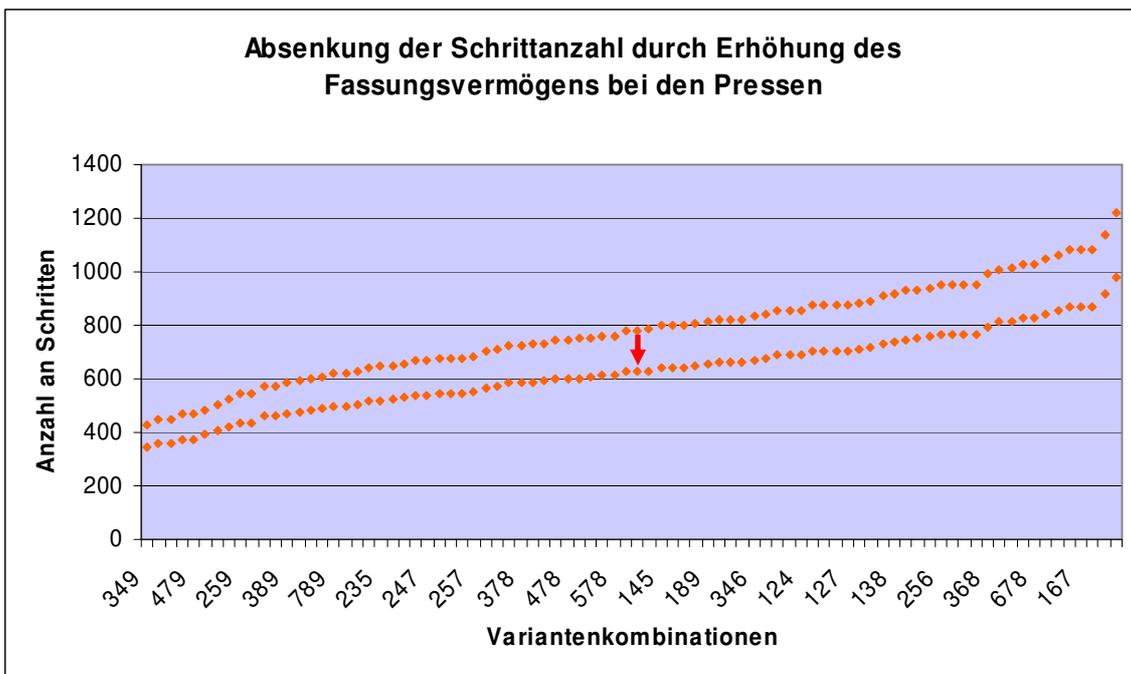


Abbildung 50: Reduktion der Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen durch Erhöhung des Fassungsvermögens der Pressen

Weitere im jeweiligen Unternehmen definierte logistische Zielgrößen wie z. B. hohe Liefertreue oder geringe Produktionskosten müssen in diese Gegenüberstellung einzelner Variantenkombinationen mit einfließen, um die „optimale“ Variantenreihenfolge für die Produktion zu finden, wie z. B. die Kosten:

Die Kosten für die einzelnen Aggregate im konkreten Fall ergeben, dass der Brennofen die mit Abstand kostenintensivste Maschinerie im Werk ist und daher für die Reihenfolgeplanung entscheidende Bedeutung hat. Danach folgen die Mischer und Pressen. Da weder der Trocknungsprozess noch der Abkühlprozess bestimmte Ressourcen benötigen, fallen diese beiden Prozessschritte kostenmäßig nicht ins Gewicht.

Bei der Berechnung der durchschnittlichen, maximalen, minimalen Schrittzahl einzelner Variantenkombinationen im Gesamtprozess ist v. a. die Schrittzahl bei den Pressen für die „komplexitätsminimale“ Variantenkombination ausschlaggebend (Tabelle 19). Mittels Gewich-

tung können die Kostenfaktoren in die Schrittzahl der einzelnen Prozesse miteinbezogen werden.

	Mischen	Pressen	Brand	Trocknen	Abkühlen
3er Variantenkombination	10-38	337-1430	1-3	-	-
2er Variantenkombination	6-26	199-990	1-2	-	-

Tabelle 19: Schwankungsbreite der Schrittzahl für die Variantenkombinationen

Der Brennprozess macht ca. 75% der Gesamtkosten aus, der Pressprozess 7,5% und der Mischprozess 3%.⁴⁸¹ Bildet man die Verhältnisse der Kosten für einen Schritt bei den einzelnen Aggregaten ergibt sich folgendes Bild: Kostenverhältnis Produktionsschritt Pressen:Produktionsschritt Brennen $\approx 1:2000$, Kostenverhältnis Produktionsschritt Pressen:Produktionsschritt Mischen $\approx 1:8$. Die Berücksichtigung dieser Kostenfaktoren ergibt folgende Berechnungen:

$$\sum_{i=1}^n S_{GES}^{\max}(n) = 8 * \sum_{i=1}^{n_M} S^{\max}(n_M) + 1 * \sum_{i=1}^{n_P} S^{\max}(n_P) + 1 + 2000 * \sum_{i=1}^{n_B} S^{\max}(n_B) + 1 \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^n S_{GES}^{\min}(n) = 8 * \sum_{i=1}^{n_M} S^{\min}(n_M) + 1 * \sum_{i=1}^{n_P} S^{\min}(n_P) + 1 + 2000 * \sum_{i=1}^{n_B} S^{\min}(n_B) + 1 \quad (43)$$

$$\sum_{i=1}^n S_{GES}^*(n) = 8 * \sum_{i=1}^{n_M} S^*(n_M) + 1 * \sum_{i=1}^{n_P} S^*(n_P) + 1 + 2000 * \sum_{i=1}^{n_B} S^*(n_B) + 1 \quad (44)$$

Dabei resultieren die nachfolgend abgebildeten Reihungen der einzelnen Variantenkombinationen im Gesamtprozess (siehe Abbildung 51, Abbildung 52, Abbildung 53, Tabelle 20, Tabelle 21 und Tabelle 22).

⁴⁸¹ Vgl. Gesprächsprotokoll 2 im Anhang

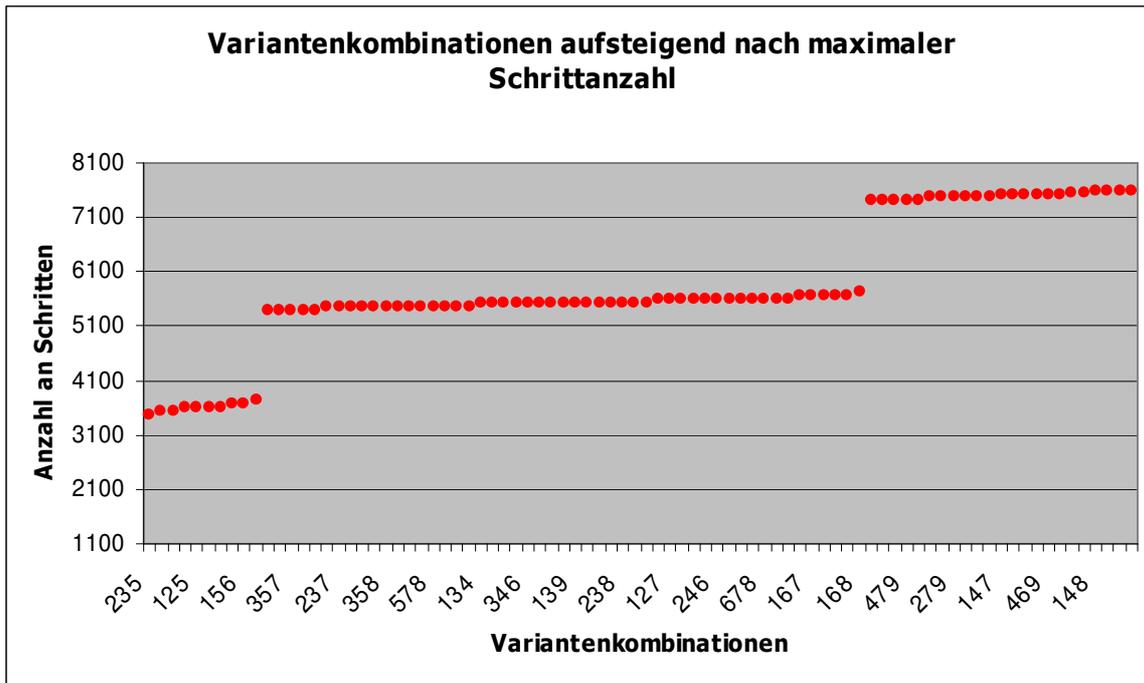


Abbildung 51: Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
235	3468
135	3531
356	3531
123	3602
125	3602
236	3602
256	3602
136	3665
156	3665
126	3736

Tabelle 20: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „worst case“ mit Berücksichtigung von Kosten⁴⁸²

⁴⁸² Die vollständige Reihung der Variantenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 31)

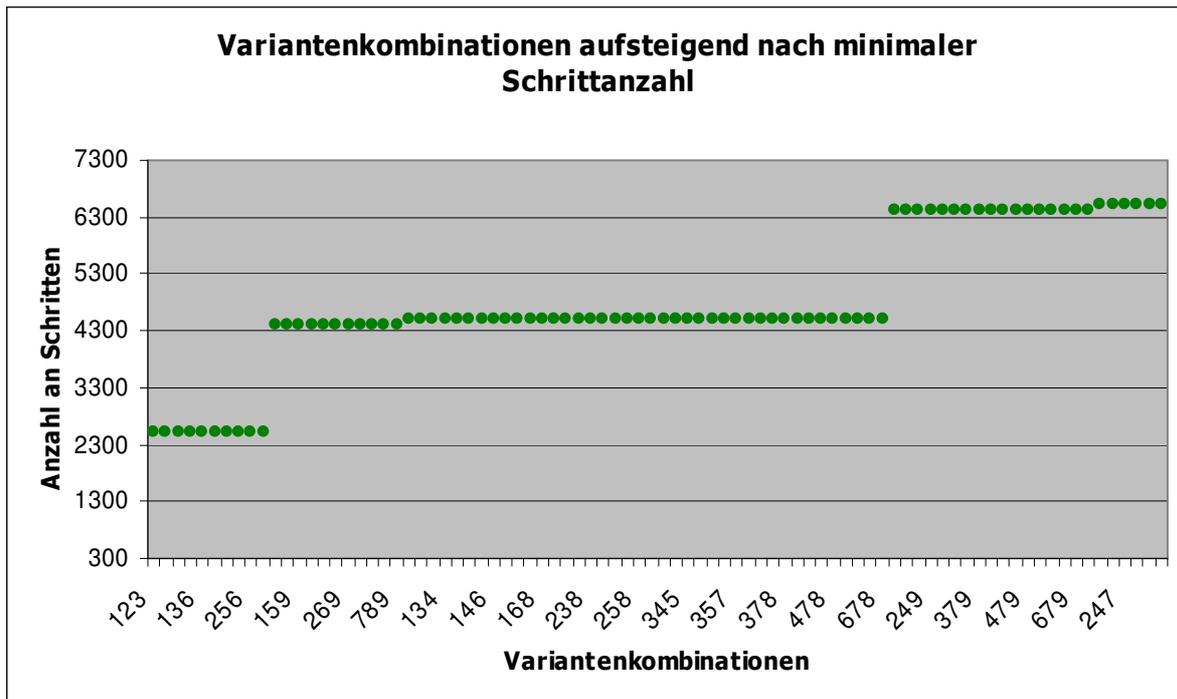


Abbildung 52 Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
123	2512
125	2512
126	2512
135	2512
136	2512
156	2512
235	2512
236	2512
256	2512
356	2512

Tabelle 21: Die ersten 10 „schritt optimalen“ Variantenkombinationen im „best case“ mit Berücksichtigung von Kosten⁴⁸³

⁴⁸³ Die vollständige Reihung der Variantenkombinationen befindet sich im Anhang (Tabelle 32)

ner Variantenkombinationen einen neuen Entscheidungsparameter in der Produktionsplanung darstellen. Mittels Gewichtung einzelner Prozesse können wichtige Parameter, z. B. Kosten, bei der Produktionsreihenplanung mit einfließen. Dieses Konzept kann auch auf andere Branchen der Prozessindustrie übertragen werden, in denen keine zyklischen Materialflusststrukturen auftreten. Schleifen im Produktionsprozess sind in diesen Formeln nicht in Betracht gezogen, können aber in zukünftigen Arbeiten Berücksichtigung finden. Für die diskrete Fertigung sind oft aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten zur Prozessindustrie, wie z.B. zyklische Prozessschritte bzw. keine Vorgaben von bestimmten Mengen im Prozess aufgrund fehlender technologischer und struktureller Restriktionen, diese Komplexitätsbewertung schwer anwendbar bzw. nicht sehr aussagekräftig: Ein „best case“ wird für die meisten Fertigungen der diskreten Produktion eine Schrittzahl von 1 pro Variante liefern, da es oft keine Mindestmengen gibt. Der „worst case“ wird schwer oder gar nicht zu ermitteln sein, da es in dieser Fertigungsform oft keine Mengenbeschränkungen nach oben gibt. Die durchschnittliche Anzahl an Produktionsschritten kann großen Schwankungen unterworfen sein, wenn sich die Produktionsmengen laufend ändern und daher sollte für die diskrete Fertigung zur Komplexitätsabschätzung die tatsächliche Schrittzahl einer Variantenkombination bei gegebenen Mengen berechnet werden. Selbstverständlich unterliegen auch die Produktionsmengen in der Prozessindustrie gewissen Schwankungen. Doch sind die Abläufe an einige Restriktionen gebunden, vgl. Abschnitt 3.2, die dadurch bestimmte Produktionsmengen bei den einzelnen Varianten vorgeben. Die Aussage zu generalisieren, dass diese Art der Komplexitätsbewertung nur in der Prozessindustrie funktioniert, kann aber nicht gemacht werden. Es hängt stark vom Produktionsprozess ab. Daher muss situativ entschieden werden, ob diese Möglichkeit, eine Aussage zum Komplexitätsgrad bestimmter Variantenkombinationen zu bekommen, im vorliegenden Prozess Sinn macht oder nicht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Logistik in einigen Branchen der Prozessindustrie aufgrund des rasanten Wachstums, vor allem durch progressive Märkte wie China und die Hinwendung zur kundenspezifischen Fertigung, gestiegen. Effizient gestaltete Wertschöpfungsnetzwerke gewinnen im Zuge dieser Entwicklung und nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Globalisierung stark an Bedeutung. Um konkurrenzfähig zu sein, müssen alle Bereiche der Supply Chain, die Beschaffung, die Produktion, die Distribution und die Entsorgung, effektiv vernetzt und strukturiert sein. Das erfolgreiche Management komplexer Wertschöpfungsnetzwerke und insbesondere der Materialflüsse wird daher in diesen Industrien immer wichtiger.

Die Prozessindustrie als logistisches Forschungsfeld wurde im Gegensatz zur Stückgutindustrie bisher vergleichsweise wenig erforscht. Dies beinhaltet Potential zur Weiterentwicklung.

In diese Lücke stößt die vorliegende Dissertation. Ihr Ziel besteht darin, einen Beitrag zur Lösung von Forschungsfragen zu leisten, welche sich vor allem mit der Betrachtung der Materialflusssysteme der Stahl- und Feuerfestindustrie als repräsentative Vertreter der Prozessindustrie, d. h. mit Regeln zur Vereinfachung der Materialflusstruktur und -steuerung, mit Komplexitätstreibern in diesen Systemen, mit möglichen Maßnahmen zur Vermeidung, Reduktion bzw. Beherrschung von Komplexität sowie mit der Bewertung von Komplexität, auszuersetzen. Dadurch wird mehr Transparenz in die Abläufe dieser Branchen gebracht und es werden Möglichkeiten bzw. Maßnahmen aufgezeigt, die Planung und Steuerung dieser Systeme effizienter zu gestalten.

Zur Lösung dieser Fragestellungen in der Prozessindustrie wurden eine Reihe von etablierten Methoden und Werkzeuge aus den Fachbereichen des Supply Chain Managements und der Logistik, der Komplexitätsforschung und der angewandten Mathematik zu Hilfe gezogen.

Die geringe Beachtung der Prozessindustrie in der logistischen Forschung ist vermutlich neben der hohen Komplexität der Thematik vor allem auf die heterogenen Charakteristika dieser Industriezweige zurückzuführen, wodurch eine gemeinsame Betrachtung über alle Branchen zunächst schwierig erscheint. Viele unterschiedliche Sichtweisen betreffend die Prozessindustrie erschweren eine gemeinsame Definition von Methoden etc. zur Planung, Optimierung und Steuerung der Materialflüsse. Im Laufe der vorliegenden Arbeit hat sich allerdings gezeigt, dass eine Clusterung einzelner Branchen, wie z. B. der Stahl- und Feuerfestindustrie, aufgrund ähnlicher logistischer Anforderungen und Restriktionen im Materialflusssystem durchaus möglich ist. Ein Raster zur Einteilung bzw. Clusterung der Branchen der Prozessin-

dustrie wurde im zweiten Kapitel erarbeitet. Wie die nähere Betrachtung zeigt, ist eine solche Zusammenfassung aufgrund von Synergien bei der Methodenentwicklung und -auswahl durchaus sinnvoll.

Die logistischen Herausforderungen entlang der Wertschöpfungskette wurden im spezifischen Kontext der Stahl- und Feuerfestindustrie ausführlich diskutiert, um Bereiche zu identifizieren, für die Maßnahmen und Methoden zu entwickeln bzw. zu verbessern sind. Aufbauend auf den gewonnen Erkenntnissen wurden Regeln und Grundsätze zur Materialflussvereinfachung aus den Bereichen des Logistik-Controllings und der Fabrikplanung auf ihre Gültigkeit und Anwendbarkeit in der Prozessindustrie geprüft. Es hat sich gezeigt, dass viele dieser formulierten „Grundsätze zur Flussvereinfachung“ für die Stückgutindustrie entwickelt wurden, dennoch aber - wenngleich teils eingeschränkt oder modifiziert - in der Prozessindustrie eingesetzt werden können. Diese Grundsätze und Regeln können zur Flussvereinfachung im Unternehmen beitragen, wobei die Anwendbarkeit dieser Regeln aber auch von den individuellen Gegebenheiten abhängt.

Es ließ sich weiters feststellen, dass aktuelle Entwicklungen in der Logistik der Stahl- und Feuerfestindustrie zu steigender Komplexität im Materialflussmanagement führen, wie etwa der Anstieg der Zahl der Materialflüsse in der Beschaffung aufgrund hoher Lieferantenvielfalt oder durch die stärkere Vernetzung von Produktions- und Entsorgungsflüssen. Der heterogen definierte Begriff der Komplexität wurde für den Kontext dieser Arbeit präzisiert, nachfolgend wurden typische Komplexitätstreiber im Cluster Stahl- und Feuerfestindustrie identifiziert. Es wurden Maßnahmen zur Vermeidung, Beherrschung und Reduktion typischer Komplexitätstreiber im Unternehmen vorgeschlagen und diskutiert. Hierbei hat sich gezeigt, dass oft ein Kompromiss geschlossen werden muss, da Maßnahmen zur Reduktion eines Komplexitätstreibers die Wirkung eines anderen unter Umständen beeinflussen. Es entstehen logistische Zielkonflikte, für die es ein situativ festzulegendes Optimum zu suchen gilt.

Die Auswirkungen von Komplexität in Kosten zu messen, ist ein wichtiger Schritt, um Komplexitätsauswirkungen in den Industrien transparent und messbar zu machen. In dieser Arbeit wurden als Beitrag zu dieser Thematik Kostenarten vorgeschlagen, auf welche Komplexitätstreiber Auswirkungen haben und diese Kosteneinflüsse für die untersuchten Industrien im Rahmen von Recherchen bewertet. Damit ist eine erste Einschätzung von Komplexitätstreibern auf Kosten im Unternehmen geschaffen.

Da Komplexität viele Ausprägungsmuster hat und daher auch schwer zu bewerten ist, wurde im Rahmen dieser Dissertation eine Analysemethode entworfen, die auf der operativen Ebene der Produktionsplanung eine einfache Möglichkeit zur Komplexitätsbewertung aufzeigt. In

Anlehnung an die Laufzeitkomplexität der Informatik wurde ein neuer Planungsparameter „Komplexität“ für die Reihenfolgeplanung in der Stahl- und Feuerfestindustrie entwickelt. Durch diesen Parameter lässt sich der Komplexitätsgrad (die Anzahl an Schritten und ihre Relationen im System) der Variantenkombinationen abschätzen. Diese Bewertung in der operativen Ebene stellt eine innovative Möglichkeit dar, Varianten in Abhängigkeit von ihrem Komplexitätsgrad in der Produktionsplanung zu priorisieren. Damit steht den Unternehmen eine Möglichkeit zur Analyse der Komplexität in der Produktion zur Verfügung. Entscheidungen im Produktionsprozess sind ein mehrdimensionales Problem, in dem weitere Parameter wie z. B. Kosten, Deckungsbeiträge, Liefertermine, Durchlaufzeit eine Rolle spielen. Größen wie z. B. die Kosten können über Gewichtungsfaktoren in die entwickelten Formeln integriert werden, um so realitätsnähere Aussagen zur Komplexität im Produktionsgeschehen treffen zu können. Grundsätzlich lassen sich die Erkenntnisse dieser Arbeit auch auf die Stückgutindustrie übertragen, wenngleich im praktischen Einsatz für Teile der dortigen Logistikketten Einschränkungen bestehen, z. B. können nicht ohne weiteres zyklische Materialflüsse abgebildet werden. Eine Einbindung dieses neuen Entscheidungsparameters in ein Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS) ist aber sehr wohl denkbar und nutzenversprechend. Für den breiten Praxiseinsatz bedarf es für die vorliegende Methode zur Komplexitätsbewertung noch der weiteren Validierungsarbeit, die allerdings den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte.

Aus dieser Arbeit lassen sich folgende Forschungspotentiale ableiten:

In der Komplexitätskostenrechnung mangelt es an einer eindeutigen Definition der Komplexitätskosten. Um Komplexitätskosten überhaupt berechnen zu können, muss eine Erfassungs-, Abbildungs- und Verrechnungsmöglichkeit der Komplexitätskosten in der traditionellen Kostenrechnung geschaffen werden. Danach kann die Entwicklung von allgemein gültigen Werkzeugen und Methoden zur Berechnung von Komplexitätskosten in Angriff genommen werden.

In der Komplexitätsbewertung sollte im Hinblick auf die vorgeschlagene Analysemethode eine Einbindung von zyklischen Prozessschritten bzw. eine Modifikation der Bewertung für spezifische Prozesse erfolgen. Auch die Integration der entwickelten Analysemöglichkeit in ein Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS) sollte überlegt und getestet werden. Weitere Forschungen zu Komplexitätsbewertungsmethoden auf taktischer und strategischer Ebene sollten durchgeführt werden, da diese mehr Transparenz entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit sich bringen würden.

Die Auswahl an offenen Forschungsthemen zeigt, dass im gegebenen Forschungsfeld noch einiges an Potential für weitere Entwicklungen wie z. B. von Methoden und Werkzeugen vorhanden ist.

Literaturverzeichnis

Adam, D.; Rollberg, R.: Komplexitätskosten. In: Die Betriebswirtschaft, 55, 1995, Heft 5, S. 667- 670.

Ahlbach, H.: Kosten, Transaktionen und externe Effekte im betrieblichen Rechnungswesen. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 1988, S. 1143-1170.

Alex, J.: Herstellung von Draht für Verbindungselemente. Online im Internet: http://dew.edelstahle.com/servlet/it.d4cms.custom.std.download.DownloadServlet/005101023654ZWhBdUpoc3IYMG9vWVg1ZFBHYzVFa1VWVFVCN1NDY0diMGdlQ0R0YkkxWmhSVk1jZWxrNlEwTUZaRVZVUxS1hEWmpRM0ppRVJKQ0pUSWIJekk3RHICK0RRVVFUUThRZjNJMEJRPT0=/tb_drahtherstellung.pdf?IE55_OR_SP1_BUG=.pdf. Stand: 6.11.2003, Abfrage: 27.03.2008, MEZ 12:00.

Ameling, D.: Wege über Grenzen. In: Eisen und Stahl, 126, 2006, Heft 12, S. S6-S12.

Ameling, D.: Stahlmarkt 2007-Marktdynamik in populistischen Zeiten. Online im Internet: http://www.stahl-online.de/medien_lounge/Hintergrundmaterial/HBStahlmarkt%202007.pdf, Stand: 1.3.2007, Abfrage: 21.8.2007, MEZ 13:00.

Ameling, D.: Stahlmarkt in Bestform. Online im Internet: http://www.stahl-online.de/medien_lounge/Vortraege/1604PKHannoverMesse2007Text.pdf, Stand: 16.04.2007, Abfrage: 21.08.2007, MEZ 13:30.

Ameling, D.; Endemann, G.: Ressourceneffizienz: Gute Argumente für Stahl. In: Stahl und Eisen, 127, 2007, Heft 8, S. 85-93.

Anderson, B.; Hagen, C.; Reifel, J.; Stettler, E.: Complexity: customization's evil twin. In: Strategy & Leadership, 24, 2006, 5, S. 19-27.

Anschütz, S.; Friedrich, S.: Supply Chain Management in der Prozessindustrie, Hamburg, Hanseverlag, 2002.

Appoo, P. M.: A Practical Method of Implementing the Batch BOM in the Process Industries. In: Production and Inventory Management Journal, 28, 1987, Heft 2, S. 79-84.

Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen, 4. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2005.

Ashby, W. R.: Einführung in die Kybernetik, Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1974.

AT Kearney: Routenplaner für die Rohstoff-Preisentwicklung, Online im Internet: http://www.atkearney.at/content/misc/wrapper.php/id/49885/name/pdf_pa_rohstoff_0705_23_final_11861309768116.pdf, Stand: 23.05.2007, Abfrage: 22.10.2007, MEZ 14:00.

Axmann, N.: Handbuch Materialflusstechnik, Ehningen bei Böblingen, expert Verlag, 1993.

Bach, S.: Ordnungsbrüche im Unternehmen – Die Fortentwicklung interner Modelle, Wiesbaden, DUV, 1998.

Bain, J. S.: Industrial Organization, 2. Auflage, New York, John Wiley & Sons, 1968.

Bak, P.; Chen, K.: "Self-organized criticality". In: Scientific American, 246, 1991, S. 46-53.

Bak, P.: How nature works, New York, Springer, 1996.

Banker, R.; Datar, S.; Kekre, S.; Mukhopadhyay, T.: Costs of product and process complexity. In: Measures of Manufacturing Excellence, hrsg. von Kaplan, R., Boston, Harvard Business School Press, 1990, S. 269-290.

Baumgartner, P.: Herausforderung Globalisierung. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 12, S. 73.

Becker, C.: Auswirkungen der industriellen Schichtarbeit auf die sozialen Lebensbereiche eines Schichtarbeiters, München/Ravensburg, Grin Verlag, 2005.

Becker, F.: Der Weg zum besseren Brennprozess – Voraussetzungen, Methoden, Beispiele. Online im Internet: http://www.riedhammer-gmbh.de/realone/aktuelles/veroeff_d/cfi.pdf, Stand: 1999, Abfrage: 02.04.2008, MEZ: 19:30.

Becker, W.: Komplexitätskosten. In: Kostenrechnungspraxis, 36, 1992, Heft 3, S. 171-173.

Becker, W.: Komplexitätskosten. In: Management-Lexikon, hrsg. von Bühner, R., München/Wien, Oldenbourg, 2001, S. 421-423.

Beckmann, H.: Supply Chain Management: Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2003.

Beer, S.: Brain of the Firm – The Managerial Cybernetics of Organization, London, Allen Lane the Penguin Press, 1972.

Beer, S.: Kybernetische Führungslehre, Frankfurt, Campus Verlag, 1992.

Bein, H. W.: Lokalmatador agiert global. In: Eisen und Stahl, 127, 2007, Heft 2, S. 66-68.

Beyerle, H.: Europas Stahl in Bewegung. In: Eisen und Stahl, 126, 2006, Heft 7, S. S125-S131.

Bleicher, K.: Das Konzept integriertes Management, 3. Auflage, Frankfurt/New York, Campus Verlag, 1995.

Bliss, C.: Integriertes Komplexitätsmanagement – Ansätze und Lösungsmöglichkeiten. In: Arbeitspapiere der wissenschaftlichen Gesellschaft für Marketing und Unternehmensführung, hrsg. von Meffert, H.; Backhaus, K.; Becker, J., Leipzig, Gesellschaft für Marketing und Unternehmensführung, 1998. Nr. 115.

Bliss, C.: Management von Komplexität: ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion, Wiesbaden, Gabler, 2000.

Bloech, J.; Ihde, G.: Vahlens Großes Logistiklexikon, München, Vahlen/Beck, 1997.

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft): Stand der Technik bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse (Dachziegel, Ziegelsteinen, feuerfesten Steinen und Feinkeramik) durch Brennen. In: Schriftenreihe des BMLFUW, Band 2, 2003.

Bohne, F.: Komplexitätskostenmanagement in der Automobilindustrie – Identifizierung und Gestaltung vielfaltsinduzierter Kosten, Wiesbaden, DUV, 1998.

Bonney, M. C.; Zhang, Z.; Head, M. A., Tien, C. C., Barson, R. J.: Are pull and push systems really so different? In: International Journal of Production Economics, 59, 1999, S. 53-64.

Böckmann, N.: Erfolgsfaktoren für die Instandhaltungs-Dienstleister in der Hütten- und Walzwerkindustrie. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 10, S. 80-82.

Briggs, J.; Peat, F. D.: Die Entdeckung des Chaos. Eine Reise durch die Chaos-Theorie, München, DTV, 1993.

Burbidge, J. W.: The principles of production control, London, MacDonald and Evans Ltd., 1962.

Burbidge, J. W.: Five golden rules to avoid bankruptcy. In: The Production Engineer, 62, 1983, Heft 10, S. 13-14.

Burbidge, J. W.: Automated production control with a simulation capability. In: Modelling production management systems, hrsg. von Falster, P.; Mazumder, R.B., Copenhagen, Elsevier Science Publisher B.V., 1985, S. 19-35.

Bürvenich, H. P.; Hensel, R.: Transparenz im Stahl- und Walzwerk. In: Stahl und Eisen, 124, 200, Heft 5, S. 68-70.

Calinescu, A.; Efstathiou, J.; Sivadasan, S.; Schirn, S.; Huaccho Huatuco, L.: Complexity in manufacturing: an information theoretic approach. In: Proceedings of the International Conference on Complex Systems and Complexity in Manufacturing, 2000, S. 30-44.

Chaitin, G. J.: Information theoretic computational complexity. In: Information, Randomness & Incompleteness, Series in Computer Science, 1974, Nr. 8, S. 29-38.

Childerhouse, P.; Towill, D. R.: Simplified material flow holds the key to supply chain integration. In: The International Journal of Management Science, 31, 2003, S. 17-27.

Cox, J. F.; Blackstone, J. H.; Spencer, M. S.: APICS Dictionary, 7. Auflage, Falls Church, APICS Inc., 1992.

Crutchfield; Y.: Computation at the Onset of Chaos. In: Complexity, entropy and the physics of information, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Proceedings, hrsg. von W. H. Zurek, Santa Fe, Addison-Wesley, 1989, S. 223-269.

Dalheimer, M.; Wellmer, F. W.: Rohstoffe- Global. In: TU-Contact, Nr. 12, 2003, S. 5-12.

Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2001.

Degres, L.; Pierreval, H.; Caux, C.: Simulation of steel industry using system dynamics. In: Information control problems in manufacturing, a proceedings volume from the 11th IFAC Symposium, hrsg. von Kopacek, P.; Pereira, C.; Morel, G., Salvador (Brazil), IFAC, 2004.

Deshmukh, A.; Talavage, J.; Barash, M.: Complexity in manufacturing systems. In: IIE Transactions, 30, 1998, S. 645-655.

Dennis, D. R. und Meredith, J. R.: An Analysis of Process Industry Production and Inventory Management. In: Journal of Operations Management, 18, 2000b, Heft 6, S. 683-699.

Dennis, D. R.; Meredith, J. R.: An Empirical Analysis of Process Industry Transformation Systems. In: Management Science, 46, 2000a, Heft 8, S. 1085-1099.

Deuse, J.; Deckert, C.: Lean Steel Production – Schlanke Produktionsprozesse in der Stahlindustrie. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Nr.6, S. 84-86.

Dorn, J.; Girsch, M.; Grohmann, H.; Meyer, W.; Vidakis, N.: Interaktive Feinplanung im Edelstahlwerk. In: BHM (Berg und Hüttenmännische Hefte), 141, 1996, Heft 9, S. 393-401.

Draxler, H.: Herausforderung China: Ohne Netzwerk geht nichts. Online im Internet: <http://www.die-wirtschaft.at/ireds-9881.html>. Stand: 24.02.2005, Abfrage: 1.04.2008, MEZ: 14:00.

Ebeling, W.: Selbstorganisation und Entropie in ökologischen und ökonomischen Prozessen. In: Zwischen Entropie und Selbstorganisation – Perspektiven einer ökologischen Ökonomie, hrsg. von Frank Beckenbach und Hans Diefenbacher, Marburg, Metropolis Verlag, 1994, S. 29-45.

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, 5. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2005.

Eidenmüller, B.: Die Produktion als Wettbewerbsfaktor, 3. Auflage, Köln, TÜV Rheinland, 1995.

Endemann, G.; Lungen, H.; Wuppermann, C. D.: Dust, scale and sludge generation and utilisation in German steelworks. In: Eisen und Stahl, 126, 2006, Heft 9, S. 25-32.

Europäischer Wirtschafts- und Sozialausschuss: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Erstellung der jährlichen Stahlstatistiken der Gemeinschaft für die Berichtsjahre 2003-2009. Online im Internet: http://eescregistry.eesc.europa.eu/viewdoc.aspx?doc=%5C%5Cesppub1%5Cesp_public%5Cces%5Cccmi%5Cccmi001%5Cde%5Cces413-2003_ac_de.doc. Stand: 26.03.2003. Abfrage: 1.04.2008, MEZ: 14:30.

Ewers, R.; Scholl, W.; Willeke, R.: Schrottmarkt und Schrottversorgung der Stahlindustrie in Deutschland. In: Stahl und Eisen, 123, 2003, Heft 4, S. 47-51.

Finch, B. J.; Cox J. F.: Process-Oriented Production Planning and Control: Factors That Influence System Design. In: Academy of Management Journal, 31, 1988, Heft 1, S. 123-153.

Fioroni, M.; Franzese, L., Harano; E. L. M.; Costhek, B. P.; Mendes, J. B.; Cuzzuol, J.; de Souza Lima, J.; Santos, R. B.; Coelho, R. J.; Silva, A. C.; Kimsr, O. J.: Simulation based Decision for Steelmaking Operations Challenges. In: Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, hrsg. von Kuhl, M.; Steiger, N.; Armstrong, F.; Joines, J., Orlando, 2005, S. 2657-2662.

Fischer, E.: Zuviel Extras. In: Automobil-Produktion, Ausgabe September, 1988, S. 68-71.

Fischer, W.; Dittrich, L.: Materialfluß und Logistik, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1997.

Fleischer, M.; Greinacher, J.; Baumgartner, S.; Hamy, M.; Ridder, R.: Produktivitätssteigerung und Kostensenkung – ein Widerspruch?. In: Stahl und Eisen, 127, 2007, Heft 3, S. 55-62.

Flückinger, M.; Rauterberg, M.: Komplexität und Messung von Komplexität. In: Technical Report IfAP/ETH/CC-01/95, Institut für Arbeitspsychologie, ETH Zürich, 1995, S. 1-31.

Forrester, J.: Industrial Dynamics, New York, MIT Press, John Wiley & Sons, 1961.

Frank, H.-J.: Stahlmarkt in China: Engpässe verhindern stärkeres Wachstum. Online im Internet: http://www.dbresearch.com/PROD/CIB_INTERNET_EN-PROD/PROD0000000000175979.pdf, Stand: 23.06.2004, Abfrage: 21.08.2007, MEZ 13:15.

Fransoo, J. C.; Rutten, W. G. M. M.: A Typology of Production Control Situations in Process Industries. In: International Journal Of Operations & Production Management, 14, 1994, Heft 12, S. 47-57.

Frizelle, G.; Woodcock, E.: Measuring complexity as an aid to develop operational strategy. In: International Journal of Operations & Production Management, 15, 1995, Heft 5, S. 26-39.

Funke, T. H.: Temperatur- und Spannungsberechnungen zur Analyse und Optimierung der Aufheiz- und Abkühlphase beim Brand von Schamottesteinen. Diss., Universität Duisburg-Essen, Duisburg/Essen, 2007.

Gara, S.; Schrimpf, S.: Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie. Online im Internet: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M092.pdf> Stand: 1998, Abfrage: 7.07.2007, MEZ: 15:19 Uhr.

Garrido Hidalgo, R.: *Distribución de Carga*, Chile, Ediciones Universidad Católica de Chile, 2001.

Gastmann, D.; de Veen, C.: Rohstoffpreise teils in ruhigerem Fahrwasser. In: *Glück Auf*, 2005, Heft 3, S. 4.

Geiger, G.; Hering, E.; Kummer, R.: *Kanban*, München/Wien, Hanser, 2000.

Gell-Mann, M.: *Das Quark und der Jaguar*, 3. Auflage, München, Piper, 1996.

Gollwitzer, M.; Karl, R.: *Logistik-Controlling*, München, Langen Müller/Herbig, 1998.

Gomez, P.; Malik, F.; Oeller, K. H.: *Systemmethodik: Grundlagen einer Methodik zur Erforschung und Gestaltung komplexer soziotechnischer Systeme*, 2 Bände, Bern/Stuttgart, Haupt, 1975.

Gomez, P.; Probst, G.: *Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens*, Bern/Stuttgart/Wien, Haupt Verlag, 1995.

Grohnwald, L.; Uhlig, M.: Zukünftige Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Roheisenerzeugung. In: *Stahl und Eisen*, 126, 2006, Heft 6, S. 21-28.

Grossmann, C.: *Komplexitätsbewältigung im Management – Anleitungen, integrierte Methodik und Anwendungsbeispiele*, Winterthur, GCN, 1992.

Guimaraes, T.; Martensson, N.; Stahre, J.; Igarria, M.: Empirically testing the impact of manufacturing system complexity on performance. In: *International journal of Operations & Production Management*, 19, 1999, Heft 12, S. 1254-1269.

Günther, H. O.: Produktionsplanung in der Prozessindustrie. In: *WiST*, 2004, Heft 6, S. 326-331.

Günther, H. O.; Tempelmaier, H.: *Produktion und Logistik*, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2005.

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*, 1. Band: Die Produktion, 23. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1979.

Hall, A. D.; Fagen, R. E.: Definition of System. In: *Yearbook of the Society for the Advancement of General Systems Theory*, 1, 1956, S. 18-28.

Handelsblatt Jahrestagung Stahlmarkt 2007: Stahl boomt – in der Wirtschaft und an der Börse. In: Stahl und Eisen, 127, 2007, Heft 4, S. 106-111.

Hansen, S.: Effizienzsteigerung durch IT-Standards im Stahlwerk. In: Eisen und Stahl, 126, 2006, Heft 8, S. 70-73.

Hayek, F. A.: Studies in Philosophy, Politics and Economics, Chicago, University Of Chicago Press, 1967.

Hayes, R. H.; Wheelwright, S. C.: Link Manufacturing Process and Product Life Cycles. In: Harvard Business Review, 57, 1979, Heft 1, S. 133-140.

Heidrich, J.: Implementierung von Supply Chain Management Systemen in der Stahlindustrie. Diss., Technische Universität Berlin, Berlin, 2004.

Heidrich, J.: Einsatz von Supply Chain Management Systemen in der Stahlindustrie. In: Industrie Management, 18, 2002, Heft 5, S. 46-49.

Heina, J.: Variantenmanagement: Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt, Wiesbaden, DUV, 1999.

Helmle, J.: Software sichert Qualität. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 8, S. 66-68.

Homburg, C; Daum, D.: Marktorientiertes Kostenmanagement. Kosteneffizienz und Kundennähe verbinden, Frankfurt am Main, Frankfurter Allgemeine Zeitung, 1999.

Hub, H.: Ganzheitliches Denken im Management, Wiesbaden, Gabler, 1993.

IG BCE Industriegruppen: Feuerfestindustrie. Online im Internet: http://www.igbce.de/portal/binary/com.epicentric.contentmanagement.servlet.ContentDeliveryServlet/site_www.igbce.de/static_files/PDFDokumente/Branchen/4d8bc40bc3e6313d65c4cd87c5bf21ca.pdf, Stand: 2007, Abfrage: 20.08.2007, MEZ 14:10.

Imai, M.: Kaizen, 2. Auflage, München, Langen Müller/Herbig, 1992.

Industrie-Schweiz: Industrie Lexikon. Online im Internet: <http://www.industrie-schweiz.ch/html/materialflusssystem.html>, Stand: 2007, Abfrage: 16.10.2007, MEZ: 16:00.

Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1989.

Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1998.

Jünemann, R; Schmidt, T.: Materialflußsysteme, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2000.

Kaiser, A.: Integriertes Kostenmanagement mit Hilfe der Prozesskostenrechnung. Diss., Hochschule St. Gallen, St. Gallen, 1995.

Keck, E. W.: Modellanalyse der Prozessindustrie zur Gestaltung kundennaher Produktionssysteme. Diss., Technische Universität, München, 1994.

Kenworthy, J.; Little, D.: When push comes to shove is MRPII infinite push or finite pull? In: BPICS Control, 1995, S. 31-32.

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H. R.: Leitfaden der systematischen Fabriksplanung, München/Wien, Hanser, 1984.

Kirchhof, R.: Ganzheitliches Komplexitätsmanagement: Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen, Wiesbaden, DUV, 2003.

Köhler, K. U.: Chancen in ausgewählten Teilmärkten. In: Stahl und Eisen, 124, 2004, Heft 4, S. 87-94.

Köhler, K. U.: Stahlindustrie in Deutschland bestens gerüstet. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 4, S. 94-100.

Kriegl, A.: Ermittlung von Komplexitätskosten unter besonderer Berücksichtigung der Variantenvielfalt am Beispiel eines Herstellers der Feuerfestindustrie. Diplomarbeit, TU Graz, Graz, 1996.

Krüger, R.: Das Just-in-Time-Konzept für globale Logistikprozesse, Wiesbaden, DUV, 2004.

Lee, L. C.: A comparative study of the push and pull production systems. In: International journal of Operations and Production Management, 9, 1989, Heft 4, S. 5-18.

Lewin, R.: Komplexitätstheorie: Wissenschaft nach der Chaosforschung, Hamburg, Hoffmann und Campe, 1993.

Liening, A.: Komplexe Systeme zwischen Ordnung und Chaos, Münster, LIT, 1999.

Lindblom, Ch. E.: The Intelligence of Democracy, London/New York, Free Press, 1965.

Lloyd, S.; Pagels, H.: Complexity as Thermodynamic Depth. In: Annals of Physic, 188, 1988, Heft 1, S. 186-213.

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2007.

Loos, P.: Produktionslogistik in der chemischen Industrie, Wiesbaden, Gabler, 1997.

Loos, P.; Allweyer, T.: Application of production planning and scheduling in the process industries. In: Computers in Industry, 36, 1998, S. 199-208.

Luhmann, N.: Funktionen und Folgen formaler Organisation, 3. Auflage, Berlin, Duncker und Humboldt, 1976.

Luhmann, N.: Zweckbegriff und Systemrationalität: Über die Funktion von Zwecken in sozialen Systemen, Mohr, Tübingen, 1968.

Luhmann, N.: Soziale Systeme. Grundriss einer allgemeinen Theorie, 2. Auflage, Frankfurt/M., Suhrkamp, 1984.

Luhmann, N.: Soziale Systeme. Grundriss einer allgemeinen Theorie, 4. Auflage, Frankfurt/M., Suhrkamp, 1984.

Lüngen, H., Steffen, R.: Innovative Entwicklungen bei der Roheisen- und Stahlherstellung in Deutschland. In: Eisen und Stahl, 126, 2006, Heft 7, S. S70-S95.

Malik, Fredmund: Komplexität – was ist das? Online im Internet: <<http://www.kybernetik.ch/dwn/Komplexitaet.pdf>>, Stand: 1998, Abfrage: 17.07.2007, MEZ 14:30 Uhr.

Malik, F.: Strategie des Managements komplexer Systeme, 5. Auflage, Bern/Stuttgart/Wien, Haupt, 2000.

Malik, F.: Strategie des Managements komplexer Systeme, 7. Auflage, Bern/Stuttgart/Wien, Haupt, 2002.

Männel, W.: Anpassung der Kostenrechnung an moderne Unternehmensstrukturen. In: Handbuch Kostenrechnung, hrsg. von Männel, W., Wiesbaden, Gabler, 1992, S. 105-137.

Männel, W.: Entwicklungsperspektiven der Kostenrechnung, 4. Auflage, Lauf an der Pegnitz, Verlag der GAB, 1998.

Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik, 6. Auflage, Wiesbaden, Vieweg, 2006.

Martens, P. N.: Rohstoffe – younger than ever. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 1, S. 82-85.

Maturana, H. R.; Varela, F. J.: Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living, Boston, Reidel, 1980.

Maturana, H. R.; Varela, F. J.: Der Baum der Erkenntnis, 2. Auflage, Bern/München/Wien, Scherz, 1987.

Mehta, M.: Go East: LNM und U.S. Steel haben ehemalige Ostblockländer im Visier. In: Stahl und Eisen, 124, 2004, Heft 4, S. 97-99.

Mehta, M.: Streit um Eisenerzvorräte entzweit die indische Industrie. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 10, S. 84-86.

Nelson, N. S.: MRP and Inventory and Production Control in Process Industries. In: Production and Inventory Management Journal, 24, 1983, Heft 4, S. 15-22.

Neumann, K.; Schwindt, C.; Trautmann, N.: Scheduling of continuous and discontinuous material flows with intermediate storage restrictions. In: European Journal of Operational Research, 165, 2005, S. 495-509.

Niklas, C.: NWA – Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe mit Beispielen. In: Projektmagazin, 23, 2002, S. 1-16.

Oloff, C.: Effiziente Produktionsplanung in der Stahlindustrie. In: Stahl und Eisen, 125, 2005, Heft 11, S. 64-68.

Oloff, C.: Optimierte Produktionsplanung im Ruuki-Werk Raahe. In: Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 8, S. 74-77.

ÖNACE: Klassifikationsdatenbank. Online im Internet: <http://www.statistik.at/kdb/downloads/pdf/OENACE2003_DE_COE_20061123_000000.pdf> Stand: 2003; Abfrage 21.06.2007, MEZ 10:00.

Pawellek, G.: Produktionslogistik, München, Hanser, 2007.

Perlitz, U.: Stahlmarkt in China. Online im Internet: http://www.dbresearch.com/PROD/DBR_INTERNET_EN-PROD/PROD0000000000175979.pdf, Stand: 23.06.2004, Abfrage: 23.10.2007, MEZ 10:00.

Perona, M.; Miragliotta, G.: Complexity management and supply chain performance assessment. In: International journal of production economics, Heft 90, 2004, S. 103-115.

Pfeiffer, W.; Dörrie, U.; Gerharz, A.; von Goetze, S.: Variantenkostenrechnung. In: Handbuch Kostenrechnung, hrsg. von Männel, W., Wiesbaden, Gabler, 1992, S. 861-877.

Piller, F. T.: Mass Customization. Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter, 4. Auflage, Wiesbaden, DUV, 2006.

Popper, K. R.: Objective Knowledge – An Evolutionary Approach, USA, Oxford University Press, 1972.

Puttmann, Jr. M.T.: Logistics In Process Industries. Is It A Specific Problem? In: Production Inventory Management Journal, 32, 1991, Heft 3, S. 61-66.

Raiffeisen Centrobank: Stahlbranche vor Neubewertung? Online im Internet: <http://aktien-portal.at/shownews.html?id=9686>, Stand: 30.01.2006, Abfragedatum: 22.10.2007, MEZ 13:30.

Rathnow, P. J.: Integriertes Variantenmanagement, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht, 1993.

Reiner, D.: Strategisches Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Wiesbaden, DUV, 2004.

Reiners, F.; Sasse, A.: Komplexitätskostenmanagement. In: krp – Kostenrechnungspraxis 43, Nr. 4, 1999, S. 222-232.

RHI: Facts & Figures zum führenden Feuerfestanbieter weltweit. Online im Internet: http://www.rhi-ag.com/internet/de/refractories/RefrPDFmoviesRefr/RHI_20Refr._20company_20profile,templateId=default,property=Data.pdf, Stand: 05.2005, Abfrage: 03.04.2008, MEZ: 11:20.

RHI: Geschäftsbericht 2006. Online im Internet: http://www.rhi-ag.com/internet/de/corpsvc/ir/Downloads_20GB_2BQTR_20_28d_29/RHI_20Konzern_202006,templateId=default,property=Data.pdf, Stand: 12.2006, Abfragedatum: 1.04.2008, MEZ 12:15.

Rice, J. W.; Norback, J. P.: Process Industries Production Planning Using Matrix Data Structures. In: Production and Inventory Management Journal, 28, 1987, Heft 2, S.15-23.

Richter, K.; Rost, J. M.: Komplexe Systeme, Frankfurt am Main, Fischer Taschenbuch Verlag, 2004.

Rifkin, J.: Das Ende der Arbeit und ihre Zukunft. Neue Konzepte für das 21. Jahrhundert, Frankfurt, Campus Verlag, 2004.

Roever, M.: Fokussierte Produkt- und Programmgestaltung zur Komplexitätsreduzierung. In: Handbuch Produktionsmanagement, hrsg. von Corsten, H., Wiesbaden, Gabler, 1994, S. 115-129.

Rose, O.: Simulationsstudien zum Einsatz der Shifting-Bottleneck-Heuristik zur Ressourceneinsatzplanung in der Halbleiterfertigung. Online im Internet: <http://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/iai/ms/papers/2004asim1.pdf>, Stand: 2004, Abfrage: 26.03.2008, MEZ 13:00.

RTC: Laufzeitkomplexität von Algorithmen – die O-Notation. Online im Internet: <http://www.linux-related.de/index.html?coding/o-notation.htm>, Stand: 2004, Abfragedatum: 10.01.2008, MEZ 13:00.

Rutten, W. G. M. M.: Hierarchical Mathematical Programming for Operational Planning in a Process Industry. In: European Journal of Operations Research, 64, 1993, Heft 3, S. 363-369.

Safizadeh, M. H.; Ritzman, L. P.; Sharma, D.; Wood, C.: An Empirical Analysis of the Product-Process Matrix. In: Management Science, 42, 1996, Heft 11, S. 1576-1591.

Sauerbier, T.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler, München, Oldenbourg, 2003.

Schamari, U.: Rohstoff-Teuerungswelle ist noch nicht abgeebbt. In Stahl und Eisen, 125, 2005, Heft 12, S. S34-S36.

Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2004.

Scheidl, J.; von Woedtke, E.: Möglichkeiten zur Optimierung von Lieferterminen, Kapital und Kosten im Stahl- und Walzwerk. In: Stahl und Eisen, 123, Heft 10, 2003, S. 47-52.

Schemme, K.: Unverzichtbarer Rohstoff für die Stahlindustrie. In: Eisen und Stahl, 126, 2006, 12, S. 78-81.

Scheuerer, F.: SCM und Verfahrensoptimierung. In: Materialfluss und Logistik, 46, 2001 Heft 9/10, S. 39-41.

Schindewolf, K.: Betriebswirtschaftslehre. Organisation und Betriebsführung in der Altenpflege, München, Urban & Fischer Bei Elsevier, 2002.

Schlange, L.: Komplexitätsmanagement – Grundlagen und Perspektiven. In: Komplexität und Managementpraxis: reale Visionen zum Komplexitätsmanagement, hrsg. von Schlange L.; Schüller, A., Stuttgart, Enke, 1994, S. 1-32.

Schmidt, D.: Strategisches Management komplexer Systeme – die Potentiale computergestützter Simulationsmodelle als Instrumente eines ganzheitlichen Managements – dargestellt am Beispiel der Planung und Gestaltung komplexer Instandhaltungssysteme. Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 1992.

Schöning, U.: Complexity and Structure. In: Lecture Notes in Computer Science, Nr. 211, hrsg. von Goos, G.; Hartmanis, J., Berlin, Springer, 1985.

Schöning, U.: Theoretische Informatik – kurzgefasst, 3. Auflage, Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag, 1997.

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2000.

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement, 4. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2004.

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement, 5. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2007.

Schreyögg, G; Koch, J.: Grundlagen des Managements, Wiesbaden, Gabler, 2007.

Schuh, G.: Produktkomplexität managen – Strategien, Methoden, Tools, München, Carl Hanser, 2005.

Schuh, G.; Schwenk, U.: Produktkomplexität managen – Strategien, Methoden, Tools, München, Carl Hanser, 2001.

Schwanninger, M.: Managementsysteme, Frankfurt, Campus Verlag, 1994.

Shannon, C.; Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication, Urbana, University of Illinois Press, 1949.

Siegler, O.: Die dynamische Organisation – Grundlagen, Gestalt, Grenzen, Wiesbaden, DUV, 1999.

Simchi-Levi, D.; Kaminsky, P.; Simchi-Levi, E.: Designing and Managing the Supply Chain, 3. Auflage, New York, McGraw-Hill, 2008.

Sivadasan, S.; Efstathiou, J.; Frizelle, G.; Shirazi, R.; Calinescu, A.: An information.theoretic methodology for measuring the operational complexity of supplier-customer systems. In: International Journal of Operations & Production Management, 22, 2002, Heft 1, S. 80-102.

SMS Group: Ganzheitlicher SMS-Auftritt zur METEC, GIFA und THERMPROCESS 2007. Online im Internet: <http://www.sms-group.com/media/dmetec.pdf>, Stand: 06.2007, Abfrage: 20.08.2007, MEZ 14.00.

Spahni, D.: Verfahren zur Bestimmung geeigneter Teilsysteme und deren Sequenzierung. Diss., Universität Bern, Bern, 1998.

Spengler, T.; Lapitzke, N.; Volling, T.: Simulationsgestützte Prozessoptimierung in push-pull-getriebenen Logistikstrukturen bei der Stahlherstellung. In: Logistik Management, 9, 2007, Heft 2, S. 48-61.

Steinbrunner, J. D.: The Cybernetic Theory of Decision, Princeton, NJ, Princeton University Press, 1974.

Steinmann, H.; Schreyögg, G.: Management. Grundlagen der Unternehmensführung, 4. Auflage, Wiesbaden, Gabler, 1997.

Stobbe, M.; Löhl, T.; Schulz, C.; Engell, S.: Planning and Scheduling in the Process Industry, Consolidated Review of Research and Applications, Process Control Laboratory, Universität Dortmund, 2000.

Stoer, R.: Stahl im Transit – Wie können wir Verluste reduzieren? Online im Internet: <http://www.tis-gdv.de/tis/tagungen/svt/svt00/stoer/stoer.htm>, Stand: 2000, Abfrage: 04.04.2008, MEZ 15:00.

Suni, P.: World Commodity Prices 2006-2008 der AIECE Arbeitsgruppe Rohstoffpreise. Online im Internet: http://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Mediencenter/Pressemitteilungen/2007_Pressemitteilungen/2007-05-07_Pressemitteilung_Rohstoffpreise.pdf, Stand: 05.2007, Abfrage: 24.10.2007, MEZ 14:00.

Syring, A.: Management innovativer Informationssysteme, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht, 1993.

Syska, A.: Produktionsmanagement, Wiesbaden, Gabler, 2006.

Tang, V.; Salminen, V.: Towards a theory of complicatedness: framework for complex systems analysis and design. In: Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, S. Cully, 2001, S. 125-132.

Taylor, S. G.; Sewart, S. M.; Bolander, S. F.: Why the Process Industries are Different. In: Production and Inventory Management Journal, 22, 1981, Heft 4, S. 9-24.

Toni, A.; Caputo, M.; Vinelle, A.: production management techniques: a push-pull classification and application conditions. In: International Journal of Operations and Production Management, 8, 1988, Heft 2, S. 35-51.

Towill, D. R.: Simplicity wins: twelve rules for designing effective supply chains. In: Control, 25, 1999, Heft 2, S. 9-13.

Traub, J. F.: Introduction to Information-Based Complexity. In: Complexity in Information Theory, hrsg. von Abu-Mostafa, J. S., New York, Springer, 1988, S. 62-76.

Traub, J. F.; Wasilikowski, G. W.; Wozniakowski H.: Information based Complexity, New York, Academic Press, 1988.

Trautmann, N.: Anlagenbelegungsplanung in der Prozessindustrie. Diss., Technische Universität, Karlsruhe, 2000.

Ulrich, H.; Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte, 3. Auflage, Bern, HauptVerlag, 1991.

Vahrenkamp, R.: Produktionsmanagement, 5. Auflage, München/Wien, Oldenbourg, 2004.

Vastag, A.; Schürholz, A.: Distribution. In: Handbuch Logistik, hrsg. von Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H., Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 2004.

VDEh (Verein Deutscher Eisenhüttenleute): Stahlfibel, Düsseldorf, Verlag Stahleisen, 2002.

VDI 2411: VDI Richtlinie 2411 Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen, Düsseldorf, VDI Verlag, 1970.

VDI 3300: VDI-Richtlinie 3300 Materialfluss-Untersuchungen. In: VDI Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Berlin, Beuth Verlag, 1973.

Venkatesh, K.; Zhou, M.; Kaighobadi, M.; Caudill, R.: A Petri net approach to investigating push and pull paradigms in flexible factory automated systems. In: International journal of Production Research, 34, 1996, Heft 3, S. 595-620.

Viehöver, U.: STAHL-Schmelzen ohne Ende. In: Focus, Heft 17, 1997, S. 246-250.

Villa, A.; Watanabe, T.: Production Management: Beyond the dichotomy between pull and push. In: Computer Integrated Manufacturing Systems, 6, 1993, Heft 1, S. 53-63.

Voest: Wirtschaftliches Umfeld. Online im Internet: <http://gb.voestalpine.com/ereport.asp?fCompanyID=10&fAction=SHOWREPORT&freportid=91&fpageid=2422&fLangID=2>, Stand: 2005, Abfrage: 02.04.2007, MEZ 12:00

Voest: Der steirische Erzberg als Nahversorger. Online im Internet: http://www.voestalpine.com/stahl/de/op2/news/Der_steirische_Erzberg_als_Nahversorger.html, Stand: 2007, Abfrage: 20.10.2007, MEZ 12:00.

Wagner, S.: Interview mit Niemeyer, B.: Größe ist für uns kein ausschlaggebendes Kriterium. In: Stahl und Eisen, 127, 2007, Heft 3, S. 84-85.

Waldrop, M.: Inseln im Chaos. Erforschung komplexer Systeme, Hamburg, Rowolth, 1993.

West, D.; Mangiameli, P.; Shaw, K.: Control of complex manufacturing processes. In: International Journal of Management Science, 27, 1999, S. 349-362.

Westphal, J. R.: Komplexitätsmanagement in der Produktionslogistik: Ein Ansatz zur flussgerechten Gestaltung und Lenkung heterogener Produktionssysteme. Diss. Technische Universität Dresden, Dresden, 2001.

Weth, R. von der: Management der Komplexität, Bern, Huber Verlag, 2001.

Wiendahl, H. P.: Fertigungssteuerung mit BOA und CONWIP. In: Taschenbuch der Logistik, hrsg. von Koether, R., München/Wien, Carl Hanser Verlag, 2004, S. 154-171.

Wildemann, H.: Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung, 4. Auflage, München, TCW, 1994.

Wildemann, H.: Komplexität: Vermeiden oder beherrschen lernen. In: Harvard Businessmanager, 6, 1999, S. 31-42.

Wildemann, H.: Produktionscontrolling, 4. Auflage, München, TCW, 2002.

Wildemann, H.: Variantenmanagement, 13. Auflage, München, TCW, 2005.

Willeke, R.: Stahlschrott soll nicht mehr als Abfall deklariert werden. In Stahl und Eisen, 126, 2006, Heft 10, S. 83.

Willeke, R.: EU-Abfallverbringung bedroht Recyclingbranche. In Stahl und Eisen, 127, 2007, Heft 10, S. 75.

Winkler, R.: Komplexitätsbeherrschung der automobilen Variantenvielfalt durch logistische Modularisierung. Diss., Technische Universität Graz, Graz, 2006.

Winter, B.; Szednyj, I.; Reisinger, H.; Böhmer, S.; Jahnsen, T.: Abfallvermeidung und –verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich. Online im Internet <<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0003.pdf>> , Stand: 2005, Abfrage: 07.07.2007, MEZ 12:30.

Winterhalder, L.: Stahl unter Kontrolle. In: Eisen und Stahl, 126, 2006, Heft 8, S. 62-64.

Wirtschaftslexikon 24. Online im Internet: <<http://www.wirtschaftslexikon24.net/d/komplexitaetskosten/komplexitaetskosten.htm>> Stand: 2007, Abfrage: 26.08.2007, MEZ 10:03.

Wölfle, R.; Brossok, K.: Chargenrückverfolgung in der Prozessindustrie. Online im Internet: <[http://www.prozoom.ch/apps/prozoom.nsf/img/0504LeitfadenChargenr%C3%Bcckverfolgung/\\$file/05-04-Leitfaden-Chargenr%C3%Bcckverfolgung.pdf](http://www.prozoom.ch/apps/prozoom.nsf/img/0504LeitfadenChargenr%C3%Bcckverfolgung/$file/05-04-Leitfaden-Chargenr%C3%Bcckverfolgung.pdf)> Stand: 2005, Abfrage: 10.07.2007, MEZ 17:22.

Woodward, J.: Industrial Organization: Theory and Practice, London, Oxford University Press, 1966.

Wu, Y.; Frizelle, G.; Efstathiou, J.: A study on the cost of operational complexity in customer-supplier systems. In: International journal of production Economics, 106, 2007, S. 217-229.

Anhang

Gesprächsprotokolle

Gesprächsprotokoll 1
Datum: 07.12.2008
Interviewter: Erfahrungsträger im Bereich Logistik ⁴⁸⁵ Branche: Feuerfestindustrie
Die Antworten basieren bewusst auf dem persönlichen Erfahrungswert des Interviewten und spiegeln nicht unbedingt die offizielle Meinung des Unternehmens wieder.
Frage 1: Welche Prinzipien (Pull oder Push) werden in Ihrem Unternehmen für die Fertigungsplanung angewendet? Antwort: Für die Grobplanung wird oft TOC (Theorie of Constraints) eingesetzt. In der Feinplanung herrscht eine Kombination aus Pull und Push Strategien vor. Eine genaue Abgrenzung ist oft schwierig.
Frage 2: Produziert Ihr Unternehmen make-to-stock oder make-to-order? Antwort: Es wird hauptsächlich, ca. 90%, make-to-order produziert.
Frage 3: Gibt es in der Feuerfestindustrie eine Flexibilität hinsichtlich Mengenänderungen in der Produktion? Antwort: In der Feuerfestindustrie ist die Flexibilität stark vom erzeugten Produkt abhängig. Bei Massen ist eine Mengenerhöhung oft weniger mit Problemen verbunden als z. B. bei schmelzgegossenen Produkten.
Frage 4: Ist eine hohe Auslastung der Aggregate wichtig in der Produktion? Antwort: Eine hohe Auslastung der Aggregate ist oft notwendig um rentabel produzieren zu können. Es gibt auch manchmal Mindestbestellmengen.

⁴⁸⁵ Name und Firma des Interviewten sind dem Lehrstuhl bekannt

Gesprächsprotokoll 2		
Datum: 25.03.2008		
Interviewter: Erfahrungsträger im Bereich Produktion ⁴⁸⁶		
Branche: Feuerfestindustrie		
Die Antworten basieren bewusst auf dem persönlichen Erfahrungswert des Interviewten und spiegeln nicht unbedingt die offizielle Meinung des Unternehmens wieder.		
Frage 1: Wie viele Varianten bei geformten, gebrannten Steinen erzeugen Sie?		
Antwort: Berücksichtigt man nicht kleine Formunterschiede, sind es neun unterschiedliche Varianten.		
Frage 2: Wie viele Aggregate mit welchen Fassungsvermögen stehen in Ihrem Werk zur Verfügung?		
Antwort:		
Aggregat	Fassungsvermögen	Anzahl
Mischer	1800kg	4
Presse Typ 1	17kg	2
Presse Typ 2	28,5kg	2
Trocknungsraum	M	1
Tunnelofen	8,5t pro Wagen (82 Wagen) = 697t	1
Abkühlungsraum	M	1

⁴⁸⁶ Name und Firma des Interviewten sind dem Lehrstuhl bekannt

Frage 3: Welche Beschränkungen hinsichtlich Maximal- bzw. Mindestmengen gibt es im Prozess?

Antwort: Grundsätzlich ist die Mindestmenge mit 25 Tonnen festgelegt, Variante 9 bildet eine Ausnahme und weist eine Mindestmenge von nur 11 Tonnen auf. Bei den Maximalmengen schwanken die Varianten zwischen 70 und 90 Tonnen.

Frage 4: Wie sieht der Sinterprozess aus?

Antwort: Für die von uns erzeugten Varianten werden die Rohstoffe schon fertig gesintert zugekauft.

Frage 5: Welche Varianten können gemeinsam gebrannt werden?

Antwort: Die Varianten 1, 2, 3, 5 und 6 können gemeinsam gebrannt werden, die Varianten 7 und 8 weisen ebenfalls eine gleiche Brenntemperatur auf.

Frage 6: Wo finden der Trocknungs- und der Abkühlprozess statt?

Antwort: Der Trocknungsprozess findet in einem temperierten Raum, in dem alle Varianten gemeinsam getrocknet werden können. Der Abkühlprozess unterliegt auch keinen Restriktionen.

Frage 7: Welchen Anteil haben die betrachteten Prozesse an den Kosten?

Antwort: Der Brennprozess macht ca. 75% der Gesamtkosten aus, der Pressprozess 7,5% und der Mischprozess 3%

Frage 8: Welche durchschnittlichen Mengen der einzelnen Varianten werden in einem Produktionsdurchlauf eingelastet?

Antwort: Im Verlauf des Jahres 2007 ergaben sich folgende Durchschnittsmengen:

Variante	Durchschnittliche Mengen [Tonnen]
1	70,77
2	46,96
3	30,07
4	33,2
5	36,67
6	83,79
7	36,6
8	60,47
9	11,29

Auswertungen der Komplexitätsberechnungen

Anzahl	Variantenkombination (3 Varianten)
1	123
2	124
3	125
4	126
5	127
6	128
7	129
8	134
9	135
10	136
11	137
12	138
13	139
14	145
15	146
16	147
17	148
18	149
19	156
20	157
21	158
22	159
23	167
24	168
25	169
26	178
27	179
28	189
29	234
30	235
31	236
32	237
33	238
34	239
35	245
36	246
37	247
38	248
39	249
40	256
41	257
42	258
43	259
44	267
45	268
46	269
47	278
48	279
49	289
50	345
51	346
52	347

53	348
54	349
55	356
56	357
57	358
58	359
59	367
60	368
61	369
62	378
63	379
64	389
65	456
66	457
67	458
68	459
69	467
70	468
71	469
72	478
73	479
74	489
75	567
76	568
77	569
78	578
79	579
80	589
81	678
82	679
83	689
84	789
Anzahl	Variantenkombination (2 Varianten)
1	12
2	13
3	14
4	15
5	16
6	17
7	18
8	19
9	23
10	24
11	25
12	26
13	27
14	28
15	29
16	34
17	35
18	36
19	37
20	38
21	39
22	45
23	46

24	47
25	48
26	49
27	56
28	57
29	58
30	59
31	67
32	68
33	69
34	78
35	79
36	89

Tabelle 23: Anzahl an möglichen Variantenkombinationen

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
345	1189
347	1189
357	1189
457	1189
359	1189
349	1190
379	1190
459	1190
479	1190
579	1190
235	1245
234	1246
237	1246
245	1246
257	1246
348	1246
358	1246
378	1246
458	1246
478	1246
578	1246
239	1246
259	1246
789	1246
247	1247
249	1247
279	1247
389	1247
489	1247
589	1247
135	1301
356	1301
134	1302
137	1302
145	1302
157	1302
346	1302
367	1302

456	1302
567	1302
139	1302
159	1302
369	1302
569	1302
147	1303
238	1303
258	1303
278	1303
467	1303
149	1303
179	1303
469	1303
679	1303
248	1304
289	1304
123	1358
125	1358
236	1358
256	1358
124	1359
127	1359
138	1359
158	1359
178	1359
246	1359
267	1359
368	1359
568	1359
678	1359
129	1359
269	1359
148	1360
468	1360
189	1360
689	1360
136	1414
156	1414
146	1415
167	1415
169	1415
128	1416
268	1416
126	1471
168	1472

Tabelle 24: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
129	351
139	351
159	351
169	351
239	351
259	351

269	351
359	351
369	351
569	351
789	351
149	352
179	352
189	352
249	352
279	352
289	352
349	352
379	352
389	352
459	352
469	352
479	352
489	352
579	352
589	352
679	352
689	352
123	429
125	429
126	429
135	429
136	429
156	429
235	429
236	429
256	429
356	429
124	430
127	430
128	430
134	430
137	430
138	430
145	430
146	430
157	430
158	430
167	430
168	430
178	430
234	430
237	430
238	430
245	430
246	430
257	430
258	430
267	430
268	430
278	430
345	430
346	430
347	430

348	430
357	430
358	430
367	430
368	430
378	430
456	430
457	430
458	430
478	430
567	430
568	430
578	430
678	430
147	431
148	431
247	431
248	431
467	431
468	431

Tabelle 25: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
349	429
359	448
379	449
459	466
479	466
579	486
239	506
249	524
259	543
279	544
345	571
347	571
389	583
357	591
489	600
457	608
789	619
589	620
234	629
139	639
235	648
237	649
149	657
245	666
247	667
159	676
179	677
289	678
257	686
348	705
369	713
358	725

378	725
469	731
129	734
458	742
478	742
569	750
679	751
134	762
578	762
135	781
137	782
238	783
145	799
147	800
248	801
269	808
189	811
157	819
258	820
278	820
346	836
123	839
356	855
367	856
124	857
456	873
467	874
125	876
127	877
689	885
567	893
236	913
138	916
246	931
148	934
169	941
256	950
267	951
158	953
178	953
368	990
468	1008
128	1011
568	1027
678	1027
136	1046
146	1064
156	1083
167	1084
268	1085
126	1141
168	1218

Tabelle 26: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
345	571
347	571
357	591
457	608
234	629
235	648
237	649
245	666
247	667
257	686
348	705
358	725
378	725
458	742
478	742
134	762
578	762
135	781
137	782
238	783
145	799
147	800
248	801
157	819
258	820
278	820
346	836
123	839
356	855
367	856
124	857
456	873
467	874
125	876
127	877
567	893
236	913
138	916
246	931
148	934
256	950
267	951
158	953
178	953
368	990
468	1008
128	1011
568	1027
678	1027
136	1046
146	1064
156	1083
167	1084
268	1085
126	1141

168	1218
345	571
347	571
357	591
457	608
234	629
235	648
237	649
245	666
247	667
257	686
348	705
358	725
378	725
458	742
478	742
134	762
578	762
135	781
137	782
238	783
145	799
147	800
248	801
157	819
258	820
278	820
346	836
123	839

Tabelle 27: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen ohne Variante 9

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
35	793
34	794
37	794
39	794
45	794
47	794
49	794
57	794
59	794
79	794
23	850
25	850
78	850
24	851
27	851
29	851
38	851
48	851
58	851
89	851
13	906
15	906

36	906
56	906
14	907
17	907
19	907
46	907
67	907
69	907
28	908
12	963
26	963
18	964
68	964
16	1019

Tabelle 28: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
19	209
29	209
39	209
49	209
59	209
69	209
79	209
89	209
12	287
13	287
15	287
16	287
23	287
25	287
26	287
35	287
36	287
56	287
78	287
14	288
17	288
18	288
24	288
27	288
28	288
34	288
37	288
38	288
45	288
46	288
47	288
48	288
57	288
58	288
67	288
68	288

Tabelle 29: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
39	240
49	257
59	277
79	277
29	335
34	363
35	382
37	383
45	400
47	400
89	411
57	420
23	440
24	458
19	468
25	477
27	478
38	517
48	534
69	542
78	553
58	554
13	573
14	591
15	610
17	611
28	612
36	647
46	665
12	668
56	684
67	685
26	742
18	745
68	819
16	875

Tabelle 30: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
235	3468
135	3531
356	3531
123	3602
125	3602
236	3602
256	3602
136	3665
156	3665
126	3736
345	5397
347	5397

357	5397
457	5397
359	5397
234	5468
237	5468
245	5468
257	5468
348	5468
358	5468
378	5468
458	5468
478	5468
578	5468
239	5468
259	5468
789	5468
134	5531
137	5531
145	5531
157	5531
346	5531
367	5531
456	5531
567	5531
139	5531
159	5531
369	5531
569	5531
238	5539
258	5539
278	5539
124	5602
127	5602
138	5602
158	5602
178	5602
246	5602
267	5602
368	5602
568	5602
678	5602
129	5602
269	5602
146	5665
167	5665
169	5665
128	5673
268	5673
168	5736
349	7397
379	7397
459	7397
479	7397
579	7397
247	7468
249	7468
279	7468
389	7468

489	7468
589	7468
147	7531
467	7531
149	7531
179	7531
469	7531
679	7531
248	7539
289	7539
148	7602
468	7602
189	7602
689	7602

Tabelle 31: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach maximaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
123	2512
125	2512
126	2512
135	2512
136	2512
156	2512
235	2512
236	2512
256	2512
356	2512
129	4419
139	4419
159	4419
169	4419
239	4419
259	4419
269	4419
359	4419
369	4419
569	4419
789	4419
124	4512
127	4512
128	4512
134	4512
137	4512
138	4512
145	4512
146	4512
157	4512
158	4512
167	4512
168	4512
178	4512
234	4512
237	4512

238	4512
245	4512
246	4512
257	4512
258	4512
267	4512
268	4512
278	4512
345	4512
346	4512
347	4512
348	4512
357	4512
358	4512
367	4512
368	4512
378	4512
456	4512
457	4512
458	4512
478	4512
567	4512
568	4512
578	4512
678	4512
149	6419
179	6419
189	6419
249	6419
279	6419
289	6419
349	6419
379	6419
389	6419
459	6419
469	6419
479	6419
489	6419
579	6419
589	6419
679	6419
689	6419
147	6512
148	6512
247	6512
248	6512
467	6512
468	6512

Tabelle 32: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach minimaler Schrittzahl mit Berücksichtigung von Kosten

Variantenkombination	Anzahl an Schritten
235	2773
135	2927

123	2992
356	3015
125	3036
236	3080
256	3124
136	3234
156	3278
126	3343
359	4537
239	4602
259	4646
345	4681
347	4681
357	4708
457	4725
789	4736
234	4746
139	4756
237	4773
245	4790
159	4800
257	4817
348	4836
369	4844
358	4863
378	4863
129	4865
458	4880
478	4880
569	4888
134	4900
578	4907
137	4927
238	4928
145	4944
269	4953
157	4971
258	4972
278	4972
346	4988
124	5009
367	5015
456	5032
127	5036
567	5059
138	5082
246	5097
169	5107
267	5124
158	5126
178	5126
368	5170
128	5191
568	5214
678	5214
146	5251
167	5278
268	5279

168	5433
349	6510
379	6537
459	6554
479	6554
579	6581
249	6619
279	6646
389	6692
489	6709
589	6736
149	6773
247	6790
179	6800
289	6801
469	6861
679	6888
147	6944
248	6945
189	6955
467	7032
689	7043
148	7099
468	7187

Tabelle 33: Reihung der Variantenkombinationen aufsteigend nach Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen mit Berücksichtigung von Kosten

Beispiele zum Vergleich der Formeln zur Berechnung der durchschnittlichen Schrittzahl und der Schrittzahl bei durchschnittlicher Produktionsmenge

In den folgenden Beispielen sind mittels typischer Daten aus der Feuerfestindustrie Szenarien modelliert worden, um die Abweichungen in den Ergebnissen der unterschiedlichen Formeln testen. Formel 1 entspricht in diesem Fall der Formel zur Berechnung der durchschnittlichen Produktionsschritte (Formel 3 im Text) und Formel 2 gibt Formel 36 wieder, die die Anzahl an Schritten bei durchschnittlichen Produktionsmengen berechnet. Es sind Beispieldaten, so dass keine allgemein gültige Aussage über die Größe der Abweichungen gemacht werden kann. Jedoch kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse sich oft ähneln werden.

		Aufträge a_{ij}				
m_j	60000	120	100	80	F*K	1800
	50000	80	90	150		
	40000	100	85	120	W_i	
	30000	200	200	200	24100000	Variante 3
	20000	50	50	50	20900000	Variante 2
	1	2	3	22200000	Variante 1	
		Varianten i				

Ergebnis
bei Variantenkombination 123

Formel 1 68,3645022 Schritte
Formel 2 69 Schritte

Formel 1

$$\sum_{i=1}^n S^{\phi}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F * K} \right] * a_{ij} =$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F * K} \right] * a_{ij}$$

Formel 2

$$\sum_{i=1}^n S^*(n) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\frac{1}{a_i} * W_i}{F * K} \right]$$

$$W_i = \sum_{j=1}^k m_{ij} * a_{ij}$$

Beispiel 1: Berechnung der durchschnittlichen Schrittzahl bzw. der Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen für die Variantenkombination 123

		Aufträge a_{ij}						
m_j	60000	0	0	0		F*K	1800	
	50000	0	90	150				
	40000	100	0	120		W_i		
	30000	200	200	0		13900000	Variante 3	
	20000	100	150	80		13500000	Variante 2	
		1	2	3		12000000	Variante 1	
		Varianten i						
Ergebnis								
bei Variantenkombination 123								
Formel 1	57,424026	Schritte						
Formel 2	58	Schritte						
Formel 1	$\sum_{i=1}^n S^{\phi}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F * K} \right] * a_{ij} =$ $= \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F * K} \right] * a_{ij}$							
Formel 2	$\sum_{i=1}^n S^*(n) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\frac{1}{a_i} * W_i}{F * K} \right]$ $W_i = \sum_{j=1}^k m_{ij} * a_{ij}$							

Beispiel 2: Berechnung der durchschnittlichen Schrittzahl bzw. der Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen für die Variantenkombination 123

Beispiel 1 und Beispiel 2 unterscheiden sich durch die Anzahl an Aufträgen für Menge j der Varianten i (a_{ij}). Beim Beispiel 3 wurde wieder die Auftragslage von Beispiel 1 übernommen und diesmal mit einem anderen Fassungsvermögen und einer anderen Anzahl an Aggregaten gerechnet. Bei Beispiel 4 wurde auch F*K modifiziert und die a_{ij} von Beispiel 2 übernommen.

Die Abweichungen in der Schrittzahl bewegen sich im sehr geringen Prozentbereich (ca. 1%). Auch bei weiteren Versuchen wurden nur minimale Abweichungen festgestellt. Es kann aber Fälle geben, in denen eine größere Abweichung vorkommt.

		Aufträge a_{ij}				
m_j	60000	120	100	80	F*K	28
	50000	80	90	150		
	40000	100	85	120		
	30000	200	200	200		
	20000	50	50	50		
	1	2	3			
		Varianten i				
Ergebnis						
bei Variantenkombination 123						
Formel 1		4299,13182	Schritte			
Formel 2		4299	Schritte			
Formel 1	$\sum_{i=1}^n S^{\phi}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F * K} \right] * a_{ij} =$ $= \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_{ij}}{F * K} \right] * a_{ij}$					
Formel 2	$\sum_{i=1}^n S^*(n) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\frac{1}{a_i} * W_i}{F * K} \right]$ $W_i = \sum_{j=1}^k m_{ij} * a_{ij}$					

Beispiel 3: Berechnung der durchschnittlichen Schrittzahl bzw. der Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen für die Variantenkombination 123

		Aufträge a_{ij}				
m_j	60000	0	0	0	F*K	28
	50000	0	90	150		
	40000	100	0	120		
	30000	200	200	0		
	20000	100	150	80		
	1	2	3			
		Varianten i				
<p>Ergebnis bei Variantenkombination 123 Formel 1 3587,14091 Schritte Formel 2 3587 Schritte</p>						
[
Formel 1		$\sum_{i=1}^n S^{\phi}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^k a_{ij}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_j}{F * K} \right] * a_{ij} =$ $= \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_j}{F * K} \right] * a_{ij}$				
Formel 2		$\sum_{i=1}^n S^*(n) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1 * W_i}{F * K} \right]$ $W_i = \sum_{j=1}^k m_j * a_{ij}$				

Beispiel 4: Berechnung der durchschnittlichen Schrittzahl bzw. der Schrittzahl bei durchschnittlichen Produktionsmengen für die Variantenkombination 123