

Arbeitsbericht Nr. 1/2010

Hrsg.: Matthias Schumann

Stefan Friedemann / Matthias Schumann

Der Umgang mit Unsicherheit in der
Produktion bei der Nutzung von
nachwachsenden Rohstoffen – State of the
Art

Arbeitsbericht
des Instituts für Wirtschaftsinformatik
Professur für Anwendungssysteme und E-Business
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 5
37073 Göttingen

Working Paper
Institute of Information Systems
Chair of Application Systems and E-Business
University of Goettingen
Platz der Goettinger Sieben 5
37073 Goettingen, Germany

Tel. +49 (0) 551 / 39-4442
Fax +49 (0) 551 / 39-9735
www.as.wiwi.uni-goettingen.de
as@uni-goettingen.de



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 2.0 Germany License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/> or send a letter to Creative Commons, 543 Howard Street, 5th Floor, San Francisco, California, 94105, USA.

Abstract

The production planning with renewable resources faces several special problems compared to common planning methods with inputs which are “always available”. Due to their unsteadiness in growth, external influences like weather and natural resources and specific transport and storage requirements, renewable resources have some variances in quality as well as in quantity. This paper examines the suitability of common production planning methods, concepts and other approaches according to the uncertainty of renewable resources.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	5
2 Nachwachsende Rohstoffe	6
2.1 Arten und Klassifizierung	7
2.2 Verwendungsmöglichkeiten in der Industrie	11
2.3 Die Unsicherheit bei nachwachsenden Rohstoffen	15
3 Produktionsplanung unter Unsicherheit bezüglich der Menge	18
3.1 Klassische statistische Verfahren und Forecasting	18
3.2 Produktionsprogrammplanung	20
3.2.1 Produktionsplanungsstrategien	21
3.2.2 Lineare Optimierung	24
3.2.3 Nicht-lineare Optimierung	26
3.2.4 Dynamische Optimierung	27
3.2.5 Stochastische Optimierung	28
3.3 Fuzzy-Logik Ansätze	30
3.4 Pinch-Analyse	34
3.5 Lagerhaltung	36
3.6 Alternative und flexible Planung	37
4 Produktionsplanung unter Unsicherheit bezüglich der Qualität	40
4.1 Statistik	41
4.2 Lagerhaltung	41
4.3 Vor- oder Nacharbeit	42
5 Supply Chain Management als übergreifendes Konzept	43
6 Fazit	50
Literaturverzeichnis	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Ausgewählte Rohstoffe tierischen Ursprungs	8
Abbildung 2-2: Ausgewählte Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs	9
Abbildung 2-3: Klassifizierungsmöglichkeiten von nachwachsenden Rohstoffen.....	10
Abbildung 2-4: Häufig vorkommende Arten und Quellen von Unsicherheit und Risiko	16
Abbildung 2-5: Unterteilung von Supply Chain-Unsicherheiten	17
Abbildung 3-1: Vergleich der Produktionsplanungsstrategien	22
Abbildung 3-2: Gewinne der Produktionsplanungsstrategien ohne Strafe	23
Abbildung 3-3: Gewinne der Produktionsplanungsstrategien mit Strafe.....	23
Abbildung 3-4: Abbildung der Wahrscheinlichkeiten von Umweltzuständen als Fuzzy-Zahlen.....	32
Abbildung 3-5: Pinch-Analyse	34
Abbildung 3-6: Pinch-Analyse bei schwankendem Angebot.....	35
Abbildung 3-7: Alternative Planung bei Unsicherheit des Lieferzeitpunkts.....	38
Abbildung 3-8: Alternative Planung bei Unsicherheit der Liefermenge.....	39
Abbildung 3-9: Substitution von Rohstoffen	40
Abbildung 5-1: Beispiele für Meldungen im SCEM	44
Abbildung 5-2: Schematischer Ablauf des SCEM.....	45
Abbildung 5-3: Agentenbasiertes SCEM.....	48
Abbildung 6-1: Eignung und Nutzung der untersuchten Methoden (Quantität)	50
Abbildung 6-2: Eignung und Nutzung der untersuchten Methoden (Qualität)	51

Abkürzungsverzeichnis

Auto-ID	Automatic Identification (Automatische Identifikation)
CO2	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ERP	Enterprise Resource Planning
LSP	Logistics Service Provider
MRP	Material Requirements Planning
OR	Operations Research
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RFID	Radio Frequency Identification (Radiofrequenzidentifikation)
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
SCEM	Supply Chain Event Management

1 Einleitung

Die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in der produzierenden Industrie steigt aktuell stetig. Das Marktpotential ist jedoch noch lange nicht ausgeschöpft, da in den kommenden Jahren mit einem weiteren Wachstum des Einsatzes von nachwachsenden Rohstoffen zwischen bspw. 3% in der chemischen Industrie bis hin zu 80% bei Faserformteilen erwartet wird (vgl. Von Armansperg 2006; Müssig et al. 2006a). Vorteilhaft sind die langfristige Verfügbarkeit in ausreichenden Mengen sowie die gezielte Steuerbarkeit des Anbaus in Bezug auf Mengen und Eigenschaften der Rohstoffe. In vielen Fällen ist der Anbau sogar lokal oder regional möglich. Aus ökologischer Sicht sind die Vorteile von pflanzlichen Rohstoffen, dass sie sich bei der Verwertung im Gegensatz zu fossilen Rohstoffen CO₂-neutral verhalten und außerdem biologisch abbaubar sind (vgl. Minol & Sinemus 2004, S. 40).

Die Industrie setzt heutzutage bei der Energiegewinnung zu Großteilen auf die fossilen Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle. Bereits seit längerer Zeit ist abzusehen, dass die bekannten Erdölvorräte in 40-50 Jahren verbraucht sein werden (vgl. bmvit 2003, S. 2). Neue Quellen sind technisch und finanziell nur schwer zu erschließen. Auch diese Gründe bedingen aktuell ein intensives Interesse an nachwachsenden Rohstoffen. Jährlich entstehen ca. 170 Milliarden Tonnen an Biomasse, wovon nur 6 Milliarden Tonnen tatsächlich genutzt werden – das entspricht einem Anteil von 3,5%. Der Verbrauch an fossilen Brennstoffen liegt dagegen bei 7,3 Milliarden Tonnen. Diese Zahlen belegen, dass theoretisch der weltweite Energiebedarf aus natürlichen Rohstoffen gedeckt werden kann (vgl. ebenda). Die derzeitige Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen besteht vor allem aus Nahrungsmittelpflanzen, die durch chemisch-industrielle Verarbeitung einem anderen Zweck zugeführt werden. Beispiele hierfür sind Zuckerrohr, Mais, Weizen oder Zuckerrüben als Grundlage für Bio-Ethanol oder Raps im Biodiesel. Auch Holz gewinnt, vor allem aufgrund der Preissteigerungen für fossile Kraftstoffe, wieder an Bedeutung als Energieträger zur Wärmeerzeugung. Im Bereich tierischer Stoffe werden beispielsweise Felle, Leder, Fette oder Öle zur Produktion verwendet.

Für die Produktion bringen die nachwachsenden Rohstoffe aber auch umfangreiche Risiken mit sich: Vor allem die Qualität und die Menge der Lieferung ist nicht eindeutig bestimmbar und von zahlreichen äußeren Einflussfaktoren abhängig. Klimaschwankungen und Naturkatastrophen können im schlimmsten Fall zu Ernteaufschlägen führen, so dass die verarbeitende Industrie keine Rohstoffe geliefert bekommt. Insektenbefall kann Pflanzen beschädigen, so dass sie unbrauchbar werden oder nur zum Teil verwendet werden können. In einigen Fällen ist vielleicht auch eine Nachbearbeitung des Rohstoffs nötig, die Zeit in Anspruch nimmt und die Kosten erhöht. Zeitliche Verschiebungen der Lieferungen können durch das Wetter bedingt werden, wenn beispielsweise die geforderte Reife von Rohstoffen nicht planmäßig zum vereinbarten Zeitpunkt erreicht wird.

Unsicherheiten werden in den klassischen Produktionsplanungsverfahren in den Annahmen zumeist nur auf Absatzseite berücksichtigt (vgl. Tang 2006, S. 459; Petrovic et al. 1998, S. 301). Bei der Beschaffung wird von einem konstanten, stets verfügbaren Rohstoffstrom ausgegangen. Wie eben bereits angedeutet, ist dies bei der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen aber nicht zu

gewährleisten. Deshalb muss die Planung der Produktion mit Berücksichtigung der Unsicherheit mehrerer Faktoren erfolgen. In diesem Arbeitsbericht sollen wissenschaftliche und praktische Verfahren, Methoden und Ideen rund um die Produktionsplanung daraufhin untersucht werden, ob und wie diese Unsicherheiten berücksichtigt werden können und ob somit eine Eignung beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in der Produktion gegeben ist.

Auf eine genaue Unterscheidung von nachwachsenden Rohstoffen, deren Herkunft und Verwendung wird in Kapitel 2 eingegangen. Außerdem werden die Risikofaktoren näher erläutert und klassifiziert. In Kapitel 3 werden dann die Verfahren vorgestellt und auf ihre Eignung untersucht. Die Schwankungen der Qualität der gelieferten Rohstoffe und der Umgang mit dieser Unsicherheit ist Thema von Kapitel 4. Kapitel 5 hat Verfahren zur Kollaboration und Informationsweitergabe in der Supply Chain im Hinblick auf die Qualität und Quantität sowie zum Umgang mit diesen Informationen als Thema. Im letzten Kapitel wird ein Fazit gezogen und aus den gefundenen Vor- und Nachteilen Forschungsbedarfe aufgezeigt.

2 Nachwachsende Rohstoffe

Vor dem Beginn des Erdölzeitalters waren nachwachsende Rohstoffe die Grundlage für die Produktion von alltäglichen Dingen, da sie einfach und günstig verfügbar waren und bei Bedarf erneut angebaut werden konnten. Die verstärkte Nutzung von Erdöl und anderen fossilen Stoffen hat, vor allem im Bereich der energetischen Nutzung, zu einer Verdrängung der nachwachsenden Rohstoffe geführt (vgl. Müller-Sämann et al. 2002). Bedingt durch die hohen Ölpreise, das neu aufkommende Umweltbewusstsein und die Erkenntnis darüber, dass die fossilen Brennstoffe eines Tages erschöpft sein werden, erfahren die nachwachsenden Rohstoffe derzeit eine Renaissance vor allem bei der energetischen, aber auch bei der stofflichen Nutzung. Man sieht in ihnen eine langfristige, umweltverträgliche und somit nachhaltige Rohstoffbasis für die Zukunft.

Die nachwachsenden Rohstoffe sind eine Untergruppe der *natürlichen Rohstoffe*. Diese umfassen alle Ressourcen, welche von der Natur bereitgestellt werden (vgl. Siebert 1983, S. 2). Dabei sind nicht nur diejenigen Stoffe zu berücksichtigen, welche direkt oder indirekt der Produktion von Gütern zugeführt werden, sondern auch Konsumgüter wie Lebensmittel oder im umfassenderen Ansatz auch Sauerstoff und Wasser. Der Begriff der *nachwachsenden Rohstoffe* umfasst alle biogenen Stoffe, welche in natürlichen Systemen regeneriert werden (vgl. Siebert 1983, S. 110; Leible et al. 2001). Hauptunterscheidungsmerkmal gegenüber anderen natürlichen Rohstoffen ist damit die Erneuerung, wohingegen fossile und mineralische Stoffe in der Natur nicht wieder erzeugt werden können und nach der Nutzung einer Erschöpfung unterliegen. Typischerweise sind nicht nachwachsende Rohstoffe durch geologische oder astronomische Prozesse entstanden. Leible et al. (2001) grenzen den Begriff dahingehend ein, dass die Stoffe nicht als Nahrungs- oder Futtermittel genutzt werden. Diesem Verständnis folgend wird im weiteren Verlauf des Arbeitsberichts folgende Definition genutzt (vgl. auch FNR 2009a):

Definition: Nachwachsende Rohstoffe

Nachwachsende Rohstoffe sind alle in der Natur vorkommenden organischen Ressourcen, welche durch natürliche Prozesse regeneriert werden. Sie erneuern sich somit selbstständig oder können durch Forst- und Landwirtschaft erzeugt werden. Es erfolgt eine zielgerichtete industrielle Nutzung außerhalb des Nahrungsmittelbereichs.

Die nachwachsenden Rohstoffe können bei der industriellen Nutzung sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden. Je nach Nutzungsabsicht werden unterschiedliche Bedingungen an die Rohstoffe gestellt und es entstehen verschiedene Informationsbedarfe hinsichtlich Genauigkeit und Aktualität der Daten. Die Definitionen für die beiden Nutzungsarten werden im Folgenden dargestellt.

Definition: Stoffliche Nutzung

Bei der stofflichen Nutzung in der Produktion wird auf den gesamten Rohstoff oder auf einzelne Bestandteile abgezielt, um diese in anderen Produkten weiterzuverarbeiten.

Definition: Energetische Nutzung

Die energetische Nutzung zielt auf die Gewinnung von Wärme oder Energie aus den nachwachsenden Rohstoffen ab.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Arten von nachwachsenden Rohstoffen näher erläutert und Klassifizierungsmöglichkeiten vorgestellt. Anschließend wird auf die Verwendung von diesen Rohstoffen in der produzierenden Industrie und die Unsicherheit, welche die Rohstoffe mit sich bringen, eingegangen.

2.1 Arten und Klassifizierung

Grundsätzlich können nachwachsende Rohstoffe tierischen oder pflanzlichen Ursprungs sein. Eine Übersicht ausgewählter Arten an tierischen Rohstoffen sowie der Quelle und der industriellen Verwendungsmöglichkeit ist in Abbildung 2-1 dargestellt (in Anlehnung an Peters 2007). Viele dieser Rohstoffe werden schon seit vielen Jahrhunderten genutzt, einige erschließen sich erst mit heutigen Produktionsverfahren einer neuen Verwendung. So kann beispielsweise mit heutigen Produktionsverfahren Biokunststoff aus den Chitinpanzern von Meerestieren, aus Gelatine oder aus Keratin, welches beispielsweise in Hühnerfedern vorkommt, gewonnen werden. Viele Rohstoffe können auch noch weiter zerlegt werden und dann wiederum anderen Anwendungen zugeführt werden – auf diese detaillierte Darstellung soll an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen werden. Oftmals

handelt es sich bei den Rohstoffen um Abfall- oder Koppelprodukte, die typischerweise in der Nahrungsmittelproduktion anfallen. Auf die Nutzung von Tieren als Nahrungsmittel soll an dieser Stelle ebenfalls nicht eingegangen werden, da dies für die weiteren Betrachtungen der produzierenden Industrie nicht relevant ist.

Art des Rohstoffs	Ursprung	Verwendung
Insulin	Schwein, Rind	Pharmazie/Medizin
Hormone	Schwein, Rind	
Leder	Rind	Textilindustrie
Seide	Seidenraupe	
Felle	Fuchs, Nerz	
Borsten	Schwein	
Wolle	Schaf, Alpakas	
Federn	Huhn, Vogel	
Wachse	Biene, Wal	
Fette	Schwein, Fisch, Gans, Rind	
Öle	Schwein, Fisch, Gans, Rind	
Talg	Rind, Hammel	
Gelatine	Schwein, Rind	
Karmin (Purpur)	Purpurschnecke	
Biokunststoffe	Chitin, Keratin (Federn)	Verpackungsindustrie
Dünger	Mist, Gülle, Guano	Agrarindustrie
Tiermehl	Verschiedene Tiere	

Abbildung 2-1: Ausgewählte Rohstoffe tierischen Ursprungs

Weitaus mehr genutzt werden aber Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs. Abbildung 2-2 listet die wichtigsten Arten für diese auf (in Anlehnung an Peters 2007). Auch in dieser Darstellung wurde bewusst auf die Verwendung von Pflanzen als Nahrungsgrundlage verzichtet. Biokunststoffe wurden aufgrund der Wichtigkeit und der erwarteten positiven Marktentwicklung in Zukunft als eigener Verwendungsbereich aufgeführt und nicht in die Chemie eingruppiert.

Art des Rohstoffs	Ursprung	Verwendung
Holz	Rattan, Fichte, Kiefer, Teak, Mahagoni, Bambus	Bau, Möbelindustrie
Gräser und Stroh	Schilf (Reet), Acker- und Wiesengras, Stroh	Verpackungsindustrie ^a , Energiegewinnung, Bau ^b
Fasern	Kokos, Hanf, Gras, Schilf, Flachs (Lein), Baumwolle, Jute, Sisal, Kenaf	Bau ^b , Möbel-, Papier-, Textilindustrie
Fette	Soja, Raps, Sonnenblume, Olive	Chemische Industrie
Gerbstoffe	Walnussblätter, Eichenrinde, Galläpfel	
Gummi (Kautschuk/Latex)	Kautschukbaum	
Öle	Soja, Sonnenblume, Raps, Ölpalme, Flachs (Leinsamen), Wunderbaum (Rizinusöl)	
Pflanzenfarbstoff	Färberwaid, Färberkrapp, Färberwau, Indigo	
Stärke	Mais, Weizen, Kartoffeln, Maniok	
Tenside	Kokosöl, Palmöl	
Wachse	Zuckerrohr, Carnauba, Jojoba	
Holzpellets, Hackschnitzel	Alle Hölzer und Bäume, oft Weiden und Pappeln	
Bioethanol	Zuckerrohr, Mais, Weizen, Zuckerrüben	
Biokraftstoff	Raps, Soja, Ölpalme	
Genussmittelpflanzen	Tabak, Hopfen	Genussmittelindustrie
Arzneipflanze	Salbei, Holunder, Kamille, Wermut, Kümmel, Kürbiskern, Ingwer	Pharmazie/Medizin
Wolle	Holzwohle, Baumwolle	Textilindustrie, Bau ^a
Cellulose	Hart- und Weichholz, Baumwolle	Verpackungsindustrie, Papierindustrie
Biopolymere	Lignin, Chitin, Casein, Gelatine, Rizinusöl	Verpackungsindustrie ^b
Polyhydroxyalkanoate	Zucker (insb. Zuckerrohr)	

a: Die Rohstoffe werden im Bau unter anderem zur Dämmung oder Dachdeckung eingesetzt.

b: Diese Rohstoffe werden in der Verpackungsindustrie als Grundlage für biologisch abbaubare, CO₂-neutrale Verpackungen genutzt. In diesem Zusammenhang wird oft der Begriff „Biokunststoffe“ verwendet.

Abbildung 2-2: Ausgewählte Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs

Viele der aufgeführten Rohstoffe werden mittlerweile gezielt für die Nutzung in der Industrie angebaut, wie dies z. B. bei Kurzumtriebsplantagen der Fall ist. Auf diesen Plantagen werden schnell wachsende Bäume wie Weiden oder Pappeln mit dem Ziel der Nutzung als Energiepflanze angebaut. Zunehmend gewinnen aber auch Abfall- und Koppelprodukte an Bedeutung. So können bspw. Faserpflanzen durch Entholzung in die eigentliche Faser und Schäben (holzartige Reste) getrennt werden, welche dann energetisch genutzt werden können. Des Weiteren kann beispielsweise auch die aus Verschnittholz erzeugte Energie und Wärme in Holzverbrennungskraftwerken als Koppelprodukt angesehen werden. In diesem Zusammenhang wird häufig auch von der *mehrstufigen Nutzung* gesprochen: Ein nachwachsender Rohstoff wird erst stofflich genutzt und am Ende des Produktlebenszyklus, also mit dem Recycling, der energetischen Nutzung in Verbrennungskraftwerken zugeführt.

Klassifizierungsmerkmal		Klassen			
Ursprung	Tier		Pflanze		
Verwendung	Energetisch		Stofflich		
Herkunft	Planmäßig produziert	Abfallprodukt		Koppelprodukt	
Nutzende Industrie	Bau	Chemie	Energie- und Wärmeezeugung	Genussmittel	Möbel
	Papier	Pharmazie/ Medizin	Textil	Verpackung	Weitere
Rohstoffart	Arzneipflanze	Bioethanol	Biokraftstoff	Biopolymere	Cellulose
	Fasern	Fette	Genussmittelpflanzen	Gerbstoffe	Gräser und Stroh
	Gummi	Holz	Holzpellets, Hackschnitzel	Öle	Pflanzenfarbstoff
	Polyhydroxyalkanoate	Stärke	Tenside	Wachse	Wolle

Abbildung 2-3: Klassifizierungsmöglichkeiten von nachwachsenden Rohstoffen

Manche Rohstoffe, wie z. B. Soja, Mais oder Raps, können für mehrere Zwecke verwendet werden. Dadurch entsteht eine neuartige Konkurrenz in der Nutzung der nachwachsenden Rohstoffe. Insbesondere bei einer Verwendung als Nahrungspflanze oder als Energiepflanze entstehen so neue sozioökonomische Fragestellungen. Eine oft diskutierte Frage in diesem Zusammenhang ist beispielsweise: Sollte Getreide für die Energieerzeugung genutzt werden oder wie bisher lediglich zur Nahrungsmittelproduktion eingesetzt werden? Aus Sicht von Umweltverbänden besteht die Gefahr von Monokulturen, eine Konkurrenz der Anbauflächen zu Naturschutzflächen sowie die Abholzung von tropischen Wäldern zur Gewinnung neuer Nutzflächen. Diese Punkte sollen darauf hindeuten, dass

auch nachwachsende Rohstoffe nicht nur Vorteile mit sich bringen. Eine weitere Diskussion der Vor- oder Nachteile von nachwachsenden Rohstoffen soll an dieser Stelle aber nicht erfolgen.

Weitere Klassifizierungsmöglichkeiten bestehen aus der Herkunft der Rohstoffe oder ihrer Verwendung (vgl. Müller-Sämann et al. 2002, S. 2). Bei der Herkunft lassen sich, wie weiter oben bereits erwähnt, die planmäßige Herstellung des Rohstoffes für den Produktionszweck sowie die Herkunft aus Abfall- und Koppelprodukten unterscheiden. Bei der Verwendung ist die energetische und stoffliche Nutzung zu differenzieren. Eine Unterscheidung kann auch, wie in Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2, nach dem verwendenden Industriezweig oder dem Ursprung der Rohstoffart geschehen. Eine Kombination der Merkmale kann durchgängig erfolgen, so können beispielsweise die pflanzlichen Rohstoffe auch weiter nach energetischer und stofflicher Nutzung differenziert werden. Die Zuordnungen zu den Klassen sind nicht immer überschneidungsfrei, da Rohstoffe oftmals für mehrere Zwecke genutzt werden können. Die verschiedenen Klassifizierungen sind in Abbildung 2-3 zusammengefasst.

2.2 Verwendungsmöglichkeiten in der Industrie

Insbesondere in der chemischen Industrie werden nachwachsende Rohstoffe seit langer Zeit verwendet. Vor allem Farbstoffe, Öle, Fette und Wachse werden schon seit Jahrhunderten aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen. Auch in der modernen Chemie spielen sie eine wichtige Rolle. Deutsche Chemieunternehmen sind mit einem Anteil nachwachsender Rohstoffe von circa 10% des Rohstoffeinsatzes weltweit führend (vgl. von Armansperg 2006, S. 269). Schmierstoffe werden hauptsächlich aus Ölpflanzen wie Raps, Soja, Palm oder Sonnenblumen gewonnen, aus tierischer Herkunft wird vor allem Rindertalg verarbeitet (vgl. Lenz & Weber 2006, S. 243). Für das Jahr 2004 wurde das Marktpotenzial für biogene Schmierstoffe innerhalb der Europäischen Union nur zu 0,1% ausgeschöpft (vgl. ebenda). Da die Stoffe auf Basis natürlicher Rohstoffe gewonnen werden, sind sie biologisch schnell abbaubar. Eine neuere Entwicklung zielt auf die Produktion von Biokunststoffen ab, bei der Biopolymere (z. B. Stärke, Cellulose, Gluten, Riziniusöl), Polymilchsäure, Polyhydroxyalkanoate und Polyhydroxyfettsäuren als Grundlage der Herstellung von Plastik aus Pflanzen gewonnen werden (vgl. Müller-Wondorf 2009; Peters 2007, S. 19). Polyhydroxyfettsäuren sind biologisch abbaubare Polyester (vgl. Jung & Steinbuchel 2001, S. 250). Vorteilig ist neben der biologischen Abbaubarkeit auch die Wiederverwertbarkeit am Ende des Produktlebenszyklus, indem beispielsweise Verpackungsmaterial einer energetischen Nachnutzung zugeführt wird. Dabei kommt es zu einer CO₂-neutralen Verwertung der Biokunststoffe (vgl. Peters 2007, S. 19). Müssig et al. betonen auch die Marketingwirkung, da Verbraucher nachwachsenden Rohstoffen positiv gegenüberstehen und durch gezielte Informationen über die ökologischen Vorteile von solchen Produktverpackungen eine hohe Kundenakzeptanz erreicht werden kann (2006b, S. 418). Beim Einsatz von Biokunststoffen in der Agrarwirtschaft, z. B. als Abdeckfolien für Felder, bei Pflanztöpfen oder Mulchfolien kann eine Substitution von petrochemisch hergestellten Produkten erfolgen. Dies birgt unter anderem den Vorteil, dass die Verpackung aufgrund der biologischen Abbaubarkeit direkt vor Ort kompostiert werden kann und somit keine Entsorgungskosten anfallen sowie gesetzliche Vorgaben der Verpackungsverordnung einfacher erreicht werden können (vgl. Müssig et al. 2006b, S. 415 - 417). Ebenso sind mittlerweile

marktreife Schrumpffolien für diverse Verpackungen verfügbar, wie sie beispielsweise bei der Bündelung von PET-Flaschen eingesetzt werden. In ersten Tests werden die Biokunststoffe auch schon in der Automobilproduktion und in der Bautechnik eingesetzt (vgl. Müller-Wondorf 2009). Biologisch abbaubare Strukturpolymere und Werkstoffe, eine Unterart von Biopolymeren, erreichten im Jahr 2003 lediglich einen Anteil von 0,1% am europäischen Gesamtmarkt und haben damit auch ein hohes Wachstumspotenzial (vgl. Von Armansperg 2006, S. 295). Einige Pflanzen werden speziell gezüchtet oder gentechnisch so bearbeitet, dass sie die benötigten Stoffe speichern oder in größerer Menge produzieren. Tenside werden etwa zur Hälfte aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen (vgl. Fabry 2004, S. 216). Auch im Bereich von Ölen und Fetten gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten, um neue Synthesen zu finden (vgl. Biermann et al. 2000). Durch die Entwicklung im Bereich der Gentechnik ist es bei Ölpflanzen bereits heute möglich, die Pflanzen speziell im Hinblick auf die gewünschten Öle zu züchten (vgl. Minol & Sinemus 2004, S. 40). So können störende Begleitstoffe eliminiert und der Anteil des gewünschten Rohstoffes innerhalb der Pflanze erhöht werden. In Zukunft soll die Forschung und Anwendung auf weitere Pflanzen und Rohstoffarten, vor allem Stärke, Zucker und Cellulose, ausgedehnt werden. Mittelfristig wird vor allem der Einsatz in umweltsensiblen Bereichen, z. B. bei Wasch- und Reinigungsmitteln, und im Bau aufgrund der biologischen Abbaubarkeit und den Vorteilen gegenüber petrochemisch hergestellten Rohstoffen im Bezug auf Schadstoffe eine Steigerung erfahren (vgl. Müller-Sämann et al. 2002, S. 20). Das Marktpotential nachwachsender Rohstoffe wird z. B. bei kohlenwasserstoffbasierten Lösungsmitteln auf 12-13% geschätzt, von dem heute nur 1,5% genutzt werden (vgl. ebenda, S. 21). Für das Jahr 2015 wird Chemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen ein Marktwert von fünf Milliarden US-Dollar vorhergesagt (vgl. Frost & Sullivan 2009).

Holz wird in verschiedenen Industriezweigen benötigt und ist aufgrund seiner Eigenschaften ein vielseitig verwendbarer Rohstoff. Der Verwertungsprozess beim Holz ist typischerweise zweistufig aufgebaut, da im ersten Schritt das Schnittholz von Sägewerken oder ähnlichen Vorarbeitern bearbeitet und erst im zweiten Schritt der verwertenden Industrie zugeführt wird (vgl. Cescutti et al. 2006, S. 513 - 514). In diesem zweiten Schritt wird circa die Hälfte des deutschlandweit verfügbaren Holz der Papier- und Zellstoffindustrie zugeführt. Die andere Hälfte wird von der Holzverarbeitenden Industrie, wie z. B. der Möbel- und Bauindustrie, benötigt (vgl. Peters 2007, S. 25). Die Einsatzmöglichkeiten von Holz sind zu vielseitig, um sie an dieser Stelle erschöpfend ausführen zu können. Deshalb sollen exemplarisch die nach Produktionswert wichtigsten Produkte des Baugewerbes aufgeführt werden: Dies sind MDF- und Spanplatten sowie komplette Holzhäuser, die mit weitem Abstand vor Fenstern, Türen, einzelnen Leimbauteilen und Treppen rangieren (vgl. Cescutti et al. 2006, S. 510). Die Möbelindustrie arbeitet größtenteils mit Holz und stellt deshalb sowohl mengen- als auch wertbezogen einen sehr großen Abnehmer dar (vgl. ebenda, S. 550 - 551). Eine Besonderheit bei der Arbeit mit Holz ist, dass viele Abfallprodukte wie Späne und Verschnitt anfallen, die wiederum in Heizkraftwerken verwendet werden können. Das produzierende Gewerbe und der Bau nutzen neben Holz vor allem Gummi aus nachwachsenden Ressourcen. Viele der bereits erwähnten chemischen Produkte kommen auch im Bau zum Einsatz, z. B. Lösungsmittel, Lacke, Klebstoffe, Linoleum, Öle und Fette, und können auch hier aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden.

Ein weiterer Industriezweig, in dem die nachwachsenden Ressourcen momentan einen Boom erleben, ist die Energie- und Wärmeerzeugung. Den größten Anteil bei der Stromerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen hat dabei das Biogas mit circa 68% (vgl. Hofmann et al. 2006, S. 13). Biogas ist ein „Wasserdampf-gesättigtes Mischgas, das unter anaeroben Bedingungen bei biologischen Abbau organischen Materials entsteht“, also durch die Vergärung von Biomasse in sogenannten Biomassekraftwerken (ebenda, S. 42). Der eigentliche Energieträger im Biogas ist das Methan. Neben der Verwertung von tierischen Abfällen wie Mist und Gülle werden vor allem Pflanzen wie Soja, Raps, Gras, Sonnenblumen oder Mais und Holz sowie Holzreste in diesen Kraftwerken genutzt (vgl. Müller-Langer et al. 2006, S. 181). Sogenannte Energiepflanzen, die planmäßig für die Energieproduktion angebaut werden, haben aufgrund einer noch zu geringen Wettbewerbsfähigkeit mit fossilen Brennstoffen eine geringe Verbreitung (vgl. Müller-Sämann et al. 2002, S. 15). In Zukunft wird sich dies aber ändern, ebenso wird eine systematische und nachhaltige Erschließung der Waldholzressourcen erwartet (vgl. Hofmann et al. 2006, S. 13 - 14). Ein hohes, aktuell wenig genutztes Potential besteht im Bereich der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen. In den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten soll den Rohstoffen aus Biomasse die bedeutendste Rolle unter den regenerativen Energieträgern zukommen (vgl. Leible et al. 2001, nach Müller-Sämann et al. 2002, S. 16). Als erstes Bioenergiedorf in Deutschland hat die Gemeinde Jühnde im Landkreis Göttingen in Zusammenarbeit mit der Universität Göttingen eine Biogasanlage zur Strom- und Wärmeerzeugung gebaut. Die örtlichen Landwirte liefern die benötigte Biomasse, die Wärme wird an die Haushalte über ein Nahwärmenetz verteilt. Neben durchschnittlichen Einsparungen von 750 Euro pro Jahr und Haushalt konnten so Arbeitsplätze geschaffen bzw. gesichert werden. Außerdem erreichte man eine Unabhängigkeit gegenüber Versorgern und internationalen Märkten. Allerdings ist ein Betrieb dieser Anlage ohne Subventionen zum aktuellen Zeitpunkt noch unwirtschaftlich, so dass aus ökonomischer Sicht weiterer Handlungsbedarf besteht. Mittlerweile existieren zahlreiche weitere solcher Dörfer und viele Orte führen Machbarkeitsstudien durch (vgl. für das Thema Bioenergiedörfer Ruppert et al. 2008 und Projektgruppe Bioenergiedörfer 2007). Für die Umsetzung in Gemeinden und einzelnen Regionen sprechen vor allem die kurzen Transportwege sowie das Platzangebot zum Anbau der benötigten pflanzlichen Rohstoffe auf dem Land (vgl. Deimling & Kaltschmitt (2000), nach Müller-Sämann et al. 2002, S. 16). Die kurzen Transportwege, die bewährten Anbauverfahren und die Wiedernutzung der Gärreste als Düngemittel sowie die klimaneutrale Verbrennung sind die Hauptgründe für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen zur Energieerzeugung auf regionaler Ebene (vgl. Hofmann et al. 2006, S. 44 - 45). Aber nicht nur im regionalen Rahmen werden Biomassekraftwerke gebaut, sondern auch für große Unternehmen werden Biomassekraftwerke interessant. So engagieren sich große Konzerne in der Forschung und Entwicklung sowie in der Realisierung von diesen Kraftwerken (vgl. z. B. Evonik Industries o.J.). Kurzfristig könnten 5% der fossilen Energieträger durch Biomasse aus nachwachsenden Rohstoffen ersetzt werden, langfristig wird sich dieser Anteil noch stark erhöhen lassen (vgl. FNR 2002, S. 10).

Bei der Wärmeerzeugung kommen hauptsächlich Holzpellets, Stroh, Hackgut und Stückholz zum Einsatz (vgl. Kalies et al. 2006). Es werden größtenteils Neben- und Abfallprodukte genutzt, ein

Einschlag von Waldholz findet nur in geringem Ausmaß statt. Auch hier wird der Bedarf aufgrund der Transportkosten und kürzeren Wege hauptsächlich aus regionalen Quellen gedeckt.

Der Anteil von Biokraftstoffen am gesamten deutschen Kraftstoffverbrauch lag 2004 noch bei 2%, steigerte sich für das Jahr 2007 aber auf 7,2% und sank im Jahr 2008 auf 6,1% (vgl. Müller-Langer et al. 2006, S. 163; FNR 2009b). Den größten Anteil machte hierbei der Biodiesel aus, gefolgt von Bioethanol und Pflanzenöl. Biogas wird bisher nur in Einzelfällen als Treibstoff genutzt, die überwiegende Nutzung erfolgt im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung (vgl. Müller-Langer et al. 2006, S. 181). Biodiesel wird größtenteils aus Raps- oder Sonnenblumenöl hergestellt, da diese Verfahren steuerlich begünstigt werden. Die Alkohole Ethanol und Methanol, welche in Benzinmotoren bzw. Brennstoffzellen zum Einsatz kommen können, werden überwiegend aus Getreide sowie Stärke- und Zuckerpflanzen gewonnen. Durch die erlaubte Beimischung von bis zu 5% Bioethanol in konventionellen Ottokraftstoff kam es in den letzten Jahren zu einer verstärkten Nachfrage. Das weitere Entwicklungspotenzial hängt stark von politischen Entscheidungen wie der steuerlichen Begünstigung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz ab, da die deutsche Landwirtschaft in der Produktion von Biokraftstoffen nur aufgrund dieser Förderung konkurrenzfähig ist (vgl. ebenda, S. 163 - 164).

In der Textilindustrie werden vor allem Baumwolle, Schafwolle und Flachs benötigt (vgl. hier und im Folgenden Hoffmeister et al. 2006, S. 469 - 471). Aber auch Schlachtnebenprodukte wie Federn, Borsten, Leder und Felle werden verarbeitet. Zudem können pflanzliche Fasern wie Flachs, Hanf, Kokos oder Jute genutzt werden, um daraus Naturfaserverbund-Halbzeug oder naturfaserverstärkte Kunststoffe herzustellen (vgl. Peters 2007, S. 20). Außerdem können aus Holz cellulosische Fasern gewonnen werden, allerdings fehlen am deutschen Markt dafür die Verarbeitungsanlagen. All diese sogenannten „technischen Textilien“ werden nicht nur in der Textilindustrie, sondern beispielsweise auch im Fahrzeugbau, der Sportartikelindustrie, bei Bodenplatten oder Outdoormöbeln benötigt (vgl. Bauer 2006, S. 109; Honsel 2009, S. 72). Im Fahrzeugbau nutzen beispielsweise Ford und Mercedes-Benz naturfaserverstärkte Werkstoffe für Türinnenverkleidungen, Hutablagen, Unterbodenschutz oder Kofferraumauskleidungen einzelner Modelle (vgl. Peters 2007, S. 20). In der aktuellen Mercedes S-Klasse sind 32 Teile mit insgesamt 43 Kilo Naturfaserverstärkten Kunststoffen verbaut, wodurch gegenüber der Kombination Plastik und Leder oder Textilien durch einfachere Verarbeitung Kosten eingespart werden konnten (vgl. Honsel 2009, S. 73; DaimlerChrysler Communications 2008, S. 34 - 36). Nachteilig wirkt dabei allerdings, dass die Rohstoffe zwar prinzipiell biologisch abbaubar sind, dafür allerdings im Recycling erst wieder vom restlichen Fahrzeug getrennt werden müssen, was wiederum zu einer Kostenerhöhung an dieser Stelle führt. Naturfaserverstärkte Kunststoffe als Spritzgussgranulat können für viele Verpackungs- und Kunststoffprodukte genutzt werden und sind mittlerweile in einem marktfähigen Produktstatus angekommen (vgl. Honsel 2009, S. 72 - 73). Pflanzliche Fasern können ebenso in Vliesen, Filzen und Nadelfilzen als Grundwerkstoff für andere Industriezweige genutzt werden (vgl. Müller-Sämann et al. 2002, S. 26).

Auch die pharmazeutische Industrie und Medizin nutzt seit vielen Jahrhunderten Heilpflanzen zur Extraktion von Wirkstoffen. In Deutschland sind rund 100 Sorten pflanzlicher Arzneimittel, sogenannten Phytopharmaka, anbaufähig (vgl. Schmitz et al. 2006, S. 343). Dominierend sind dabei die Pflanzen

Pfefferminze, Kamille, Baldrian, Fenchel, Johanniskraut und Mariendistel. Neben der medizinischen Nutzung ist insbesondere das „Health Food“ von wachsender Bedeutung, weitere Einatzmöglichkeiten ergeben sich in der pharmazeutischen Kosmetik sowie in der Veterinärmedizin (vgl. ebenda, S. 345). Wirkstoffe wie Insuline konnten früher nur aus tierischen Stoffen extrahiert werden, wegen diverser Nachteile dieses Verfahrens werden sie heute allerdings zumeist künstlich hergestellt. Ebenso werden Hormone heutzutage nur noch selten aus tierischen oder pflanzlichen Rohstoffen gewonnen.

2.3 Die Unsicherheit bei nachwachsenden Rohstoffen

Heutzutage sehen sich Supply Chains aufgrund der steigenden Komplexität und Internationalität der Produkte und damit einhergehend einer höheren Anzahl an beteiligten Partnern einer veränderten Risikosituation gegenüber als noch in den letzten Jahrzehnten (vgl. Pujawan & Geraldin 2009; Cucchiella & Gastaldi 2006, S. 702). Gleichzeitig führt diese Entwicklung auch dazu, dass alle Partner der Supply Chain das Risiko tragen müssen, so dass eine Zusammenarbeit zur Minimierung der Risiken erforderlich wird. Beispielsweise tragen alle SC-Partner das Risiko von Minderlieferungen, welche einen Produktionsausfall verursachen können oder das Problem vom originären Entstehungsort auf die nachfolgenden Stationen übertragen (vgl. Petrovic et al. 1998, S. 301). Wenn der erste Produzent einer Kette zu wenig Rohstoffe geliefert bekommt, so betrifft dessen geringere Produktionsanzahl auch die nachfolgenden weiterverarbeitenden Stationen. Im Bereich des Material Requirements Planning (MRP) spricht Ho (1989) durch die eben aufgeführten Unsicherheiten von der „MRP system nervousness“, welche sich in der Unterbrechung der Produktion von Aufträgen offenbart. Diese Eskalation des Problems verstärkt es und macht die Handhabung schwieriger und zugleich auch noch wichtiger.

Grundsätzlich wird der Begriff der Unsicherheit in klassischen Lehrbüchern der Entscheidungstheorie oder des Operations Research vom Begriff des Risikos abgegrenzt. Die Unsicherheit, oft auch Ungewissheit genannt, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von zukünftigen Umweltzuständen nicht bekannt sind. Dies ist beispielsweise bei der Neueinführung von Produkten, bei denen keine Eintrittswahrscheinlichkeiten für deren Erfolg geschätzt werden können, der Fall (vgl. Rommelfanger & Eickemeier 2002, S. 49). Unter Risiko hingegen können Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Umweltzustände geschätzt werden (subjektive Wahrscheinlichkeit) oder sind aufgrund von Erfahrungswerten bekannt (objektive Wahrscheinlichkeit). Typische Beispiele dafür sind Glücksspiele, bei denen die Wahrscheinlichkeit durch Kombinatorik berechnet werden kann, oder Versicherungen, bei denen die Schadenswahrscheinlichkeit aufgrund historischer Daten geschätzt werden kann.

In Abbildung 2-4 sind verschiedene Arten und Quellen von Abweichungen aufgeführt. Außerdem wird versucht, die Einteilung in Risiko oder Unsicherheit aus entscheidungstheoretischer Sichtweise vorzunehmen, wobei dies nicht immer überschneidungsfrei möglich ist. Selten auftretende Aspekte wie ein Totalausfall der Ernte aufgrund von Umweltkatastrophen sind beispielsweise schlecht abzuschätzen, während die Auswirkungen des Wetters auf die Rohstoffeigenschaften durchgehend

beobachtbar und somit relativ gut abschätzbar sind. Aufgrund des Klimawandels wird in Zukunft mit verstärkten Problemen durch das Wetter zu rechnen sein. Dabei wirken sich diese Beeinflussungen nicht nur direkt auf die Lieferbarkeit der Rohstoffe aus, sondern auch auf die Transportwege und Infrastruktur (vgl. Nöthinger & Caluori 2009, S. 16). Über die Risikoquellen liegen im Normalfall historische Erfahrungen vor, so dass Ausfall- und Schwundzahlen sowie Mengenausfälle in Form von stochastischen Variablen prognostiziert werden können. Die Unsicherheit betrifft die eben genannten, nicht vorhersagbaren Ereignisse, wie Naturkatastrophen oder komplette Ernteauffälle. Durch das plötzliche Auftreten dieser Ereignisse und den fehlenden Sicherheitsmaßnahmen aufgrund der Unberechenbarkeit haben diese starke Auswirkungen auf die Produktion. Bei einem Totalausfall der Lieferung kann die Produktion zum Stillstand kommen oder es müssen Substitute beschafft werden, die im Normalfall nur mit höheren Kosten zu beziehen sind. Zwar kann für alle Vorfälle ein statistischer Schätzer herangezogen werden, um eine Betrachtung unter Risiko zu erzeugen, allerdings ist dieser Schätzer selbst wiederum mit Unsicherheit behaftet. Deshalb erscheint es bei manchen Arten der Unsicherheit sinnvoller, von „vollkommener Unsicherheit“ auszugehen.

	Unsicherheit	Risiko
Qualität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschädigung durch Schädlingsbefall ▪ Beschädigung durch Unwetter, Naturkatastrophen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Veränderte Eigenschaften aufgrund der Wettersituation (z. B. Reifegrad) ▪ Materialfehler (z. B. bei Leder) ▪ Natürliche Qualitätseinbußen (Vertrocknung oder Schrumpfung) während der Lagerung
Quantität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausfall durch Unwetter, Naturkatastrophen ▪ Ausfall durch Schädlingsbefall 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wachstumsschwankungen aufgrund der Wettersituation ▪ Größenunterschiede bei tierischen Fellen ▪ Natürlicher Schwund durch Verderb oder Verdunstung

Abbildung 2-4: Häufig vorkommende Arten und Quellen von Unsicherheit und Risiko

Bei wissenschaftlichen Betrachtungen des Supply Chain Managements wird diese Unterscheidung nicht immer aufgegriffen. So definieren Sinha et al. das Risiko in Supply Chains als eine Funktion des Ausmaßes an Unsicherheit und die Auswirkungen eines Ereignisses (2004, S. 155). Ein Risiko besteht demnach also nur, wenn aus unsicheren Umständen heraus auch ein Schaden entstehen kann. Diese Ansicht wird auch von Zsidisin geteilt (2003, S. 14), welcher insbesondere die „Supply risks“ als Vorfall definiert, bei dem durch Fehler des Zulieferers oder Marktes die Angebotsnachfrage beim produzierenden Unternehmen nicht befriedigt werden kann. Somit stehen Unsicherheiten beim Zulieferer oder beim Markt im direkten Zusammenhang mit einer Wirkung - nämlich Kosten oder Umsatzausfällen. Tang unterscheidet operationale Risiken und Störungsrisiken (2006, S. 453). Erstere beinhalten dabei Unsicherheiten bezüglich Kundennachfrage, Lieferantangebot und Kosten. Störungsrisiken sind hingegen außerhalb des Einflusses der Unternehmen in der Supply Chain, bspw.

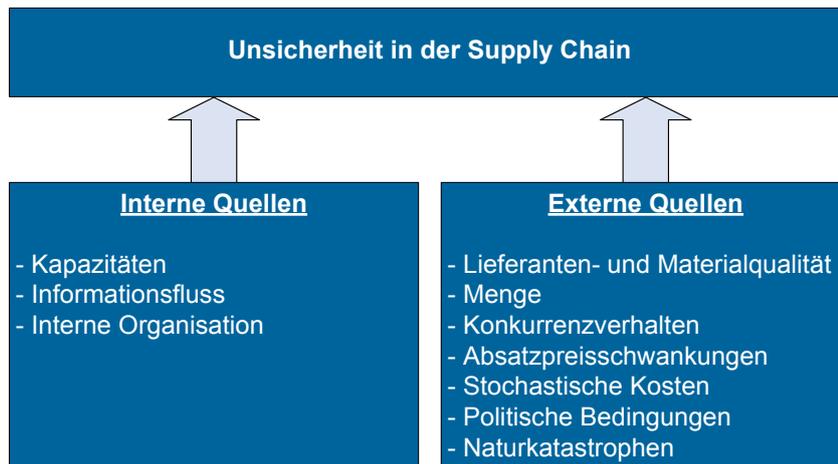


Abbildung 2-5: Unterteilung von Supply Chain-Unsicherheiten

Naturkatastrophen, Streiks oder Wirtschaftskrisen. Goh et al. (2007), Cucchiella & Gastaldi (2006) oder Ho (1989) trennen die Unsicherheitsfaktoren zunächst in externe und interne Faktoren, wie in Abbildung 2-5 dargestellt. Interne Faktoren können durch die Unternehmen der Supply Chain selbst gemindert oder sogar ganz behoben werden, während externe Unsicherheiten durch vorgelagerte Stufen oder andere Institutionen generiert werden und so nicht dem Einfluss der Supply Chain Partner unterliegen. Insbesondere die Punkte der Preisfluktuation und der Anbieterqualität spielen bei nachwachsenden Rohstoffen eine wichtige Rolle, aber auch die politischen Rahmenbedingungen können einen großen Einfluss auf die Kosten und die Kalkulation haben. Beispiele für solche Einflüsse sind die steuerliche Begünstigung von Biokraftstoffen, die Recyclingverordnungen, Emissionsbegrenzungen bzw. der Handel mit Emissionen oder die Umweltschutzgesetze. Insbesondere der Emissionshandel begünstigt die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, da diese nahezu CO₂-neutral verarbeitet werden können und so zu einem positiveren Carbon Footprint führen (vgl. Nöthinger & Caluori 2009, S. 17 f.). Li differenziert aus Sicht der Ingenieurwissenschaften zwischen Unsicherheit mit Ursachen innerhalb oder außerhalb des betrachteten Prozesses (2007, S. 11). Zu den Unsicherheiten außerhalb des Prozesses werden dabei unter anderem der Feedstrom aus vorgelagerten Anlagen, die Produktqualität, die Produktkonzentration sowie die Liefermengen gezählt. Eine Übertragung dieser Unsicherheitsdifferenzierung auf nachwachsende Rohstoffe ist gut möglich, da auch bei diesen die Mengen sowie der Zustand unsicher sind. Guide et al. (2000) haben die Supply Chains von Recyclinggütern untersucht und sieben Unsicherheitsfaktoren aus der Sicht von Recyclingunternehmen gefunden. Dazu gehören unter anderem auch die Unsicherheit bezüglich der Menge und der zeitlichen Verfügbarkeit des Materials sowie die Unsicherheit der Qualität des Materials. Es ergeben sich somit einige Gemeinsamkeiten zwischen den Supply Chain-Unsicherheiten von Recyclinggütern bzw. der Reverse Logistic allgemein und von nachwachsenden Rohstoffen.

Für die weiteren Ausführungen wird die folgende Arbeitsdefinition zum Begriff Unsicherheit genutzt:

Definition: Unsicherheit

Unsicherheit beschreibt eine Situation, in der nicht alle notwendigen, externen Faktoren und deren Wirkungen im Vorhinein bekannt sind oder deren Ausmaß nicht exakt abgeschätzt werden kann. Aus Unsicherheit entsteht ein Risiko, wenn die Auswirkungen zu negativen Konsequenzen führen.

Die Abweichungen bei Qualität und Menge sind bei nachwachsenden Rohstoffen die häufigsten Quellen für Unsicherheit oder Risiko, deshalb werden politische Rahmenbedingungen und weitere Faktoren im Folgenden nicht in die Betrachtung einbezogen. Die im weiteren Verlauf des Arbeitsberichtes beschriebenen Methoden und Verfahren werden immer auf ihr Potential zur Unsicherheitsreduktion untersucht, was nach der gewählten Definition somit auch die Vermeidung von Risiko beinhaltet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Unsicherheiten bei nachwachsenden Rohstoffen unternehmensexternen Ursprungs sind bzw. außerhalb des betrieblichen Prozesses liegen. Aus diesem Grund sind sie vom jeweiligen Unternehmen nicht direkt beeinflussbar, sondern können bspw. als unveränderliche, stochastische Variable in die Produktionsplanung einbezogen werden. Auch für die originären Rohstofflieferanten sind die Unsicherheitsfaktoren nicht oder nur in geringem Maße beeinflussbar, so dass auch diese die Unsicherheiten in ihre Planungsprozesse einbeziehen müssen. Im folgenden Kapitel werden Verfahren dargestellt und ihre Eignung geprüft, um mit Unsicherheiten und Risiko bezüglich der Menge umzugehen. In Kapitel 4 erfolgt die gleiche Prüfung für die Schwankungen der Qualität.

3 Produktionsplanung unter Unsicherheit bezüglich der Menge

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Unsicherheiten haben direkte Auswirkungen auf die Supply Chain und erfordern eine spezielle Berücksichtigung bei der Produktionsplanung. Im Folgenden werden einige klassische und neuere Ansätze vorgestellt und daraufhin geprüft, ob die Unsicherheiten bereits im Vorfeld berücksichtigt und so die Produktion darauf abgestimmt werden kann.

3.1 Klassische statistische Verfahren und Forecasting

Die *statistischen Verfahren* dienen nicht primär der Produktionsplanung, sondern bereiten die Datengrundlage für diese vor. Unsichere Inputgrößen werden als Zufallsvariablen dargestellt. Aus Vergangenheitswerten oder mittels Expertenschätzungen werden *stochastische Verteilungen* und deren Parameter, wie beispielsweise die Normalverteilung, abgeleitet. Somit sind die unsicheren Faktoren über Erwartungswerte, Varianz und die zugehörige Dichtefunktion charakterisierbar, es lassen sich Erwartungswerte bilden oder Signifikanzniveaus festlegen (vgl. Li 2007, S. 58). Somit ist auf einer

einfachen Ebene mit ohnehin vorhandenen Daten eine Grobplanung möglich. Obwohl dieses Verfahren in der Praxis sehr gebräuchlich ist, muss immer beachtet werden, dass es bei fehler- oder lückenhaften Daten nicht verwendbar ist oder zu Fehlaussagen führen kann (vgl. Petrovic et al. 1998, S. 301). Ebenso sind nicht immer Vergangenheitsdaten verfügbar, so dass gar keine Verteilung erstellt werden kann.

Auf dieser Datengrundlage lassen sich *Prognosen (Forecasting)* für zukünftige Perioden bilden. Die Prognosen beziehen in der Praxis zumeist einen Zeitraum von 12 bis 18 Monaten der Zukunft ein (vgl. Shobrys & White 2002, S. 150). Eine einfache Durchschnittsbildung über die vergangenen Perioden zur Schätzung einer Liefermenge genügt nicht, da dieses Verfahren keinerlei Einflussfaktoren, welche die aktuelle Situation charakterisieren und somit einen Einfluss auf die Liefermengen haben, in die Betrachtung einbezieht. Eine Anwendung wissenschaftlich, praktisch und sachlich fundierter Methoden scheint deshalb angebracht. Nachfolgend werden die Regressionsanalyse und die Methode der neuronalen Netze vorgestellt, da sich diese gut für die hier betrachtete Problemstellung der Prognose eignen.

Die *Regressionsanalyse* wird verwendet, um Zusammenhänge zwischen einer abhängigen Variablen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu beschreiben (vgl. auch für eine detaillierte Einführung Backhaus et al. 2006). Sie kann auch genutzt werden, um Werte der abhängigen Variablen zu prognostizieren. Dabei können auch mehrere unabhängige Variablen in die Betrachtung einbezogen werden. Eine klassische Anwendung ist beispielsweise die Prognose der Absatzmenge eines Produktes in Abhängigkeit von den Werbeausgaben. Eine Übertragung auf die vorliegende Problemstellung ist aber möglich, so lassen sich Zusammenhänge zwischen Wetterlage und Reifegrad oder Erntezeitpunkten finden. Ein Spezialfall der Regressionsanalyse ist die Zeitreihenanalyse, bei der Trends oder saisonale Faktoren untersucht werden. Damit bietet sie sich für eine Anwendung bei den Produkten an, die einem saisonalen Einfluss unterliegen. Es ist wichtig zu beachten, dass die Schätzungen und Wirkungen zwar statistisch nachgewiesen werden können, damit aber noch keine Kausalität gegeben ist. So können bei falscher Anwendung auch Fehlprognosen oder -interpretationen vorkommen. Die Regressionsanalyse eignet sich im Rahmen der hier betrachteten Fragestellung vor allem für eine erste, auf historischen Daten basierenden, Abschätzung der zu erwartenden Liefermengen und deren Wahrscheinlichkeiten. Es ist denkbar, dass die Liefermenge beispielsweise von eindeutig quantifizierbaren Wetterfaktoren wie der Niederschlagsmenge abhängt. In diesem Fall kann die Liefermenge als abhängige und die Niederschlagsmenge als unabhängige Variable modelliert und eine Regressionsanalyse durchgeführt werden. Mit der gewonnenen Funktion kann dann aufgrund aktueller Daten die Liefermenge prognostiziert werden. Diese Mengenschätzung kann als erster Input bei den folgenden Optimierungsverfahren dienen.

Auch *neuronalen Netze* können zum Auffinden von Wirkungsbeziehungen verwendet werden. Vorteil bei diesen Netzen ist, dass der Anwender keine Annahmen über Wirkungszusammenhänge treffen muss, wie dies bei der Regressionsanalyse schon durch die Einteilung in abhängige und unabhängige Variablen der Fall ist. Das Netz „lernt“ durch historische Input- und Output-Daten selbstständig die Wirkungszusammenhänge (vgl. hier und im Folgenden Breitner 2008; Backhaus et al. 2006, S. 751).

Diese Idee basiert auf der Funktionsweise des menschlichen Gehirns. Nach Abschluss der Lern-, Trainings- und Kalibrierungsphase können dann für vorgegebene Inputs die entsprechenden Outputs durch das neuronale Netz bestimmt werden. Eine Fragestellung könnte z. B. sein: Welche Liefermengen (Output des neuronalen Netzes) können bei gegebenen Umweltbedingungen (Input des neuronalen Netzes) erwartet werden? Ein kausaler Zusammenhang muss auch hier nicht zwingend vorhanden sein. Ebenso ist es für den Anwender nur schwer möglich, das „Innere“ des Netzes und damit einhergehend die gefundenen Zusammenhänge und Wirkungen zu verstehen, da sie nur in mathematisch formulierten Beziehungen vorliegen, die sich einer Deutung nicht sofort erschließen. Die Methode der neuronalen Netze eignet sich auch zur ersten Prognose von Liefermengen sowie zum Testen von verschiedenen Einflussfaktoren auf diese Mengen.

Allen diesen Verfahren gemein ist, dass sie lediglich eine mit bestimmter Wahrscheinlichkeit behaftete Liefermenge prognostizieren können und auf diese Weise die Unsicherheit statistisch verringern. Außerdem eignen sie sich bedingt zum Auffinden oder Testen von Wirkungszusammenhängen, also dem Testen von verschiedenen Einflussfaktoren auf die Liefermenge. All diese Verfahren liefern einen ersten Anhaltspunkt, bspw. für Absatzpläne und Grobplanungen, und dienen damit als Grundlage für die folgenden Schritte. In der betrieblichen Praxis werden Prognosen allerdings meist noch von Hand erstellt und ausgewertet, eine IT-Unterstützung findet bestenfalls durch Spreadsheets statt (vgl. Shobrys & White 2002, S. 152). Die Verwendung von Realtime Daten, Data Warehouses, OLAP sowie Verfahren der Business Intelligence sind nur wenig verbreitet, bieten aber ein hohes Automatisierungs- und Unterstützungspotential. Insbesondere der Einbezug von Echtzeitdaten und eine ständige Aktualisierung der Datengrundlage scheinen bei nachwachsenden Rohstoffen und den in diesem Zusammenhang geschilderten, akut auftretenden Problemen, unerlässlich.

3.2 Produktionsprogrammplanung

Die *Produktionsplanung* umfasst die Organisation und Ablaufplanung aller Tätigkeiten, welche mit der Herstellung eines Gutes zusammenhängen. Dies schließt die gesamte Produktionskette vom Einkauf über die eigentliche Produktion bis zum Vertrieb ein. Bei der *Produktionsprogrammplanung* wird die zeitliche und mengenmäßige Disposition von Maschinen, Material, Personal und weiteren Inputressourcen zur Erfüllung von Auftrags- oder Absatzzielen vorgenommen (vgl. Glaser et al. 1992, S. 1; Bloech et al. 2001, S. 117). Es wird also Art, Menge und Termin der herzustellenden Produkte bestimmt. Diese Planung erfolgt meist rollierend, das heißt nach einem bestimmten Zeitraum wird das Programm überprüft und angepasst. Der Planungshorizont liegt in Abhängigkeit des Produktes und der Stückzahlen zwischen wenigen Monaten bis zu zwei oder drei Jahren (vgl. Nicolai et al. 1999, S. 31). Die Optimierungsverfahren für Stückzahlen und Menge werden typischerweise mit Blick auf den Absatz optimiert, da dieser als beschränkender Faktor wirkt - es sollte nur so viel produziert werden, wie auch abgesetzt werden kann. Als Restriktionen können Maschinenkapazitäten, die Begrenzung von Inputfaktoren, Interdependenzen zwischen verschiedenen Produktlinien und weitere betriebliche Gegebenheiten berücksichtigt werden (vgl. Tempelmeier 2003, S. 135 f.).

In diesem Abschnitt sollen die Produktionsplanungs- bzw. Optimierungsverfahren im Hinblick auf die Unsicherheiten bei nachwachsenden Rohstoffen beschrieben werden. Das heißt, neben dem Absatz werden auch die Inputressourcen explizit in die Betrachtung einbezogen. Zunächst werden grundlegende Strategien geschildert, mit denen stochastische in deterministische Probleme übertragen werden können. Dies ist notwendig, da ein Teil der Optimierungsverfahren nur mit deterministischen Werten verwendet werden können. Anschließend werden die Verfahren vorgestellt und die mögliche Berücksichtigung von unsicheren Inputfaktoren erörtert.

3.2.1 Produktionsplanungsstrategien

Deterministische Lösungsverfahren zur Optimierung der Produktionsplanung können mit stochastischen Daten nicht umgehen, weshalb eine Transformation dieser Daten notwendig ist. Bei der Planung mit Unsicherheiten lassen sich vier grundlegende Strategien zur Determination der unsicheren Daten unterscheiden, welche im Folgenden vorgestellt werden (vgl. Li et al. 2003; Li 2007, S. 30 f.).

Bei der *Worst-Case-Ansatz* wird die Produktionsplanung auf die niedrigsten möglichen Werte der Rohstofflieferungen ausgelegt. Dies kann auch ein Totalausfall der Lieferung und damit der Wert Null sein. Auf Basis der sicher zur Verfügung stehenden Ressourcen erfolgt dann eine konservative Produktionsplanung, bei der zwar keine Stock-Outs auftreten, die aber auch keine Optimierung des Gewinns erbringen kann.

Die *Base-Case-Ansatz* nutzt für die Produktionsplanung die Erwartungswerte der Lieferungen, eine Variation der Werte wird also nicht betrachtet. Da man mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer Abweichung, ob positiv oder negativ, ausgehen kann, führt dies entweder zu Stock-Outs oder zu freien Kapazitäten der Maschinen. Diese Strategie wird auch aggressive Strategie genannt.

Für die *Best-Case-Ansatz* werden die besten zu erwartenden Werte genutzt. Dies führt zu einer sehr aggressiven Strategie, da die Wahrscheinlichkeit sehr groß ist, dass diese Werte nicht eintreten. Produktionsmengen werden zu hoch angesetzt, was bei einer Verletzung der Inputmengen zu Stock-Outs und Kosten führt. Diese Strategie ist für die Planung mit nachwachsenden Rohstoffen dementsprechend nicht geeignet.

Die *Szenario-Ansatz* nutzt Zufallswerte und ermöglicht ein Testen der Produktionsstrategie, um eine sowohl robuste als auch profitable Strategie zu finden. Die Zufallswerte werden durch die bekannten stochastischen Verteilungen wie die Normalverteilung simuliert. So lassen sich die Auswirkungen verschiedener Input-Größen auf den Produktionsprozess und möglicherweise auftretende Stock-Outs oder freie Kapazitäten darstellen. Eine optimale Lösung wird mit dieser Methode allerdings nicht gefunden, insbesondere bei vielen unsicheren Inputfaktoren ist eine verlässliche Simulation nicht möglich. Des Weiteren können aus Kapazitätsgründen nicht alle Szenarien simuliert werden, es findet also eine Beschränkung auf eine Teilmenge statt.

Abbildung 3-1 zeigt anhand eines Beispiels die Wirkungen der unterschiedlichen Strategien. Dabei wurden folgende Daten zugrunde gelegt:

- Die Wahrscheinlichkeit für die Lieferung von 10 Mengeneinheiten beträgt 25%, für 20 ME 50% und für 30 ME 25%.
- Die Produkte werden anschließend für 10 GE verkauft, der Gewinn ergibt sich als Produkt aus Produktionsmenge * 10.
- Falls es zu einem Stock-Out kommt, entstehen Strafkosten in Höhe von 60 oder 100 GE, z. B. Umrüstkosten, Leerlauf von Maschinen und Personal
- Mehrlieferungen sind möglich und aus dieser Menge können die kleineren Produktionsmengen bedient werden: So können sowohl die Produktionsprogramme mit 10 als auch mit 20 Produktionseinheiten bei einer Lieferung von 30 Mengeneinheiten bedient werden. Lagerkosten für den Überschuss entstehen nicht. Kosten in Form von Strafen entstehen also nur durch Minder-, nicht durch Mehrlieferungen

	Produktionsmenge	Wahrscheinlichkeit Stock-Out	Liefermenge	Gewinn	Gewinn bei Strafe 60	Gewinn bei Strafe 100	Erwartungswert des Gewinns	Erwartungswert des Gewinns mit Strafe 60	Erwartungswert des Gewinns mit Strafe 100
Worst-Case	10	0%	10	100	100	100	100	100	100
			20	100	100	100			
			30	100	100	100			
Base-Case	20	25%	10	100	40	0	175	160	150
			20	200	200	200			
			30	200	200	200			
Best-Case	30	75%	10	100	40	0	200	155	125
			20	200	140	100			
			30	300	300	300			
Szenario	Je nach Szenario								

Abbildung 3-1: Vergleich der Produktionsplanungsstrategien

Die Ergebnisse zeigen die Wirkungen der verschiedenen Strategien. Beim Worst-Case-Ansatz herrscht eine hohe Planungssicherheit, da von der minimal zu erwartenden Menge ausgegangen wird und somit die Produktionsstrategie der 10 Einheiten immer eingehalten werden kann. Der Best-Case-Ansatz hingegen hat eine hohe Wahrscheinlichkeit für Stock-Outs, da mit der maximalen Menge geplant wird. Zwar ist der Erwartungswert des Gewinns zunächst höher, allerdings sinkt diese Vorteilhaftigkeit mit zunehmender Höhe der Strafe. Als Mittelweg zwischen diesen beiden Varianten ist der Base-Case-Ansatz zu sehen, bei dem nur mit einer Lieferung von 10 Einheiten Stock-Outs auftreten können (25% Wahrscheinlichkeit). Der Erwartungswert ist ohne Strafe niedriger als beim Best-Case-Ansatz, wird aber mit Strafen im gegebenen Beispiel vorteilhaft. Bei der Szenario-Analyse können unterschiedlichste

Ergebnisse auftreten, abhängig von den zugrundeliegenden Zufallszahlen, welche zur Berechnung der Gewinne und Stock-Outs genutzt werden.

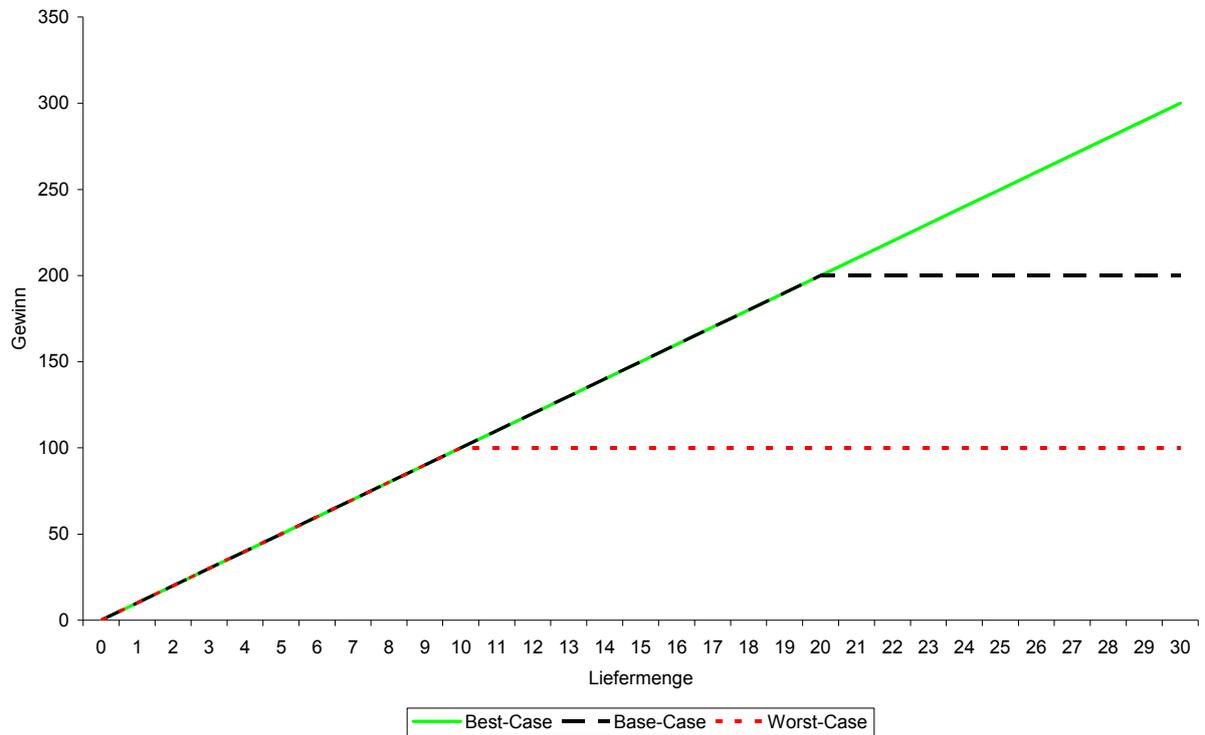


Abbildung 3-2: Gewinne der Produktionsplanungsstrategien ohne Strafe

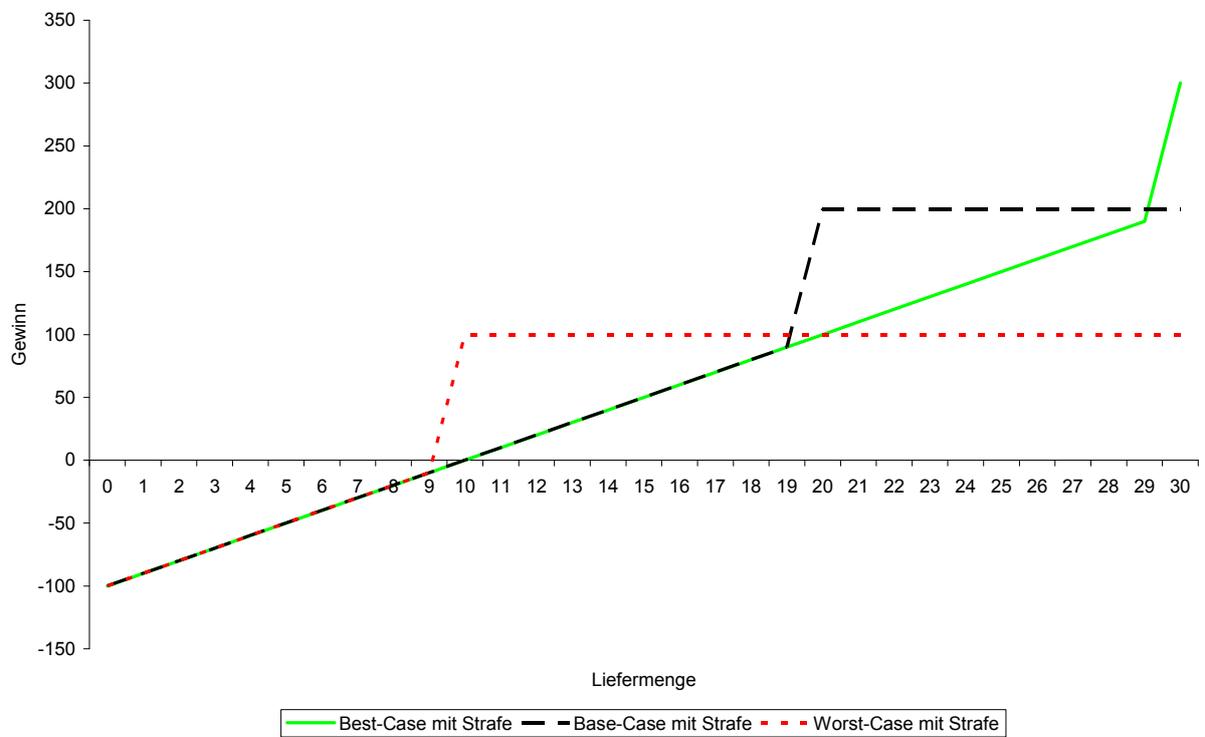


Abbildung 3-3: Gewinne der Produktionsplanungsstrategien mit Strafe

In Abbildung 3-2 ist der Verlauf der Gewinne für die Liefermengen von 0 bis 30 Einheiten grafisch dargestellt. Es zeigt sich, dass durch den Best-Case-Ansatz durchgehend ein gleicher und ab 21 Einheiten ein höherer Gewinn erzielt werden kann. Wenn Maschinen also flexibel und kostenneutral umgerüstet werden können und auch keine anderen Kosten durch Minderlieferungen entstehen können, so ist dieser Ansatz stets vorteilhaft und den anderen Ansätzen vorzuziehen. Sobald allerdings solche Kosten berücksichtigt werden, ändert sich die Vorteilhaftigkeit: Abbildung 3-3 stellt die Gewinnverläufe für diese Variante dar. Es sind vier Bereiche erkennbar, in denen die jeweiligen Ansätze vorteilhaft sind - wobei der erste Bereich mit Lieferungen unter 10 Einheiten durchweg zu negativen Gewinnen führt. Zwischen 10 und 19 Einheiten ist der Worst-Case-Ansatz vorteilhaft, danach bis einschließlich 29 Einheiten der Base-Case und letztendlich bei genau 30 Einheiten (oder mehr) der Best-Case. Die eben festgestellte Vorteilhaftigkeit des Best-Case-Ansatzes gilt somit bei Strafkosten nicht mehr. Eine Wahl der Strategie sollte in diesem Fall in Abhängigkeit von den prognostizierten Mengen und der gefundenen Bereiche erfolgen. IT-Systeme bieten in diesem Fall ein Unterstützungspotential, da die Strategiefestlegung durch „Wenn ... dann ...“ Regeln beschrieben werden kann. Bei Integration von statistischen Auswertungen, Lieferantendaten, Statusmeldungen sowie Prognosesystemen, Expertensystemen oder ähnlichen Softwarekomponenten kann auch eine vollständige Automatisierung erfolgen.

3.2.2 Lineare Optimierung

Das klassische Verfahren zur Lösung von Minimierungs- oder Maximierungsproblemen ist die Lineare Optimierung. Es existieren zahlreiche Verfahren im Bereich der Produktionsplanung oder allgemeiner gefasst im Bereich des Operations Research (OR). Alle Verfahren haben gemein, dass man von linearen Zusammenhängen und Zielkriterien ausgeht. Die Einfachheit der Modelle und eine Vielzahl von Algorithmen, die rechnergestützt Optimierungsaufgaben übernehmen können, führen zu einer starken Verbreitung dieser Verfahren. Der bekannteste Lösungsalgorithmus ist die Simplex-Methode. Auch eigentlich nichtlineare Probleme werden oftmals durch schrittweise lineare Approximation in lineare Probleme überführt (vgl. Neumann & Morlock 1993, S. 35). Das Grundmodell der linearen Optimierung in Matrixschreibweise lautet wie folgt (vgl. Domschke & Drexl 1991, S. 10 ff.):

$$\begin{aligned} \max \quad & F(x) := c^T x \\ \text{u. d. N.} \quad & Ax = b \\ \text{und} \quad & x \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Dabei stellt c den Vektor der Zielkoeffizienten, A eine $m \times n$ Koeffizientenmatrix und b den Kapazitätenvektor dar¹. Die Bedingung $x \geq 0$ wird Nichtnegativitätsbedingung genannt. Während bei der linearen Optimierung Variablen alle reellen Zahlen annehmen können, beschränkt sich dieser bei der *ganzzahligen linearen Programmierung* (Mixed-Integer Linear Programming) auf ganze Zahlen. Es

¹ An dieser Stelle soll nicht weiter auf die Herleitung des Standardproblems eingegangen werden, da hierfür zahlreiche Literatur zur Verfügung steht, vgl. beispielsweise (Neumann & Morlock 1993, S. 36 ff.), (Zimmermann 1987, S. 56 ff.) oder (Domschke & Drexl 1991, S. 10 ff.).

müssen nicht alle Variablen ganzzahlig sein, dies ist abhängig von der zugrundeliegenden Problemstellung. Die Anwendung dieses Verfahrens in der Produktionsplanung ist immer dann vorteilhaft, wenn nur ganze Einheiten produziert oder eingesetzt werden können. Im Grundmodell steht mit dem Kapazitätenvektor b zwar eine Beschränkungsbedingung der Ressourcen zur Verfügung, allerdings muss diese Beschränkung im Vorhinein bekannt und quantifiziert sein. Im Falle der natürlichen Rohstoffe ist aber genau diese exakte Quantifizierung nicht möglich. Wegen dieser Grundannahme der linearen Optimierung ist das Verfahren für die Produktionsplanung und -steuerung bei quantitativ schwankenden Inputs nicht geeignet.

Die klassischen Verfahren der Bestellmengenplanung bieten zwar optimale Lösungen unter Einbezug von Lagerhaltungskosten, Bestellkosten und benötigten Ressourcen für den vorher definierten Produktionsprozess. Allerdings unterstellen diese Verfahren auch eine sofortige Lieferung der Rohstoffe bei Bestellung in zumeist unbegrenzter Höhe. Die Verfahren beruhen auf einer Materialbereitstellung zum Einsatzzeitpunkt, der sogenannten „einsatzsynchronen“ Bereitstellung von Inputfaktoren (Tempelmeier 2006, S. 131). Diese Annahme ist in Anbetracht der saisonalen und unsicheren Herstellung der nachwachsenden Rohstoffe nicht vertretbar. Deshalb sind diese Verfahren zur Anwendung bei der Produktionsplanung mit nachwachsenden Rohstoffen nicht geeignet. Als Alternative bietet sich daher das Prinzip der Vorratshaltung an: Zum Ausgleich der Schwankungen sollen Puffertanks, Lager oder andere Speicherformen für Rohstoffe dienen (siehe Kapitel 3.5).

Die in Kapitel 3.2.1 dargestellten Annahmen der Produktionsplanungsstrategien und ihre jeweiligen Begrenzungen spiegeln sich im Grundmodell der linearen Optimierung (1) durch den Kapazitätenvektor b wider. Die maximale Kapazität der Inputfaktoren wird entsprechend der gewählten Strategie auf den niedrigsten, den Erwartungs- oder den simulierten Wert gesetzt. Allerdings steigert sich die Eignung der linearen Optimierung für die Produktionsplanung bei nachwachsenden Rohstoffen dadurch nicht. Da die weiter oben geschilderten Strategien in sich Einschränkungen besitzen, lassen sich die damit ermittelten Werte auch nur mit diesen Einschränkungen auf das Modell der linearen Optimierung übertragen. Dies führt dazu, dass wiederum die Gefahr von Stock-Outs (im Falle der aggressiven Strategien) besteht oder kein optimales Programm gefunden wird (im Falle der konservativen Strategie oder der Szenario-Analyse).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die lineare Optimierung sehr verbreitet ist und eine einfache und schnelle Lösungsmöglichkeit von Problemen bietet. Shobrys & White vergleichen die Best Practises von Chemieunternehmen und stellen dabei fest, dass die lineare und Mixed-Integer Programmierung der genutzte Standard für die Produktionsplanung ist (2002, S. 152 f.). Unsicherheit wird nicht implizit berücksichtigt, sondern über die Simulation von Szenarien in die Planung eingebracht. IT-basierte Expertensystem können zur Unterstützung genutzt werden. Allerdings eignet sich die lineare Programmierung durch die Beschränkung auf lineare und fest quantifizierte Inputfaktoren nicht für die Anwendung bei nachwachsenden Rohstoffen. Auch die hohe Komplexität der Nebenbedingungen und der fehlende explizite Einbezug von unsicheren Parameterwerten sprechen gegen eine Anwendung der linearen Optimierung (vgl. Nietsch et al. 1993, S. 22). Die Nutzung von Lagern kann eine Verbesserung sein, dies wird in Kapitel 3.5 diskutiert.

3.2.3 Nicht-lineare Optimierung

Bei der nicht-linearen Optimierung werden, im Gegensatz zur linearen Optimierung, auch nicht-lineare Zielfunktionen oder Nebenbedingungen akzeptiert. Da zahlreiche nicht-lineare Funktionen existieren, ist ein universeller Ansatz zur Lösung des Optimierungsproblems wie die Simplex-Methode nicht vorhanden (vgl. Zimmermann 1987, S. 138). Es gibt zahlreiche Lösungsvorschläge und Algorithmen für verschiedene nicht-lineare Funktionen (siehe z. B. Grosche et al. 2003). Durch die komplexeren Funktionen ergibt sich ein erhöhter Aufwand in der Modellierung des Problems, der Auswahl der Funktion und letztlich auch in der Bestimmung des optimalen Produktionsprogramms. Der Rechenaufwand ist im Vergleich zur Simplex-Methode um ein vielfaches höher. All diese Gründe haben in der Praxis dazu geführt, dass Optimierungsprobleme oftmals durch lineare Funktionen approximiert werden (vgl. Neumann & Morlock 1993, S. 536).

Auf den ersten Blick erscheinen nicht-lineare Funktionen besser geeignet, die Unsicherheit abzubilden. Für saisonale Komponenten der Unsicherheit trifft dies auch zu: Lieferungen von Rohstoffen, die nur in bestimmten Jahreszeiten, also typischerweise im Sommer, geerntet und geliefert werden können, lassen sich durch nicht-lineare Funktionen beschreiben. Die Lösung von solchen Optimierungsproblemen mit einer nicht-linearen Input-Funktion ist jedoch sehr aufwändig und durch Standardsoftware nur iterativ möglich. Dabei werden beispielsweise das Gradientenverfahren oder das Newton-Verfahren genutzt (vgl. Suhl 2008). Das Finden und Anpassen einer Funktion stellt ein Problem dar, welches nur durch Experimentieren oder durch die Nutzung von Erfahrungswerten gelöst werden kann. Dies birgt aber einen neuen Faktor an Unsicherheit in sich: Wenn eine ‚falsche‘ oder nicht exakt passende Funktion gewählt wird, ergibt sich ein suboptimales Produktionsprogramm. Daraus resultieren wiederum Stock-Outs oder freie Kapazitäten. Die nicht-lineare Optimierung wird üblicherweise für mittel- bis langfristige Produktionsstrategien vorgenommen, also für längere Betrachtungsperioden. Bei Fehlern in den Annahmen können sich die Probleme somit im Zeitverlauf nochmals verstärken.

Die Unsicherheit der Menge bei nachwachsenden Rohstoffen ist allerdings nicht nur saisonalen Ursprungs, sondern hat noch viele weitere Einflussfaktoren (siehe Kapitel 2.3). Diese zufälligen Faktoren wie Missernten, Schädlingsbefall oder Wettereinflüsse können in der nicht-linearen Optimierung nicht berücksichtigt werden. Die genutzte Funktion kann nur die im Vorhinein bekannten Schwankungen einbeziehen, weitere auftretende Abweichungen führen zu Fehlern der feststehenden Produktionsplanung. Aus diesem Grund ist die nicht-lineare Optimierung für die Erstellung eines Produktionsprogramms geeignet, dessen Inputfaktoren saisonalen Einflüssen unterliegen. Für die Berücksichtigung weiterer Unsicherheitsfaktoren gibt es aber keine formale Entsprechung im Optimierungsansatz, so dass das Verfahren nur bedingt für die Anwendung bei der Produktion mit nachwachsenden Rohstoffen geeignet ist.

3.2.4 Dynamische Optimierung

Die dynamische Programmierung befasst sich mit der Optimierung von Problemen über mehrere Stufen hinweg. Nach Ansicht von Domschke & Drexl (1991, S. 136) müsste das Verfahren eigentlich sequentielle Optimierung heißen, da eine Dynamik zumeist eine zeitliche Struktur impliziert. Diese sei bei den Problemen, auf welche die dynamische Optimierung angewandt wird, aber häufig nicht vorhanden. Im Gegensatz dazu sehen Neumann & Morlock (1993, S. 592) sehr wohl eine gute und auch häufig stattfindende Anwendung bei zeitlichen Strukturen in den Problemen. Die bisher dargestellten Verfahren der linearen und nicht-linearen Optimierung haben immer nur eine Betrachtung zu einem einzelnen Zeitpunkt, sozusagen einen „Schnappschuss“, erlaubt. Die dynamische Optimierung hingegen erlaubt die Betrachtung eines Prozesses mit mehreren Stufen oder Ebenen, wobei diese beispielsweise organisatorischer, zeitlicher oder räumlicher Art sein können. Typische Anwendungsfälle der dynamischen Optimierung sind Lagerhaltungs- oder Warteschlangenprobleme. Eine Lösung solcher Probleme erfolgt meist über eine Simulation, da für die Berechnung keine leistungsfähigen Lösungsverfahren zur Verfügung stehen (vgl. ebenda). Ein allgemeines Lösungsprinzip wurde von Bellmann entwickelt (1957). Es basiert darauf, eine optimale Politik von einem Anfangszustand in einen Endzustand zu überführen. Das Problem wird dann iterativ für jede einzelne Stufe des Gesamtproblems gelöst. Die im Vorhinein als optimal bestimmte Politik wird entweder über eine Vorwärts- oder eine Rückwärtsrekursion gefunden, das heißt man geht vom bekannten Startpunkt oder vom gewünschten Endpunkt aus und versucht, den optimalen Weg zwischen diesen Punkten zu finden (vgl. Domschke & Drexl 1991, S. 142; Grosche et al. 2003, S. 192 f.). Eine detaillierte formale Herleitung und Darstellung findet sich unter anderem bei Neumann (1977) oder Grosche et al. (2003).

Wie bereits erwähnt, sind die in der Literatur zu findenden Anwendungen der dynamischen Optimierung meist im Bereich der Warteschlangen-, Lagerhaltungs- oder Wegefindungs- bzw. Graphenprobleme anzusiedeln. Eine Nutzung der Methode im Bereich schwankender Rohstofflieferungen ist nicht bekannt. Auch in diesem Verfahren wird die Unsicherheit nicht explizit einbezogen. Die Planung über mehrere Perioden hinweg scheint jedoch für saisonale Produktlieferungen geeignet. Auch lässt sich die dynamische Optimierung verwenden, wenn für jede Periode Schätzungen über die zu erwartenden Lieferungen vorliegen. In beiden Fällen ist es möglich, das Produktionsprogramm unter Einbeziehung der zeitlichen Struktur und der damit einhergehenden erwarteten Schwankung der Menge zu optimieren. Allerdings fehlen die Erfahrungen in der praktischen Anwendung und es gibt keine allgemeingültigen, leicht handhabbaren Lösungsalgorithmen. Aus diesem Grund muss für jedes Problem eine individuelle Lösungsmöglichkeit erarbeitet werden, was das Verfahren unflexibel und schwer anwendbar macht. Insbesondere bei plötzlich auftretenden Änderungen ist eine schnelle und somit rechtzeitige Änderung der Produktionsplanung bzw. eine neue Optimierung nicht ohne weiteres möglich. Diese Gründe deuten an, dass die Anwendbarkeit der dynamischen Optimierung bei nachwachsenden Rohstoffen zwar generell besser als die lineare und nicht-lineare Optimierung ist, jedoch auch keine Unsicherheit direkt einbezieht und deshalb keine Optimallösung darstellt.

3.2.5 Stochastische Optimierung

Bei den bisher beschriebenen Optimierungsverfahren fand kein expliziter Einbezug der Unsicherheit in das Modell statt. Bei der stochastischen Optimierung ist dies, wie der Name bereits andeutet, der Fall. Die Modellierung der Unsicherheit geschieht über den Einbezug von Zufallsvariablen mit den bekannten stochastischen Verteilungen (vgl. Koberstein 2008, Goh et al. 2007). Typischerweise werden in der Literatur Anwendungen beschrieben, bei denen das Ergebnis am Ende einer Periode durch eine Zufallsgröße dargestellt wird, deren Verteilung durch eine definierte Dichtefunktion bestimmt ist (siehe z. B. Neumann & Morlock 1993, S. 615). Es ist aber auch denkbar, die Inputfaktoren als unsichere Größe zu modellieren. Dabei liegt entweder eine Situation unter Risiko oder Ungewissheit vor (siehe Kapitel 2.3). Durch die mit Zufall behafteten Daten ist keine eindeutige Optimierung möglich und auch die Zulässigkeit einer Lösung ist nicht eindeutig feststellbar (vgl. Scholl 2001, S. 71). Aus diesem Grunde muss eine Kompromisslösung gefunden werden. Dies geschieht durch Überführung in ein deterministisches Modell, welches dann wiederum mit den oben aufgeführten Methoden gelöst werden kann (siehe auch Kapitel 3.2.1). Grundsätzlich lassen sich drei Sichtweisen auf den Umgang mit der zeitlichen Unsicherheit unterscheiden (in Anlehnung an Madanski 1960; Zimmermann 1987; Koberstein 2008).

- **Expected-value:** Hierbei wird für jedes unsichere Datum der Erwartungswert der Verteilung gebildet und mit diesem Mittelwert eine deterministische Optimierung vorgenommen.
- **Wait-and-see:** Die grundlegende Annahme bei diesem Ansatz ist, dass solange gewartet werden kann, bis sich die Unsicherheit auflöst und die optimale Entscheidung dann getroffen wird. Für die Planung heißt dies, dass mittels eines herkömmlichen deterministischen Modells die Verteilungen der Zielfunktionswerte für verschiedene Szenarien berechnet werden. Diese Optimallösungen sollen dann als Entscheidungshilfe im aktuellen Zustand dienen. Das eigentliche Problem wird damit nicht gelöst, sondern nur verschiedene Alternativen evaluiert. Aufgrund der Modellierung als Zufallsgrößen können für jedes Szenario obere und untere Schranken der Zielwerte oder die oberen und unteren Grenzen der gesamten Zielfunktion angegeben werden. Somit können Aussagen der Form „mindestens ... aber höchstens ...“ getroffen werden.
- **Here-and-now:** Dieser Ansatz liefert die optimale Lösung für den Zeitpunkt der Problembetrachtung. Dazu wird der Erwartungswert der Zielfunktion über alle Szenarien optimiert, so dass sich unabhängig vom tatsächlich eintretenden Ereignis ein immer zu realisierender Wert findet.

Die ermittelte Kompromisslösung ist unter Umständen nicht in jedem denkbaren Szenario zulässig. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn eine Produktion unter Verwendung von einer bestimmten Anzahl an Einheiten Rohstoff mittels des Expected-Value als optimal ermittelt wird. Bei einem Totalausfall ist diese Lösung aber schlichtweg nicht umsetzbar. Im Planungszeitpunkt ist nicht bekannt, ob die ermittelte Lösung zulässig sein wird oder nicht (vgl. Scholl 2001, S. 73). Um die Zulässigkeit der Lösung in die Planung einzubeziehen, muss der stochastische Lösungsbereich ebenso in eine deterministische Variante überführt werden. Dabei können folgende Modelle verwendet werden, welche

alle mehrstufige und damit mehrperiodige Planungen unterstützen (in Anlehnung an Scholl 2001, Zimmermann 1987):

- Fat-Solution-Modelle: Es werden grundsätzlich nur jene Lösungen akzeptiert, die in allen Szenarien zulässig sind. Die tatsächliche Realisierung der Handlung muss deshalb in diesem Modell gar nicht betrachtet werden. Es besteht aber die Gefahr, dass keine Lösung gefunden wird, wenn beispielsweise die Möglichkeit eines Totalausfalls der Lieferung besteht.
- Deterministische Ersatzwertmodelle: Jede Unsicherheit wird durch einen deterministischen Wert übersetzt. Dabei kann z. B. der Erwartungswert bei Risikoneutralität oder der Wert des Worst-Case bei Risikoscheue verwendet werden (siehe Kapitel 3.2.1).
- Chance-Constrained-Modelle: Hierbei wird die Einhaltung der Nebenbedingungen nicht strikt, sondern nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit α gefordert. Dabei kann α entweder für das gesamte Restriktionensystem oder nur für einzelne Restriktionen gelten. Die Unzulässigkeitswahrscheinlichkeit einer Lösung, also die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlplanung der Produktion, ergibt sich somit durch $1 - \alpha$. Die entsprechende Zulässigkeitswahrscheinlichkeit muss im Zeitpunkt der Planung vom Entscheidungsträger gewählt werden. Mit $\alpha = 1$ ergibt sich das Fat-Solution-Modell als eine Unterart der Chance-Constrained Modelle.
- Kompensationsmodelle: Bei diesem Modell wird davon ausgegangen, dass bei Verletzung der Restriktion eine Kompensation in der entsprechenden Periode des Auftretens stattfinden kann. Wie genau diese Kompensation aussieht (z. B. Zukauf von Rohstoffen aus anderen Quellen), kann erst in dieser Periode festgelegt werden. Zum Planungszeitpunkt werden die eventuell notwendigen Kompensationen durch Straffunktionen, meist in Form von Kosten, berücksichtigt. Das Risiko der Restriktionenverletzung wird also durch die Möglichkeit einer späteren Kompensation ausgeglichen, welche aber durch die Gegenüberstellung der Strafkosten zu negativen Auswirkungen im Planungszeitpunkt führt, um die Verletzungswahrscheinlichkeit möglichst gering zu halten. Dabei muss bedacht werden, dass eben diese Kompensation in der Realität nicht immer möglich ist. Deshalb unterscheidet man zwischen der sicheren und bereits geplanten Kompensation sowie der vollständig und unvollständig möglichen Kompensation. Nachteilig bei diesem Modell ist, dass die Straffunktion bekannt sein muss - dies ist in der Realität nur selten der Fall und auch eine Abschätzung von zukünftigen Kosten ist nur schwer möglich (vgl. Li 2007, S. 8).

Durch den direkten Einbezug der Unsicherheit und der verschiedenen Varianten des Umgangs mit dieser Unsicherheit sowie ihrer Verletzung eignet sich das Modell der stochastischen Optimierung gut für die Anwendung bei der Produktion mit nachwachsenden Rohstoffen. Bisher fehlen aber praktische Erfahrungen mit dieser Methode. Außerdem ist die Modellierung von dynamischen, stochastischen und mehrperiodigen Prozessen unter Unsicherheit nicht einfach, da viel Wissen und Einschätzungsvermögen des Entscheiders verlangt wird (vgl. Neumann & Morlock 1993, S. 615). Eine Einschätzung von Erwartungswerten oder anderen Parametern ist unter Umständen auch gar nicht verfügbar.

3.3 Fuzzy-Logik Ansätze

Die Fuzzy-Logik, auch unscharfe Logik genannt, ist eine Obermenge der booleschen Logik zur Abbildung unscharfer Begriffe. Um den Begriff der unscharfen Menge zu verstehen, bedarf es zunächst einer Beschreibung der scharfen Menge. Der Mathematiker Cantor definierte die scharfe Menge wie folgt:

„Unter einer ‚Menge‘ verstehen wir jede Zusammenfassung M von bestimmten wohlunterschiedenen Objekten m unserer Anschauung oder unseres Denkens (welche die ‚Elemente‘ von M genannt werden) zu einem Ganzen.“ (Cantor 1895)

Bei praktischen Anwendungen ist diese harte Abgrenzung einer Menge aber nicht immer möglich. Wie im Fall der nachwachsenden Rohstoffe kann beispielsweise die Liefermenge statt mit 100 Einheiten nur mit 90 bis 105 angegeben werden. Bei der Qualität stehen unter Umständen gar keine Zahlen zur Verfügung, sondern lediglich umgangssprachliche Ausdrücke wie „gute Qualität“. Um solche unscharfen Ausdrücke menschlicher Wahrscheinlichkeitseinschätzungen quantifizieren und verwenden zu können, wurde 1965 von Lotfi Zadeh die Fuzzy-Logik entwickelt. Ein weiteres Beispiel soll die Grundidee verdeutlichen: Ein Unternehmen benötigt einen natürlich wachsenden Rohstoff A. Bei herkömmlichen Produktionsplanungsverfahren würde unter der Annahme der vollkommenen Sicherheit der Rohstoff zum Produktionszeitpunkt t entweder als „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“ eingestuft. Die tatsächlich aber vorhandene Unsicherheit der Lieferung würde umgangssprachlich durch „zum Zeitpunkt t wahrscheinlich vorhanden“ ausgedrückt, was sich in der Fuzzy-Logik bspw. durch einen Wert von 0,8 auf einer Skala von Null bis Eins widerspiegelt. Somit ist eine Abstufung der Sicherheit des Vorhandenseins im Zeitpunkt t möglich und dieses zusätzliche Wissen kann in die Produktionsplanung einfließen. Die Fuzzy-Logik transformiert also linguistische Regeln und Ausdrücke durch Zugehörigkeitsfunktionen in Daten, welche ein Computer verarbeiten kann (vgl. Kruse & Nauck 1996; Nietsch et al. 1993; Petrovic et al. 1998).

Statt den beiden Wahrheitswerten „wahr“ und „falsch“ nutzt die Fuzzy-Logik ein Intervall reeller Zahlen $[0,1]$. Während bei einer scharfen Menge alle Objekte bestimmt und wohlunterschieden sind, ist dies bei der unscharfen Menge nicht der Fall: Ein Wert von beispielsweise 0,5 erlaubt keine eindeutige Zuordnung zur Menge „wahr“ oder „falsch“, sondern entspricht vielmehr der umgangssprachlichen Formulierung „vielleicht“. Formal wird bei scharfen Mengen die Zugehörigkeit eines Wertes x zu einer Menge M über eine Funktion $f(x) : X \rightarrow \{0,1\}$ definiert, wobei X die Grundmenge ist (vgl. Nietsch et al. 1993, S. 4). Die Zugehörigkeit wird durch eine 1 ausgedrückt, die Nichtzugehörigkeit durch eine 0. Die Zugehörigkeitsfunktion lautet dann wie folgt:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x \in M \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Da bei unscharfen Mengen alle Werte aus dem Intervall $[0,1]$ gewählt werden können, muss die Zuordnungsfunktion mehr Unterscheidungen bieten. Die Zuordnung zu einer unscharfen Menge \bar{M} ist wie folgt definiert:

$$\overline{M} = \{(x, \mu_{\overline{M}}(x)) : x \in X\} \text{ mit } \mu_{\overline{M}} : X \rightarrow [0,1]$$

Auch hier ist X die Grundmenge und $\mu_{\overline{M}}$ ist die Zugehörigkeitsfunktion. Zur Bestimmung der Zugehörigkeit sind viele Funktionen entwickelt worden, deren Auswahl stark vom jeweiligen Anwendungsgebiet abhängt (vgl. Nietsch et al 1993, S. 5). Die exakte Modellierung der Funktion und ihrer Parameter ist also kontextabhängig und subjektiv. Häufig verwendete Funktionen sind die Trapez-, Gauss-, S- oder Dreiecksfunktion, da sie nur wenige Parameter benötigen. Es fehlen formale Grundlagen, um Fuzzy-Systeme selbstständig lernen zu lassen, so dass keine adaptive Anpassung der Regeln auf Basis der Ergebnisse vorgenommen werden kann. Deshalb ist man bei der Modellierung oftmals auf ein Trial-and-Error-Verfahren angewiesen (vgl. Kruse & Nauck 1996). Die Darstellung als numerische Skala innerhalb des Intervalls $[0,1]$ ermöglicht eine übersichtliche und leicht verständliche Auflistung der Zugehörigkeitsgrade von x zur Menge \overline{M} (vgl. Rommelfanger & Eickemeier 2002). Es muss aber beachtet werden, dass diese Zugehörigkeitswerte stets auf Schätzungen von Individuen beruhen und damit subjektiv sind. Andere Personen könnten durchaus zu anderen Ergebnissen und Mengenzuordnungen gelangen. Daten, welche nur in Form von Äußerungen vorliegen, können durch die Verwendung der Fuzzy-Logik überhaupt erst operationalisiert und damit nutzbar gemacht werden. Gerade Expertenwissen liegt oftmals nur in Form von Wahrscheinlichkeitsabschätzungen vor. Dieses für die Planung bisher nicht nutzbare Wissenspotential kann durch die Fuzzy-Logik in PPS-Systemen verwendet werden (vgl. Nietsch et al. 1993, S. 13). Letztendlich führt dies zu einer genaueren Abbildung der Realität und einer höheren Fehlertoleranz.

Die Anwendung von Fuzzy-Logik bei klassischen Entscheidungsproblemen beschreiben Rommelfanger & Eickemeier (2002). Herkömmliche Entscheidungstableaus lassen sich durch die Angabe von Intervallen oder einzelnen Werten ‚fuzzifizieren‘. Anschließend sind die Entscheidungsregeln und Dominanzkriterien wie bei anderen Darstellungen anwendbar. Wenn eine Alternative eine andere Alternative dominiert, so ist dies auch mit Fuzzy-Ergebnissen ersichtlich. Die Autoren raten dazu, im Vorfeld keine genaue Beschreibung der Alternativen vorzunehmen und Informationen einzuholen, da dies zu Kosten führt. Durch die Verwendung der Fuzzy-Logik ist es auch mit unscharfen bzw. nicht bis ins Detail präzisierten Daten möglich, Alternativen von der weiteren Betrachtung auszuschließen. Erst nach der Elimination sollten für die verbliebenen Alternativen weitere Informationen eingeholt werden, wobei mit Hilfe der Entscheidungstheorie auch die Informationskosten gegen den zusätzlichen Nutzen abgewogen werden können (vgl. dazu Rommelfanger & Eickemeier 2002, S. 124 ff.) Bei der Maximums- und Minimumsbildung von Fuzzy-Ergebnissen sind herkömmliche Min- bzw. Max-Funktionen nicht mehr anwendbar. Deshalb sollte zum Vergleich der Alternativen das beste bzw. schlechteste Ergebnis aus der Fuzzy-Menge eines jeden Zustands gewählt werden.

Umweltzustand	S1	S2	S3
Ereignis	Schlechte Ernte	Normale Ernte	Gute Ernte
Lieferbare Einheiten	Ca. 10	Ca. 50	Ca. 100
Erwartungswert als Fuzzy-Zahl	8 - 12	45 - 55	90 - 110
Geäußerte Expertenmeinung	Unwahrscheinlich	Sehr wahrscheinlich	Vielleicht
Abbildung als Fuzzy-Zahl	0,5 - 0,1	0,75 - 0,9	0,4 - 0,6

Abbildung 3-4: Abbildung der Wahrscheinlichkeiten von Umweltzuständen als Fuzzy-Zahlen

Typischerweise zielen Entscheidungsprobleme in der Literatur und Wissenschaft meist auf Umweltzustände ab, welche durch die Absatzseite bestimmt werden. Die unbekanntenen Faktoren hierbei sind Absatzzahlen, Marktentwicklungen oder Verkaufspreise. Als Zielgröße der Entscheidung wird die Losgröße der Produktion definiert. Eine Übertragung auf unsichere Inputfaktoren ist aber einfach möglich. Die Zielgröße bleibt gleich, da auch bei unsicheren Inputfaktoren die Losgröße bestimmt werden soll. Lediglich die Umweltzustände ändern sich, sie bilden statt der unsicheren Absatzseite nun die Beschaffungsseite ab. Abbildung 3-4 zeigt die Entstehung von Fuzzy-Zahlen durch Expertenmeinungen anhand von Mengen und Wahrscheinlichkeitsurteilen. Die undefinierten Begriffe wie „sehr wahrscheinlich“ werden in Prozentzahlenbereiche überführt, um sie zum einen besser verständlich und zum anderen rechnerisch verwertbar zu machen. Das gleiche passiert mit den Mengeneinheiten der Lieferung, bei denen circa-Zahlen in Zahlenbereiche überführt werden, welche mit den eben beschriebenen Wahrscheinlichkeiten zutreffen werden. Zum Einen werden also Unsicherheiten bezüglich der Umweltzustände, zum Anderen der Liefermenge in den einzelnen Umweltzuständen betrachtet. Eine Kombination dieser beiden Umwandlungsvarianten ist möglich, aber nicht immer nötig. Die Modellierung der Unsicherheit in einem der beiden Faktoren kann ausreichend sein, da sich beide Unsicherheiten gegenseitig verstärken und somit eine Überbewertung der Schwankung bewirken könnten. Dies ist der Fall, wenn die Unsicherheit des Umweltzustands eine direkte Auswirkung auf die Höhe hat, beide unsicheren Faktoren also denselben Grund haben.

Die Anwendung der Fuzzy-Logik für PPS-Systeme wurde von Nietsch et al. (1993) untersucht. Während Optimierungsprobleme in der Produktionsplanung bisher oftmals über lineare Optimierung gelöst wurden, versuchen die Autoren durch die Anwendung der Fuzzy-Linearen Programmierung eine realistischere Abbildung der Wirklichkeit zu erreichen. Die hohe Komplexität der Randbedingungen und die Unsicherheit im Hinblick auf die Parameterwerte der linearen Optimierung führen zu der Annahme, dass die Nutzung von Wahrscheinlichkeiten in Form von Fuzzy-Zahlen zu besseren Ergebnissen kommen müsste und die Fuzzy-Logik somit ein hohes Potential zur Handhabung von Unsicherheiten bietet (vgl. ebenda, S. 22 und 31). Große Potentiale werden vor allem in der Zeitplanung und bei der Erstellung von Arbeitsplänen gesehen. Gerade Wartezeiten und Leerlaufzeiten bei Maschinen lassen sich durch linguistische Ausdrücke wie „dauert nicht lange“ oder „dauert länger“ beschreiben und eignen sich somit für eine Fuzzifizierung. Auch in der Materialwirtschaft weisen Ausdrücke wie „ausreichende“ Lagerbestände oder eine „lange“ Wiederbeschaffungszeit ein großes Potential auf,

durch Fuzzy-Zahlen ersetzt zu werden. Auch Petrovic et al. (1998) nutzen Fuzzy-Sets zur Modellierung von Unsicherheiten der Beschaffungsseite in einer Supply Chain. Mittels iterativer Algorithmen konnte anschließend die gleiche Verfügbarkeitsrate der Rohstoffe innerhalb der gesamten Supply Chain hergestellt werden wie bei absolut sicheren Lieferungen. Dies erfolgte mittels einer Kompensation der Unsicherheiten durch erhöhte Lagerhaltung an verschiedenen Stationen, was allerdings auch zu erhöhten Kosten pro produziertem Stück führte (siehe auch Kapitel 3.5). Mula/Poler/Garcia (2006) kommen in ihrer Untersuchung von Fuzzy-Sets in MRP-Systemen ebenso zu dem Ergebnis, dass es sich um eine angemessene Methode zum Umgang mit Unsicherheit handelt, welche einen Vorteil für die gesamte Produktionsplanung darstellt (S. 94f.). Auch die reale Anwendung bei einem Automobilzulieferer führte zu einer Erhöhung der Gesamtzufriedenheit in Form von Servicelevel, Lagerbeständen, Planungsnervosität und Totalkosten. Der Berechnungsaufwand blieb dabei in einem vertretbaren Aufwand (vgl. ebenda).

Um die Produktionsplanung qualitativ aber tatsächlich zu verbessern, reichen partielle Anwendungen der Fuzzy-Logik nicht aus. Erst eine bereichsübergreifende Verwendung verspricht eine einheitliche und verbesserte Datengrundlage und somit eine effektive Nutzung des Verfahrens. Fuzzy-Logik sollte überall dort angewendet werden, wo die bislang genutzten Modelle, bspw. ein deterministisches Modell, kein realitätsgetreues Bild der externen unsicheren Einflüsse ergeben können (vgl. Mula/Poler/Garcia 2006, S. 94). Nietsch et al. sehen die Notwendigkeit, statistische Prognosemodelle wie z. B. die exponentielle Glättung durch Fuzzy-Logik abzulösen. Durch verkürzte Produktlebenszyklen und eine größere Variantenvielfalt ist heutzutage die benötigte Datenbasis für die statistischen Verfahren nicht gegeben, so dass keine reliablen Ergebnisse erzielt werden können. Die beispielsweise für das Verfahren der exponentiellen Glättung benötigten historischen Zeitreihen sind bei Produktlebenszyklen von nur wenigen Jahren nicht bzw. nur in unzureichendem Maße vorhanden. Fuzzy-Zahlen bieten den Vorteil, dass sie an aktuelle Gegebenheiten angepasst werden können. Eine Anpassung der PPS an wechselnde Zielvorgaben oder Nebenbedingungen ist so stets möglich. Zusammenfassend birgt die Fuzzy-Logik ein großes Potential zur langfristigen Optimierung der PPS bezüglich der Unsicherheiten im gesamten Planungsprozess. Insbesondere versprechen sie sich eine größere Realitätsnähe im Vergleich zu den Modellen der linearen Optimierung, da Unsicherheiten, Störungen und die deshalb benötigte Flexibilität direkt berücksichtigt werden können.

Die Anwendung von Fuzzy-Logik für die Produktionsplanung bei nachwachsenden Rohstoffen wurde bisher nicht betrachtet, allerdings zeigt sich insgesamt eine gute Eignung. Die statistisch erhobenen Daten müssten nicht mehr zwingend determiniert werden, sondern können direkt weiterverarbeitet werden. Ebenso können Experten- und Lieferanteneinschätzungen genutzt werden, welche bei Umweltunsicherheiten oder Wachstumsproblemen der Rohstoffe eine wichtige Informationsgrundlage sind (vgl. Petrovic et al. 1998, S. 301). Dadurch entstehen allerdings auch Nachteile, da eine Abhängigkeit von subjektiven Eindrücken und eine ebenso subjektive Dateninterpretation und -umsetzung vorliegen. Bei einer Implementierung sollten die Vor- und Nachteile dementsprechend berücksichtigt und im Bezug auf die konkrete Problemstellung bewertet werden.

3.4 Pinch-Analyse

Die Pinch-Analyse ist ursprünglich für die chemische Industrie entwickelt worden und wird dort verwendet, um eine Optimierung des Verbrauchs an Ressourcen wie Wasser oder Energie vorzunehmen. Singhvi et al. übertragen den Ansatz auf die Produktionsplanung in Supply Chains (2003). Eine Nachfrage- und eine Produktionskurve werden im zweidimensionalen Raum abgetragen. Die Achsen werden durch die Zeit und die Menge an Einheiten definiert. Die Nachfragekurve („Demand Composite“) stellt die nachgefragte Menge an Einheiten als eine Funktion der Zeit, die Produktionskurve („Production Composite“) stellt die tatsächlich produzierten Einheiten dar. Abbildung X zeigt die Kurven für ein von den Autoren entworfenes Beispiel. Die vertikale Distanz zwischen den beiden Kurven ist die Durchlaufzeit des Auftrags vom Beginn der Produktion bis zur Befriedigung der Nachfrage. Die horizontale Distanz ist die Anzahl an Einheiten auf Lager. Der Pinch-Point ist als derjenige Punkt definiert, an dem die Anzahl an gelagerten Einheiten ihr Minimum erreicht. Unter dem Ziel der Minimierung des Lagerbestands für eine gegebene Produktionsstrategie kann die benötigte durchschnittliche Produktionsleistung pro Periode nun wie folgt berechnet werden:

$$\frac{\text{Produzierte Einheiten zum Zeitpunkt } t - \text{Anfangsbestand}}{\text{Anzahl der Perioden}}$$

Singhvi et al. führen an, dass mittels der Pinch-Analyse nicht nur ein Ergebnis für die weitere Produktionsplanung gefunden wird, sondern dass auch ein qualitativer Einblick in die Zusammenhänge der Supply Chain gegeben wird. Veränderungen der Nachfrage oder der Produktionskapazitäten können durch einfache Anpassungen der Kurve dargestellt und ihre Auswirkungen direkt erfasst werden. Es sind keine Berechnungen mit komplizierten mathematischen Modellen notwendig. Dies ermöglicht eine schnelle und flexible Anpassung an neu auftretende Probleme.

Den Einsatz der Pinch-Analyse in der Produktionsplanung von Rohstoffen, welche einem saisonalen Zyklus unterliegen, beschreiben Geldermann et al. (2007). Im Bereich nachwachsender Rohstoffe betrifft dies vor allem pflanzliche Stoffe, die typischerweise in einem Jahreszyklus wachsen. Die Autoren versuchen, den klassischen Ansatz auf schwankende Nachfrage oder Angebote zu übertragen,

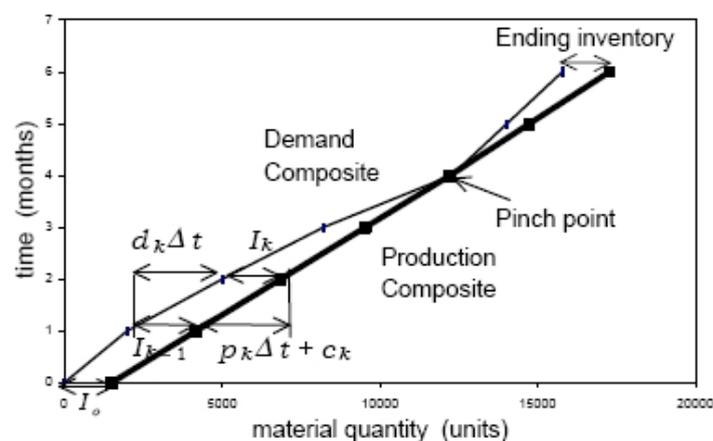


Abbildung 3-5: Pinch-Analyse (Singhvi et al. 2003, S. 1)

um so eine optimale Produktionsrate ohne Stock-Outs und mit minimaler Lagerhaltung zu finden. Geldermann et al. leiten zuerst eine Pinch-Analyse für saisonale Nachfrage her, bei der folglich die Nachfragekurve Schwankungen aufweist. Formal wird dies durch eine abschnittsweise stetige Funktion repräsentiert. Im Anschluss wird die Schwankung auf die Angebotsseite übertragen, wodurch die saisonale Komponente in der Angebotskurve modelliert wird. Graphisch wird, wie bereits bei Singhvi et al., die Zeit gegen die gelagerten Einheiten abgetragen. Bei der Suche nach dem optimalen Produktionsprogramm unter der Bedingung von Schwankungen auf der Nachfrageseite werden die Kosten der Lagerung pro Stück betrachtet. Diese Kosten sollen minimiert werden, da gerade die Lagerung von natürlichen Rohstoffen unter Umständen nur schwer möglich ist und somit hohe Kosten verursachen kann. Im Falle von verderblichen, flüchtigen oder anderen Rohstoffen, die ihre Qualität verändern, ist teilweise gar keine oder nur eine sehr begrenzte Lagerzeit denkbar. Bei Schwankungen auf der Angebotsseite steht im Vordergrund, alle verfügbaren Inputressourcen tatsächlich zu nutzen, unter der Nebenbedingung einer möglichst gleichbleibende Produktionsrate und der Vermeidung von Stock-Outs. Die Produktionsrate sollte deshalb so konstant wie möglich gehalten werden, da die Maschinen auf diese Rate eingestellt werden und jede Änderung zu Umrüstkosten führt. Bei Erstinvestitionen in Maschinen muss auf diese Weise eine Abschätzung der maximal verfügbaren Kapazität erfolgen. Des Weiteren kann das Produktionspersonal nicht immer kurzfristig aufgestockt oder abgebaut werden, was bei einer stark fluktuierenden Produktionsrate aber nötig wäre. Eine beispielhafte Darstellung der Pinch-Analyse bei schwankendem Angebot ist in Abbildung 3-6 zu sehen. Geldermann et al. kommen zu dem Ergebnis, dass eine konstante Produktionsrate im Hinblick auf die Kapazitätsauslastung vorteilig ist, allerdings entweder nicht alle Inputressourcen nutzen kann (da die Rate zu gering ist) oder zu Stock-Outs führt (da die Rate zu hoch ist). Ein Stock-Out führt zu einem Stillstand der Produktion oder zu einer Verwendung von teureren Ersatzmaterialien, sofern diese überhaupt verfügbar sind. Als Kompromiss wird eine Pinch-Analyse mit mehreren Pinch-Points vorgeschlagen. Zwischen den einzelnen Pinch-Points erfolgt dann jeweils eine Neuberechnung der Produktionsrate. Die Bestimmung der optimalen Anzahl an Pinch-Points sollte in Abhängigkeit der Planungsperioden, der benötigten und vorhandenen Flexibilität im Produktionsprozess und der weiteren besonderen Gegebenheiten der jeweiligen Betrachtung erfolgen.

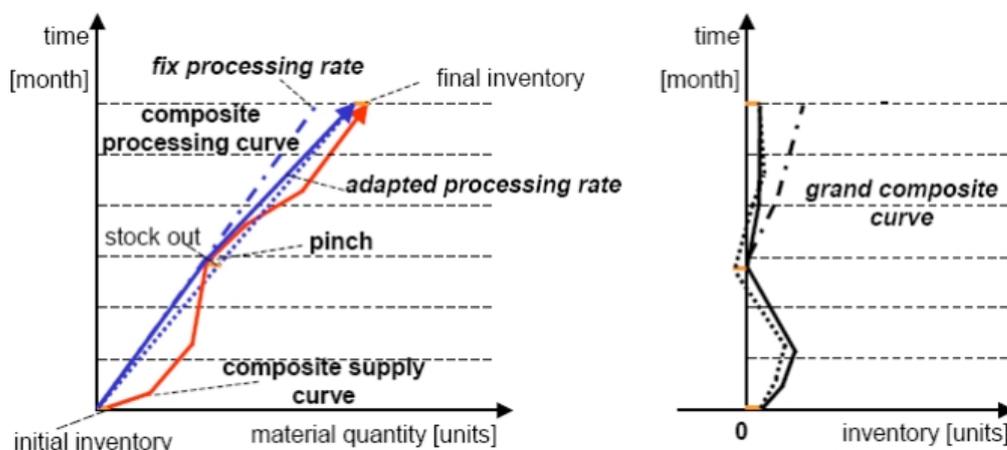


Abbildung 3-6: Pinch-Analyse bei schwankendem Angebot (Geldermann et al. 2007, S. 2)

Insgesamt zeigt sich, dass die Überführung der Pinch-Analyse aus den Ingenieurwissenschaften in die Betriebswirtschaftslehre eine vielversprechende Idee ist. Das Verfahren ist einfach und schnell anpassbar, so dass die Produktionsplanung flexibel bleibt – was gerade bei dem schwankenden Angebot der nachwachsenden Rohstoffe von großer Bedeutung ist. Allerdings existieren noch keine praktischen Erfahrungen mit der Methode, so dass die tatsächliche Anwendbarkeit und die Grenzen noch nicht bekannt sind. Die Pinch-Analyse findet nicht immer die optimale Lösung, da einzelne Kostenfaktoren nicht in die Berechnung einbezogen werden. Allerdings ist es als simples Verfahren gut geeignet, schnelle Lösungen zu entwickeln oder Initialwerte für weitere, komplexere Verfahren zu liefern (vgl. Geldermann et al. 2007). Eine grundsätzliche Planung insbesondere in kleineren Betrieben oder bei wenig komplexen Produktionsverfahren ist folglich mit der Pinch-Analyse möglich, komplexere Szenarien oder integrierte Betrachtungen und Optimierungen der Supply-Chain sollten aber mit komplexeren und somit auch detaillierteren Modellen erfolgen.

3.5 Lagerhaltung

Lager schaffen eine zeitliche und mengenmäßige Ausgleichsfunktion zwischen Beschaffung und Produktion, da eine einsatzsynchrone Bereitstellung der benötigten Rohstoffe nicht immer möglich oder ökonomisch vorteilhaft ist (vgl. Bloech et al. 2001, S. 194). Tempelmeier spricht in diesem Zusammenhang von einem „Mengen- und Zeitpuffer“, welcher durch einen Sicherheitsbestand gebildet wird (Tempelmeier 2003, S. 442). Als Sicherheitsbestand werden Bestände bezeichnet, welche nicht zur deterministischen Produktionsplanung zu Verfügung stehen, sondern nur bei ungeplanten Ereignissen genutzt werden sollen (vgl. ebenda, S. 442 f.). Bei ausreichend hoher Lagerhaltung, deren genaue Höhe sich mittels der statistischen Verfahren aus Kapitel 3.1 schätzen lässt, kann die durchgängige Bereitstellung von Rohstoffen gewährleistet werden. Oftmals werden die benötigten Volumina zur Sicherstellung des Betriebs entweder statistisch mit Hilfe historischer Datenbestände berechnet oder aus persönlichen Erfahrungen geeigneter Experten abgeleitet. Ein einfaches statistisches Verfahren besteht in der Schätzung des Sicherheitsbestands mittels eines Vielfachen der Standardabweichung des über den Betrachtungszeitraum aufsummierten Prognosefehlers (vgl. ebenda, S. 443 f.). Unter der Annahme der Lagerfähigkeit bieten sich also Möglichkeiten, durch gezielte Überkapazitäten im Einkauf und der Lagerung der nicht sofort benötigten Ressourcen einen Schutz gegen quantitative Unsicherheiten aufzubauen. Dabei sollten die Ergebnisse der Produktionsplanung und die entsprechende Strategie (siehe Kapitel 3.2.1) berücksichtigt werden, um eine ausreichende Kompensation zum Ausgleich der Unsicherheiten zu schaffen.

Es besteht auch die Möglichkeit, die Produktionsplanung vollkommen unabhängig von Unsicherheiten zu planen und die nach dieser Lösung optimale Bestellmenge zu ordern. Die optimale Bestellmenge abzüglich der erwarteten Lieferung, welche nach den Strategien aus Kapitel 3.2.1 bestimmt werden kann, ergibt die zu erwartende Menge an fehlenden Einheiten. Wenn diese Menge zusätzlich bestellt wird, kann so ein Sicherheitspuffer geschaffen werden und die Wahrscheinlichkeit von Stock-Outs verringert sich (vgl. Li 2007, S. 59). In der Praxis werden Sicherheitsbestände häufig überdimensioniert, da die Kosten der Lagerhaltung geringer sind als die Ausfallkosten (Carlson & Yano 1986). Ein

Sicherheitsbestand ist gegenüber der Neueinplanung von Aufträgen bei nicht ausreichenden Rohstoffen insbesondere bei hohen (Um-)Rüstkosten vorteilhaft (vgl. ebenda; Yano & Carlson 1983). Demzufolge sollten Sicherheitsbestände genutzt werden, anstatt eine Neuterminierung bei auftretenden Problemen vorzunehmen. Bei angepasster, niedriger Lagerhaltung ist die Vorteilhaftigkeit sogar bei niedrigen Umrüstkosten gegeben. Insbesondere bei der Produktion auf Komponentenebene, im Gegensatz zur Endproduktebene, birgt die Lagerhaltung einen Kostenvorteil gegenüber Umplanungen der Produktion. Bei der Planung der gesamten Supply Chain können die Sicherheitskapazitäten an verschiedenen Stationen gebildet werden, da sich Ausfälle in Form von daraus resultierenden Produktionsstockungen oder Mindermengen über die Kette hinweg fortsetzen. Die Vorhaltung von Reserven an mehreren Stationen führt insgesamt zu niedrigeren Totalkosten und einer höheren Verfügbarkeitsrate (vgl. Petrovic et al. 1998, S. 308).

Nachteilig bei der Lagerhaltung ist, dass sie zu Kosten in Form von Bestellkosten, Kapitalbindung, Lagerungskosten und eventuell auftretendem Schwund oder Verfall bzw. Verderb führt (vgl. Bloech et al. 2001, S. 196 ff.). Dies ist gerade bei nachwachsenden Rohstoffen problematisch, da Mindesthaltbarkeitsdaten beachtet werden müssen und unter Umständen nur eine sehr begrenzte Lagerzeit realisierbar ist (vgl. Schürbüscher et al. 1992). Nicht jeder natürliche Rohstoff ist auf einfache Art und Weise lagerbar, da spezielle Behälter (z. B. für Flüssigkeiten) vorhanden sein oder besondere Sicherheitsbestimmungen beachtet werden müssen. Ein weiterer Punkt ist die mögliche Qualitätsminderung der Rohstoffe, da natürliche Stoffe im Zeitablauf ihren Zustand und ihre Eigenschaften ändern können. Im Worst-Case führt dies dazu, dass sie nach Überschreitung einer bestimmten Lagerdauer nicht mehr verwendet werden können.

In der Praxis ist die Lagerhaltung bzw. die Verwendung von Puffern der gängigste Ansatz zur Unsicherheitsreduktion (vgl. Shobrys & White 2002, S. 152 ff.). Da die Planung mit einfachen Verfahren wie der linearen Optimierung unter Annahme von durchschnittlichen Werten oder Szenarios durchgeführt wird, ist die Lagerhaltung die einzige Möglichkeit, Sicherheit zu erzeugen. Die Dimensionierung der Lager erfolgt dabei auf Basis subjektiver Einschätzungen und Erfahrungen.

3.6 Alternative und flexible Planung

Die Alternativenplanung ist ein Bestandteil der strategischen Planung, welcher sich mit dem Auffinden von weiteren Wahlmöglichkeiten einer Entscheidung befasst. Die aus Sicht des jeweiligen Entscheiders optimale Alternative wird gewählt und umgesetzt. Bei der vorliegenden Betrachtung entspricht dies der Wahl eines optimalen oder zumindest eines für den Einsatzzweck als ausreichend gut erachteten Produktionsprogramms. Die nicht gewählten Alternativen können für spätere Planungs- und Änderungszwecke genutzt werden. Bei nachwachsenden Rohstoffen und den geschilderten Unsicherheiten ist im Planungszeitpunkt allerdings nicht eindeutig absehbar, welche Alternative die Optimalitätsbedingung erfüllen wird. Diese Entscheidung kann erst unter vollständiger Information, also im Zeitpunkt des Auflösens der Unsicherheit, getroffen werden. Deshalb wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die Alternativen im Vorfeld festgelegt werden, die Entscheidung über die

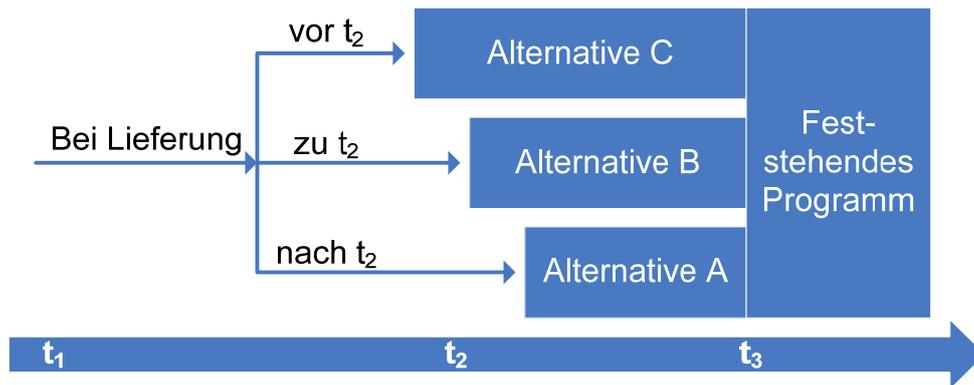


Abbildung 3-7: Alternative Planung bei Unsicherheit des Lieferzeitpunkts

tatsächliche Wahl aber erst später getroffen wird. Ein ähnliches Ziel verfolgt die flexible Planung. Adam beschreibt die flexible Planung als eine Möglichkeit, durch einmal getroffene Entscheidungen keine zukünftigen Chancen zu verbauen (1996, S. 290). Es sollen für später zu treffende Entscheidungen ausreichend Handlungsspielräume gelassen werden. Grundvoraussetzung dafür ist, dass die Produktionsaggregate anpassbar sind. Dies führt normalerweise im Anschaffungszeitpunkt zu höheren Kosten, erlaubt aber in späteren Zeitpunkten die Anpassung an spontan auftretende Gegebenheiten.

Wenn diese beiden Planungsverfahren auf Unsicherheiten der Liefermenge übertragen werden, so bedeutet dies, dass im Falle von Minder- oder auch Mehrlieferungen das Produktionsprogramm gemäß diesen gelieferten Mengen umgestellt wird. Dazu werden in einem früheren Planungszeitpunkt verschiedene Alternativen der Produktionsprogramme bezüglich der Liefermengen aufgestellt. Im Zeitpunkt des Bekanntwerdens der tatsächlichen Menge, also entweder bei Ankündigung oder Eintreffen der Lieferung, wird die der Menge entsprechende Alternative gewählt und als Produktionsprogramm festgesetzt. Die Unsicherheit wird dadurch aufgelöst, da die Entscheidung über das Produktionsprogramm erst im Zeitpunkt der vollständigen Information erfolgt.

In Abbildung 3-8 ist die kaskadenförmige Alternativenplanung in Abhängigkeit der Liefermenge schematisch dargestellt. Zeitlich wird die Alternativenplanung bereits im Vorfeld zum Zeitpunkt t_1 vorgenommen. Die Entscheidung über die tatsächlich zu wählende Produktionsprogrammalternative erfolgt dann in Zeitpunkt t_2 , in dem sich die Unsicherheit bezüglich der Menge auflöst und die sichere Liefermenge bekannt ist. Dort erfolgt dann die Wahl von Alternative A, B oder C, welche sich aufgrund der unterschiedlichen Menge der zu verarbeitenden Rohstoffe in der Gesamtproduktionslänge unterscheiden. Auf diese Entscheidung aufbauend kann wiederum die Entscheidung für die nachfolgende Periode getroffen werden, in der bspw. entsprechend der zuvor gewählten Alternative Programm C, B oder A gewählt wird. So kann in t_2 bei der Entscheidung für Alternative A die benötigte Liefermenge für die Anschlussproduktion C geordert werden. Insgesamt ergibt sich dadurch ein gleichbleibender Zeithorizont bis zur Fertigstellung beider Alternativen. Würde diese Anschlussplanung nicht durchgeführt, so ergäben sich unterschiedliche Endzeitpunkte der Produktion, je nachdem welche Alternative in t_2 gewählt wurde. Dies würde alle weiteren Planungen erschweren und eine neue zeitliche Unsicherheit schaffen. Bisher basierten die Annahmen für die Alternativplanungen auf gleichen Produkten. Wenn es sich bei den Produkten nicht um terminierte Kundenaufträge handelt, die

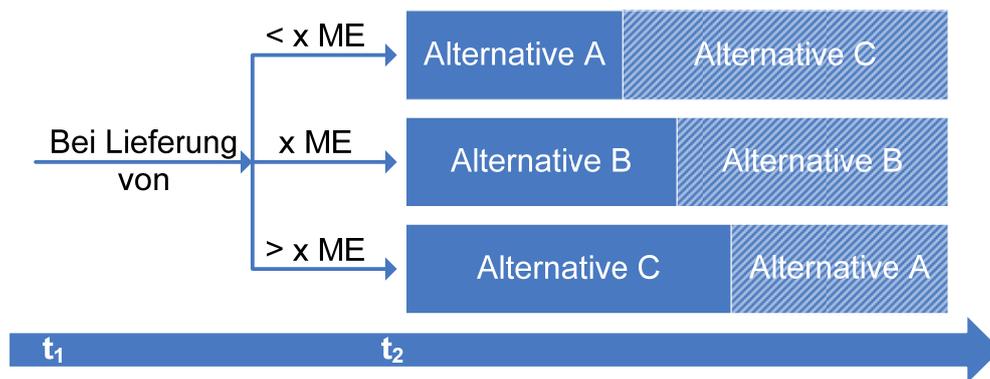


Abbildung 3-8: Alternative Planung bei Unsicherheit der Liefermenge

Alternativen also auf Lager produziert oder nicht dringend für einen Folgeprozess benötigt werden, können sie sich aber komplett im zu produzierenden Gut unterscheiden. So können beispielsweise bei geringer Liefermenge an Baumwolle einzelne Tücher, bei hoher Liefermenge komplette Stoffballen gefertigt werden.

Bei zeitlicher Unsicherheit, beispielsweise aufgrund nicht genau vorhersagbarer Erntezeitpunkte, kann ebenso wie bei quantitativer Unsicherheit die Alternativplanung genutzt werden. Abbildung 3-7 stellt den Ablauf dar: Die Planung der Alternativen erfolgt wiederum in t_1 , das Produktionsprogramm ab t_3 ist fest. Wenn die Lieferung vor t_2 eintrifft, wird Alternative C produziert; entsprechend wird bei Lieferung rund um t_2 B und nach t_2 A gewählt. Die gestrichelten Alternativen stellen mögliche Anschlussproduktionen dar, wenn in der Laufzeit der gewählten Alternative neue Rohstoffe bestellt und geliefert werden können. Wenn aufgrund der sich ergebenden Informationen zwischen t_1 und t_2 absehbar ist, dass die Lieferung erst nach t_2 eintreffen wird, kann auch eine andere Produktionslinie eingeschoben und A im Anschluss an diese produziert werden.

Zusammenfassend bieten die Verfahren der flexiblen und alternativen Planung eine gute Möglichkeit, grundlegende Produktionsprogramme im Vorfeld zu definieren und die Wahl auf einen späteren Zeitpunkt zu übertragen. Außerdem können die Entscheider so dazu gedrängt werden, sich über mögliche Umweltzustände, Ereignisse und deren Auswirkungen sowie über Möglichkeiten, mit diesen umzugehen, Gedanken zu machen. Dies fördert sowohl die Qualität der Informationsgrundlage als auch der Entscheidungen selbst und damit der zu bestimmenden Alternativen. Unter der Annahme flexibler Maschinen und abrufbereiten Personals ist somit eine gute Eignung dieser Verfahren bei der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen gegeben. Allerdings muss beachtet werden, dass Leerlaufzeiten der Maschinen entstehen können, welche Opportunitätskosten verursachen. Liefertermine können den Kunden nicht fest zugesagt, sondern nur auf Zeiträume eingegrenzt werden. Alternativ kann der Liefertermin als Worst case, also der Fertigstellungszeitpunkt der zeitlich spätesten Alternative gewählt werden - auch dies ist aus Kundensicht negativ zu beurteilen. Trotz der möglichen Nachteile ist aber bei passenden Rahmenbedingungen eine gute Anwendbarkeit für die vorliegende Problemstellung gegeben.

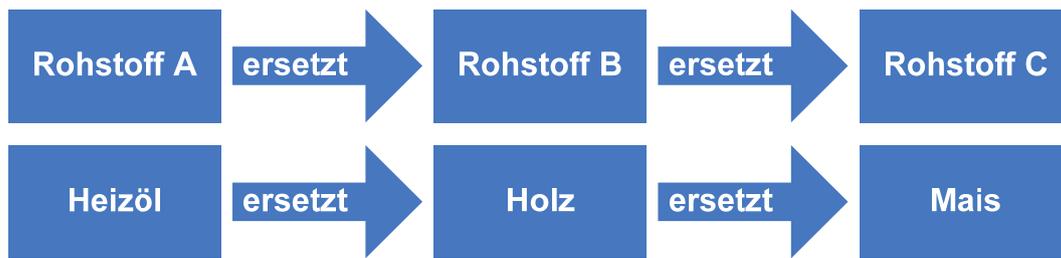


Abbildung 3-9: Substitution von Rohstoffen

Eine Abwandlung dieses Verfahrens basiert auf der Nutzung alternativer Inputfaktoren, also alternativer Rohstoffe, als Grundlage für die Produktion. Dazu müssen in der Planungsphase Rohstoffe gefunden und die Anforderungen an diese definiert werden, welche in der Lage sind, den primär verwendeten Rohstoff zu substituieren. Im Zeitpunkt des Bekanntwerdens der Liefermengen kann dann bestimmt werden, ob die zu erwartende Menge ausreicht oder ob die im Vorfeld definierten Ersatzrohstoffe zugekauft werden müssen. Falls es sich bei den Ersatzrohstoffen ebenfalls um nachwachsende Rohstoffe handelt, welche wiederum Unsicherheiten unterliegen, sollten zur Sicherung der Aufrechterhaltung der Produktion Pufferspeicher verwendet werden, die stets eine ausreichende Menge an Rohstoffen als Notreserve bereithalten. Auf Grundlage der statistischen Prognosen über die zu erwartenden Liefermengen können im Planungszeitpunkt die Bestellmengen für diese Notreserven bestimmt werden. Sollte es sich bei den Ersatzrohstoffen um schnell verfügbare Materialien handeln, so ist eine Bestellung zu einem späteren Zeitpunkt ausreichend. Die schnelle Verfügbarkeit ist vor allem bei den konventionellen Rohstoffen, insbesondere im Bereich der Energiegewinnung, gegeben.

Dieses Verfahren der alternativen Inputfaktoren wird bereits heute bei Biomassekraftwerken angewandt. So kann beispielsweise die Vergärungsanlage Jühnde mit Gülle, Holz, Wintergetreide, Mais, Sonnenblumen und Gras bedient werden (vgl. Projektgruppe Bioenergiedörfer 2007). Die Energiepflanzen können in gehäckselter Form gelagert werden und stehen so jederzeit und bedarfsgerecht zur Verfügung. Zusätzlich stehen zur Abdeckung von Spitzenlasten im Winter oder für Wartungs- und Reparaturarbeiten ein Holzheizwerk und ein konventioneller Ölkessel zur Verfügung. Die Zuschaltung dieser Aggregate erfolgt flexibel in Abhängigkeit vom aktuellen Bedarf. Eine schematische Übersicht der Substitution von Rohstoffen mit dem Beispiel des Biomassekraftwerkes Jühnde ist in Abbildung 3-9 zu sehen. Ein Übertrag dieses Prinzips auf andere Betriebe und Industriezweige ist möglich.

4 Produktionsplanung unter Unsicherheit bezüglich der Qualität

Wenn ein gelieferter Rohstoff von seinen im Vorfeld definierten Anforderungen abweicht, so spricht man von einer Qualitätsabweichung. Bei der Produktionsplanung müssen deshalb bestimmte Eigenschaften und Merkmale definiert werden, welche der Rohstoff aufweisen muss, um zur Herstellung, Weiterverarbeitung oder ähnlichen Maßnahmen verwendet werden zu können. Die Abweichungen können beispielsweise aus veränderten Größen, Längen oder Volumen bestehen oder es tauchen Fehler im Material wie Brüche, Risse, Flecken oder ähnliches auf. Für die mengenmäßige

Produktionsplanung existieren die im vorherigen Kapitel vorgestellten Verfahren. Diese basieren allerdings immer auf einer angenommenen, gleichbleibenden Qualität der Rohstoffe, da nur so eine Mengenplanung überhaupt möglich ist. Eine Minderung der Qualität und der daraus entstehende Ausschuss führen letztlich auch zu einer verringerten Menge, so dass grundsätzlich die vorgestellten Verfahren angewendet werden können. Weitere Verfahren zum Umgang mit Schwankungen der Qualität werden im Folgenden näher erläutert.

4.1 Statistik

Analog zu den Ausführungen bezüglich der Menge in Kapitel 3.1 können auch für die Qualität Prognosen erstellt werden. Dabei werden die Mengen, welche durch zu geringe Qualität oder nicht verwertbare Ressourcen ausfallen, geschätzt. Basierend auf den Vergangenheitsdaten ermöglichen die Regressionsanalyse oder neuronale Netze also auch hier eine Abschätzung der Ausfallquoten. Bei der Verwendung von statistischen Schätzungen muss immer bedacht werden, dass Vergangenheitsdaten oder Erfahrungswerte vorliegen müssen, um eine Abschätzung vornehmen zu können. Bei Materialqualitäten ist der Wertebereich außerdem größer als bei Materialmengen, wo ein Rohstoff entweder geliefert oder nicht geliefert wird. Die Qualität hingegen kann in verschiedensten Merkmalen und Skalen ausgedrückt werden. Dies führt dazu, dass neben den statistischen Schätzungen über die Qualität auch Erfahrungen in die Bewertung einfließen müssen, was diese geschätzten Qualitätsmerkmale bedeuten.

Zu beachten ist außerdem, ob und wie die Reaktionsmöglichkeiten der Produktionsplanung auf komplette Ausfälle, Zeitverzögerungen durch Vor- und Nacharbeit, eine schlechtere Qualität der Endprodukte bei Weiterverarbeitung oder alternative Verwendungsmöglichkeiten der mangelhaften Rohstoffe gegeben sind. Die statistischen Methoden können also nur zur Aufbereitung der Datengrundlage dienen, um somit einen Input für Entscheidungen oder weitere Verfahren zu bieten. So kann anhand der Prognosen der Ausfallquoten und des nicht direkt verwertbaren Materials eine Vorsorge gegen die so entstehenden Mindermengen in Form von Ersatzbeständen vorgenommen werden. Dadurch wird das Problem der Qualität in die bereits beschriebenen Probleme der Menge überführt. Auf die Vermeidung von Stock-Outs und damit einhergehenden Produktionsunterbrechungen durch Lagerhaltung wird in Kapitel 4.2 näher eingegangen.

4.2 Lagerhaltung

Wie bereits in Kapitel 3.5 beschrieben, hat die Lagerhaltung lediglich einen kompensierenden, reaktiven Charakter. Schwankungen der Qualität resultieren in gegenüber der Planung niedrigeren Mengen durch Ausschuss an Rohstoffen. Somit wird die mangelnde Qualität zu einem Mengenproblem, welches durch Ersatzrohstoffe aus dem Lagerbestand ausgeglichen werden kann. Die Ausführungen aus Kapitel 3.5 gelten somit analog auch für die unsichere Produktionsplanung im Hinblick auf die Qualität der Rohstoffe.

Die benötigten Lagermengen lassen sich durch die im vorherigen Kapitel beschriebenen statistischen Methoden schätzen bzw. auf Vergangenheitsdaten basierend prognostizieren. Je mehr Einflussfaktoren auf die Rohstoffqualität bekannt sind und in die Mengenplanung des Lagers einbezogen werden, desto genauer und damit kosteneffektiver kann die Lagerhaltung vorgenommen werden. So können bspw. Wetterbedingungen oder Schädlinge einen erheblichen Einfluss auf die Qualität haben. Erfolgt frühzeitig eine Information über solche Vorkommnisse, so können die Lagerbestände entsprechend aufgestockt werden, um ausreichende Sicherheitspuffer für den Zeitpunkt der Rohstoffverwendung bereit zu stellen. Ebenso ist es denkbar, alternative Rohstoffe bereitzuhalten, um die in Kapitel 3.6 beschriebene alternative Planung bei Fehlmengen durch Qualitätseinbußen vornehmen zu können.

Es wird ersichtlich, dass die Lagerhaltung auch bei Qualitätsschwankungen eine Situation der Sicherheit erschaffen kann und somit eine ebenso gute Eignung zur Behandlung der qualitativen Unsicherheit wie bei der quantitativen Unsicherheit aufweist. Allerdings sind die bereitzuhaltenden Mengen einzelfallabhängig, so dass keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können. Bei der Lagerhaltung von nachwachsenden Rohstoffen sollte außerdem bedacht werden, dass diese im Zeitverlauf ihren Zustand bzw. ihre Eigenschaften ändern können. Somit können bei längerer Lagerdauer an den Lagerbeständen selbst die Qualitätsmerkmale ungenügend werden. Deshalb muss die Planungsperiode für die Bestimmung der Lagermengen den Haltbarkeitszyklen der verwendeten Rohstoffe angepasst werden, um eben diese natürlichen Qualitätseinbußen zu berücksichtigen.

4.3 Vor- oder Nacharbeit

Wenn die gelieferten Rohstoffe dem geforderten Qualitätsniveau nicht genügen, so ist eine Vorbearbeitung der Rohstoffe oder eine Nachbearbeitung des damit gefertigten Produktes denkbar. Da die jeweils notwendige Bearbeitung vom Rohstoff, von der spezifischen Qualitätsminderung und dem Endprodukt abhängig ist, lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen treffen. Ebenso sind diese Themen im Bereich nachwachsender Rohstoffe wissenschaftlich bisher nicht untersucht worden. Zwar existieren Lösungen und Methoden der Nachbearbeitung für spezielle Produkte, insbesondere in der chemischen Industrie, jedoch ist deren Anwendung bei der hier betrachteten Problemstellung nicht sinnvoll bzw. gar nicht möglich.

Wenn bei der Lieferung eines Rohstoffs ein Qualitätsmangel festgestellt wird, ist zunächst zu prüfen, ob dieser behoben und der Rohstoff anschließend zur Produktion verwendet werden kann. Beispielfähig können nachwachsende Rohstoffe zu feucht sein und müssen getrocknet werden, enthalten unerwünschte Stoffe über definierten Grenzmengen und müssen daraufhin gesäubert werden oder enthalten Risse (bspw. bei Leder), welche gar nicht behoben werden können. Sollte letzteres der Fall sein, so muss er ausgesondert und durch ein Substitut ersetzt werden, welches entweder bestellt wird und somit zu zeitlichen Verzögerungen führt oder aus einem Lager gestellt wird (zur Substitution siehe 3.6; zur Lagerhaltung siehe Kapitel 4.2). Unter Umständen ist eine teilweise Verwertung durch Abschnitt der fehlerhaften Stellen möglich. Dies führt zu Ausschuss und somit zu mengenmäßigen Problemen, da die ursprünglich eingeplante Rohstoffmenge nicht mehr vorhanden ist.

Sollte eine Bearbeitung aus praktischen und ökonomischen Aspekten sinnvoll sein, so muss der Rohstoff ebenfalls ausgesondert und einer anderen Bearbeitungsstufe zugeführt werden. Generell führt jede Bearbeitung zu einem zusätzlichen Produktionsschritt, welcher eine zeitliche Verzögerung gegenüber dem ursprünglichen Produktionsprogramm verursacht. Dies führt in der Regel dazu, dass die Produktionspläne neu erstellt oder angepasst werden müssen. Wie lange die Verzögerung ist und welche Bearbeitungsschritte notwendig sind, hängt vom Rohstoff und dessen Zustand ab. Aus diesem Grund ist eine Entscheidung über Vor- oder Nacharbeiten am Rohstoff oder fertigen Produkt immer einzelfallabhängig, so dass keine allgemeingültige Bewertung vorgenommen werden kann.

5 Supply Chain Management als übergreifendes Konzept

Der Begriff und die Methoden des Supply Chain Managements (SCM) sind mittlerweile weit verbreitet und in vielen Bereichen geläufig. Trotzdem herrscht über die genaue Begriffsdefinition Uneinigkeit. Um den Begriff des SCM näher zu bestimmen, muss zuerst der Begriff der **Supply Chain** definiert werden. Der Definition von Handfield & Nichols (1999) folgend sollen darunter sämtliche Aktivitäten vom Rohstofflieferanten bis zum Endkunden verstanden werden, die zur Versorgung der Kunden und der Märkte mit den gewünschten Gütern notwendig sind. Typischerweise teilt sich die Supply Chain in mehrere Bereiche und einzelne Akteure auf: Lieferanten, Produzenten, Spediteure, Händler und Kunden. Die Prozesskette kann dabei auf einer Ebene auch mehrstufig sein, wenn beispielsweise ein Vorproduzent an den Hauptproduzenten liefert. Wenn diese Betrachtungsweise zugrunde gelegt wird, kann das **Supply Chain Management** in einem ersten Schritt als die Organisation dieser Prozesskette zwischen den verschiedenen Akteuren angesehen werden. Unter den verschiedenen Autoren und Definitionen tauchen einige Gemeinsamkeiten auf, welche im Folgenden geschildert werden (vgl. im Folgenden Wildemann 2007, S. 1723; Heusler et al. 2006, S. 19). Das SCM wird als langfristige, strategische, kooperations- und integrationsorientierte Managementkonzeption verstanden, welche darum bemüht ist, Effizienz- und Effektivitätssteigerungen entlang der gesamten Supply Chain zu erzielen. Zentraler Punkt ist somit die Kollaboration zwischen den verschiedenen Akteuren, um eine gemeinsame Optimierung der Geschäftsprozesse über Unternehmensgrenzen hinweg vorzunehmen. Neben dem Materialfluss wird hierbei vor allem dem Informationsfluss eine große Bedeutung beigemessen. Die Verbindung der einzelnen Stufen (Lieferanten, Produzenten, Handel) erfolgt über spezialisierte Logistikdienstleister, sogenannte Logistics Service Provider (LSP).

Durch die Kooperation zwischen den einzelnen Partnern der Supply Chain kann beiden hier behandelten Problemen begegnet werden. Wildemann (2007) subsumiert unter den Begriffen der Prozess- und Durchlaufzeitreduzierung als eine der Leitlinien des SCM unter anderem auch die erhöhten Reaktionsmöglichkeiten auf Probleme und die Verringerung von Unsicherheiten in den Prozessen. Durch die Zusammenarbeit und koordinierte Übermittlung von Informationen ist sichergestellt, „dass Informationen, die an einem Ende der Kette erzeugt werden, die relevanten Adressaten zum richtigen Zeitpunkt und in der entsprechenden Form erreichen.“ (Wildemann 2007, S.

1725). Im Folgenden sollen eine neuere Entwicklung des SCM näher betrachtet werden, welche gut auf die vorliegende Problemstellung anwendbar ist: Das Supply Chain Event Management.

Das **Supply Chain Event Management** dient der Erfassung, Überwachung und Bewertung von Ereignissen innerhalb der Prozesse einer Supply Chain und der Reaktion auf vordefinierte Ereignisse, wobei die Reaktion aus verschiedenen einzelnen Maßnahmen bestehen kann (vgl. Nissen 2002, S. 477; Heusler et al. 2006). Das Konzept trägt damit dem erhöhten Bedarf an Informationen über Unregelmäßigkeiten und Störungen innerhalb der Supply Chain und deren Austausch Rechnung (vgl. Zimmermann & Paschke 2003). Als Ereignis werden vordefinierte Ergebnisse der gesamten Supply Chain, eines Teilprozesses oder einer einzelnen Aktivität bzw. Aufgabe sowie deren Planabweichungen verstanden (vgl. hier und im Folgenden Alvarenga & Schoenthaler 2003, S. 29). Ereignisse basieren auf Statusinformationen, die für einen bestimmten Informationsempfänger als relevant oder für den weiteren Verlauf der Prozesse als kritisch identifiziert wurden (vgl. Bretzke & Klett 2004, S. 147). Dabei wird zwischen Standardereignissen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit hoch ist, und Nichtstandardereignissen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit klein ist, unterschieden. Außerdem kann zwischen geplanten und ungeplanten Ereignissen differenziert werden. Für geplante Ereignisse existieren standardisierte Handlungsmaßnahmen, welche bei Eintreten des Ereignisses ausgeführt werden. Im Gegensatz dazu muss für ungeplante Ereignisse jedes Mal eine individuelle Lösung gefunden werden. Eine grundsätzliche Annahme ist, dass sowohl ungeplante Events als auch Nichtstandardereignisse schwieriger zu handhaben sind und deshalb höhere Kosten verursachen. Ereignisse führen dann zu einer Meldung (Event), wenn sie von dem geplanten Ablauf abweichen. Dazu müssen im Vorfeld Plandaten und Toleranzbereiche für Abweichungen definiert werden (vgl. Bretzke & Klett 2004, S. 151; Heusler et al. 2006, S. 21). Mögliche Arten von Meldungen sowie Beispiele dafür sind in Abbildung 5-1 aufgelistet.

Die Wirkungsrichtung einer Handlung als Reaktion auf ein Ereignis kann in zwei Richtungen zielen (vgl. Bretzke & Klett 2004, S. 152): Zum Einen kann lediglich das Event behandelt werden, so dass es zu einer Reaktion *innerhalb* der Supply Chain kommt. Zum Anderen können Maßnahmen eingeleitet werden, die *an* der Supply Chain Verbesserungen vornehmen sollen, um die zukünftige

Dimension	Beispiele
Zeit	Kommissionierdatum, Abfahrzeit LKW, Ankunftsdatum
Raum	Aktueller Aufenthaltsort LKW, Näherungsalarm (Geofencing)
Menge	Kommissionierte / Umgeladene / Empfangene Paletten
Qualitativ	Kühltemperaturen während des Transports, Zustand beim Umladen, Defekte Einheiten
Weiteres	Staus (Weiterleitung an andere Transporte)

Abbildung 5-1: Beispiele für Meldungen im SCEM

Eintrittswahrscheinlichkeit dieses oder eines ähnlichen Ereignisses zu senken. Nicht nur negative Ereignisse haben einen Informationswert, da positive Meldungen (z. B. das Eintreffen von Rohstoffen vor dem Liefertermin) Sicherheit schaffen und entscheidungstheoretisch das Fehlerrisiko auf null senken (vgl. ebenda, S. 149). Ein Beispiel für ein vordefiniertes Ereignis in der Supply Chain mit nachwachsenden Rohstoffen wäre die Überschreitung eines Lieferdatums für Rohstoffe beim Produzenten. Die Ereignisbehandlung könnte dann darin bestehen, automatisiert Rohstoffe aus anderen Quellen nachzukaufen oder die Produktionsplanung umzustellen bzw. anzupassen.

In Abbildung 5-2 ist der Ablauf des SCEM beispielhaft dargestellt. Wenn keine ungeplanten Ereignisse eintreten, dargestellt in der oberen Hälfte, so senden alle Stationen der Lieferkette ihre Statusmeldungen an das SCEM-System. Dieses registriert die Meldungen und prüft sie gegen die zeitlichen, vorher definierten, Terminbedingungen sowie gegebenenfalls weitere Planungen. Da die

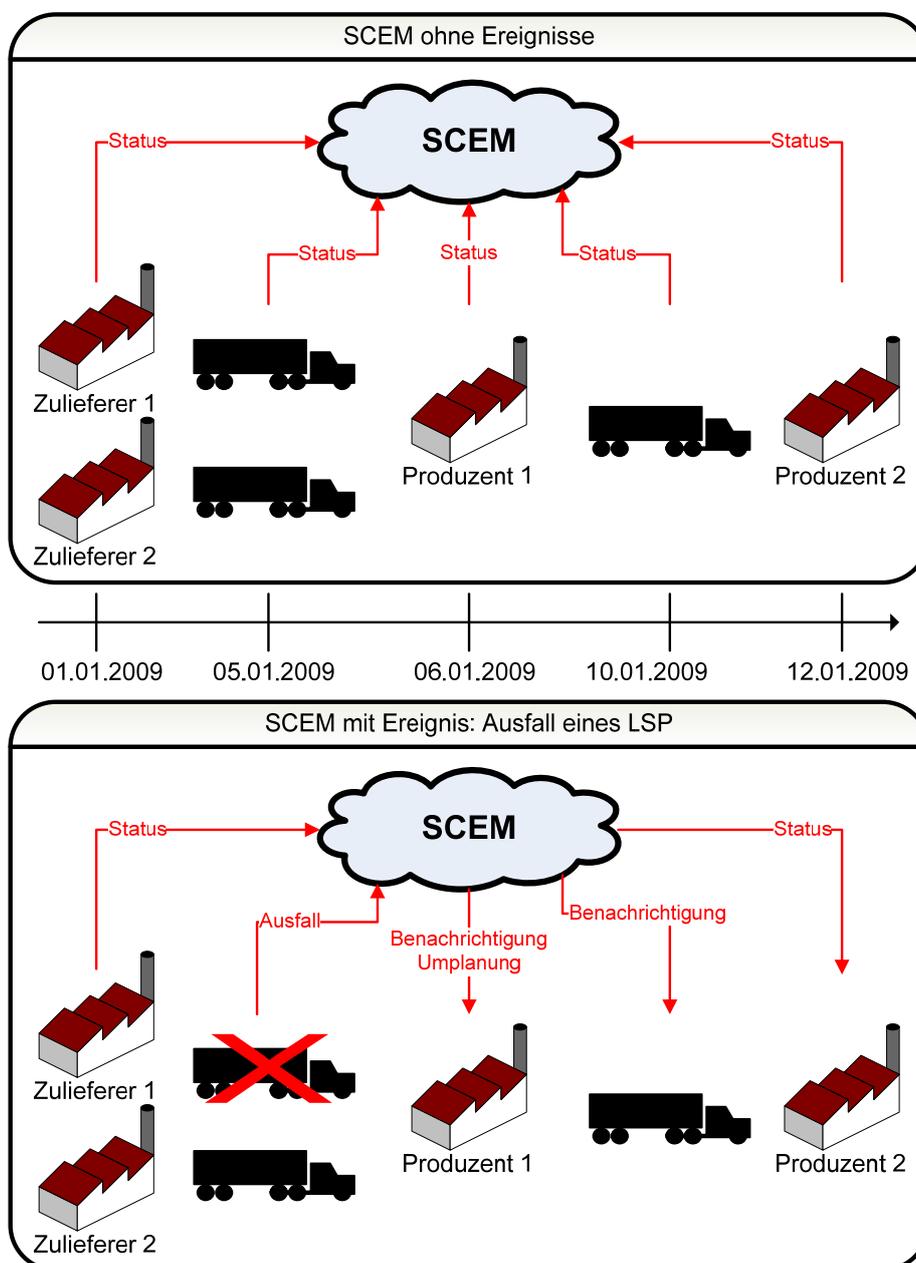


Abbildung 5-2: Schematischer Ablauf des SCEM

Termine eingehalten werden, liegen keinerlei Planabweichungen vor und das System gibt keine Warnmeldungen an die nachfolgenden Beteiligten aus. Wenn hingegen ein Transport des Logistic Service Providers (LSP) ausfällt, so wird dieser Ausfall an das SCEM-System gemeldet. Dieses bemerkt die Abweichung und die daraus resultierende Terminüberschreitung. Dieses Event wird an alle nachfolgenden Stationen der Lieferkette gemeldet, damit diese entsprechende Maßnahmen wie Verschiebung weiterer Transporte oder Anpassung der Produktionspläne vornehmen können.

Entwickelt wurden die Konzepte des SCEM, weil in modernen Supply Chains Unregelmäßigkeiten ein hohes Störungspotential aufweisen und zu Verzögerungen oder kompletten Produktionsausfällen führen können (vgl. Wieser & Lauterbach 2001, S. 65; Wildemann 2007, S. 1727). Dies bedingt sich vor allem bedingt in den Optimierungen des allgemeinen Supply Chain Managements wie z. B. der Just-In-Time oder kundenindividuellen Fertigung, der Elimination von Bestandspuffern sowie wenig oder gar keinen Lagerbeständen aus Kosten- und Effizienzgründen (vgl. Zimmermann & Paschke 2003, S. 1; Otto 2003, S. 2 f.; Heusler et al. 2006, S. 19). Die Unregelmäßigkeiten der Qualität oder Quantität treten, wie in den vorherigen Kapiteln bereits geschildert, im hier betrachteten Fall der nachwachsenden Rohstoffe verstärkt auf, so dass es sinnvoll erscheint, die Konzepte des SCEM näher zu betrachten. Die Ziele, welche durch den Einsatz bzw. die Anwendung des SCEM erreicht werden sollen, sind vielseitig. Es können aber zwei Hauptziele identifiziert werden, welche in der Literatur immer erwähnt werden: Zum Einen soll die Verzögerung zwischen den Zeitpunkten des Entstehens und des Bekanntwerdens von Problemen minimiert werden (vgl. Otto 2003, S. 3; Wieser & Lauterbach 2001, S. 65; Nissen 2002, S. 479; Bretzke & Klett 2004, S. 149), zum Anderen sollen zu diesen Problemen Handlungsalternativen aufgezeigt und wenn möglich automatisch umgesetzt werden (vgl. Wildemann 2007, S. 1727; Otto 2003, S. 3; Ötschmann & Rüggeberg 2003, S. 2). Je früher Probleme erkannt werden, desto größer ist der Handlungsspielraum der Entscheidungsinstanz für Korrekturmaßnahmen. Des Weiteren verstärkt der Informationsaustausch die Bindung der Supply Chain-Partner untereinander und fördert die Kollaboration. Wieser & Lauterbach sehen eine SCEM-Software als „Mittler zwischen Planung und Ausführung“ (2001, S. 65). Während die Planungen des SCM mittel- bis langfristig ausgelegt sind, erlaubt das SCEM durch die schnelle Reaktion auf plötzlich auftretende Probleme auch eine kurzfristige, spontane Planung und damit die konkrete Umsetzung der grundlegenden Strategie des übergeordneten SCM (vgl. Otto 2003, S. 3; Heusler et al. 2006, S. 19). Nach Alvarenga & Schoenthaler reagieren Unternehmen heutzutage nur auf Störungen, steuern diese aber nicht (2003, S. 30). SCEM kann die Problembehandlung von reaktivem auf proaktives Verhalten verbessern. Letztendlich integriert das SCEM als Teil der Überwachungsfunktion der Lieferkette auch das bekannte Tracking und Tracing (vgl. Zimmermann & Paschke 2003, S. 3; Wildemann 2007, S. 1727).

SCEM kann aus drei Perspektiven betrachtet werden: Als übergeordnetes Managementkonzept, als eigenständige Software oder als Softwaremodul (vgl. Otto 2003, S. 1). Durch die Anwendung als Managementkonzept soll vor allem das Ziel der Visibilitätserhöhung in der Supply Chain erreicht werden (vgl. Pahl et al. 2005, S. 80). Das Konzept schafft als übergeordnetes Paradigma die unternehmensübergreifende Grundlage für die konkrete Implementierung des SCEM als Software oder Softwaremodul. Die Mehrheit der Autoren sowie die Praxis sieht das SCEM allerdings nicht als

eigenständige Software, sondern als Teilmodul des Enterprise Resource Planning (ERP). So bietet beispielsweise die SAP AG Verfahren des SCEM im Supply Chain Modul an (vgl. Wieser & Lauterbach 2001). Alvarenga & Schoenthaler betonen, dass SCEM nicht die bloße Umsetzung eines Technologieprojekts sein sollte, sondern insbesondere die prozessbasierten Auswirkungen, also das Managementkonzept, von großer Bedeutung sind und zuerst betrachtet werden sollten (2003, S. 34). Ebenso führen Heusler et al. an, dass IT-Systeme nur unterstützende Funktionen haben und im Mittelpunkt „stets die organisatorisch-institutionelle Einbettung des Konzepts“ stehen sollte (2006, S. 23). Die grundlegenden Managementmaßnahmen lassen sich auch völlig ohne Softwareeinführung umsetzen, indem z. B. Pläne für die Ereignisbehandlung erstellt werden, um eine Standardisierung zu erreichen (vgl. Rohde 2004, S. 257; Alvarenga & Schoenthaler 2003, S. 31). IT liefert dann erst in einem weiteren Schritt Assistenzfunktionen wie Tracking & Tracing, Echtzeitbenachrichtigung oder automatisierte Ereignisbehandlung. Die Anforderungen, Funktionsweise und Abläufe im SCEM werden im Folgenden erläutert.

Der Begriff des SCEM wurde im Jahre 2000 erstmals von AMR Research verwendet, wobei folgende grundlegende Aufgaben und Anforderungen an ein SCEM-System definiert wurden (vgl. Bittner 2000, zitiert nach Bodendorf & Zimmermann 2005, S. 58; Wieser & Lauterbach 2001, S. 66; Nissen 2002, S. 477 - 478; Heusler et al. 2006, S. 22 f.):

- **Monitoring:** Das Beobachten der Supply Chain und das Identifizieren von relevanten Ereignissen in Form eines Ist-Soll-Abgleichs, Informationssammlung über aktuelle Status der Aufträge, Lieferungen, Produktion und weiteren zu beobachtenden Objekten in Echtzeit.
- **Notification:** Proaktive Benachrichtigung von Personen (zur manuellen Handlung und Entscheidungsfindung) oder IT-Systemen (zur automatischen Handlung, basierend auf im Vorfeld definierten Business Rules) in Echtzeit, um weitere Maßnahmen, in Abhängigkeit des eingetretenen Ereignisses, einzuleiten. Bei mangelnder Verantwortlichkeit oder fehlenden Entscheidungsbefugnissen kann die Meldung an höhere Ebenen eskaliert werden.
- **Simulation:** Das Auftreten von Ereignissen und die jeweiligen Reaktionen des Systems sollen durch Szenarien simuliert werden können, um die Entscheidungsfindung und Planung zu verbessern sowie ein Feedback bezüglich der existierenden Regeln zu bekommen (reagiert das System auf Ereignisse so, wie aus der Planung heraus gewünscht?).
- **Control:** Die Ereignisse sollen aufgrund definierter Entscheidungsregeln gesteuert werden können, dies geschieht entweder manuell mit dem SCEM als Entscheidungsunterstützungssystem oder automatisch.
- **Measurement:** Der „Erfolg“ der Supply Chain soll sowohl im Zeitvergleich als auch in Echtzeit messbar sein, dazu werden meist Key Performance Indicators oder der Zielerreichungsgrad im Soll-Ist-Vergleich verwendet.

Bodendorf & Zimmermann (2005) stellen als Schema für eine Softwareumsetzung ein agentenbasiertes SCEM vor. Dabei unterscheiden sie vier Agententypen, welche in Abbildung 5-3 dargestellt sind (vgl. auch Zimmermann & Paschke 2003). Der Discourse Agent stellt die Schnittstelle nach außen dar und

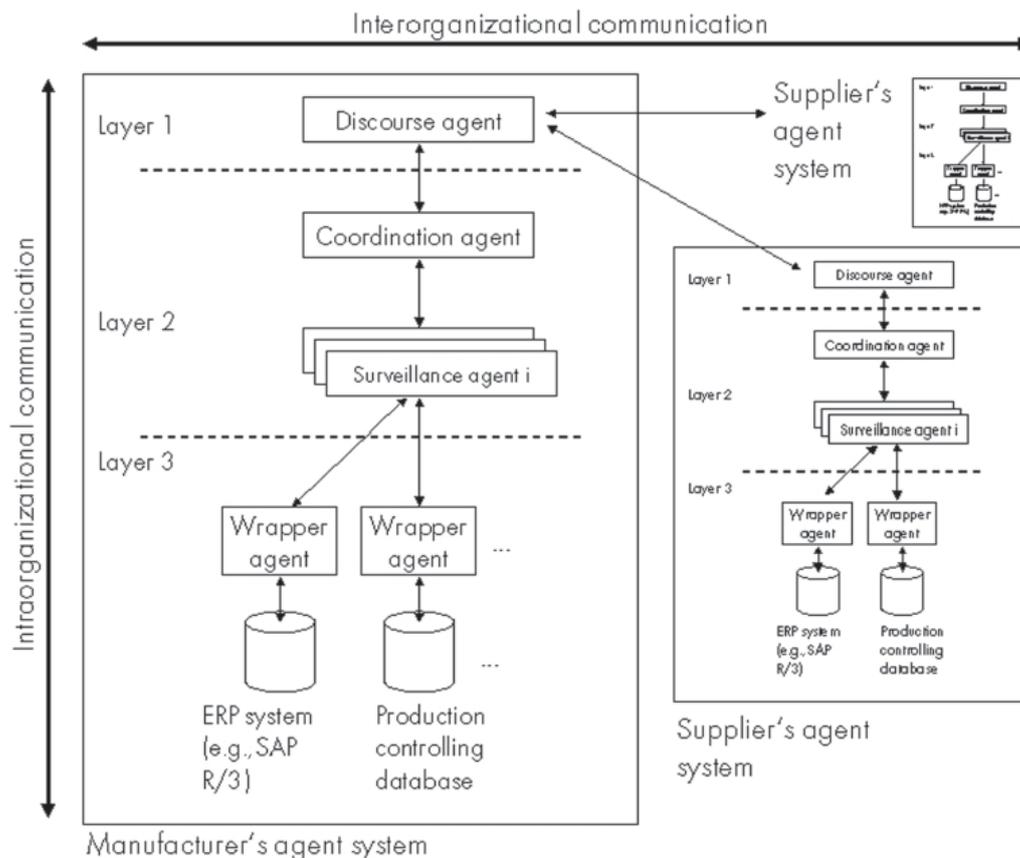


Abbildung 5-3: Agentenbasiertes SCEM (Zimmermann & Paschke 2005, S. 71)

übernimmt die Verhandlungen, den Datenabgleich und die sonstige Kommunikation mit anderen internen oder externen Softwaresystemen. Der Coordination Agent verwaltet und steuert die einzelnen Surveillance Agents, welche jeweils genau einen Auftrag überwachen. Der Wrapper Agent extrahiert letztendlich die benötigten Daten aus ERP-Systemen oder anderen Datenbanken. Durch die Wrapper Agents und die aktive Kommunikation mithilfe des Discourse Agents gelingt so ein proaktives SCEM, dass nicht nur auf Events und Statusmeldungen wartet, sondern selbsttätig nach Ihnen sucht. Im Gegensatz dazu verwendet die SAP AG in Ihrer Umsetzung einen Event Processor, der lediglich Nachrichten von anderen Systemen entgegennimmt (vgl. Wieser & Lauterbach 2001, S. 67). Die weitere Behandlung ähnelt aber dem Agentensystem, da auch hier die Daten an einen Manager übergeben werden, welcher für jeden einzelnen Auftrag ein eigenes Objekt verwaltet. Die Aufteilung in einzelne, unabhängig agierende Module erscheint deshalb vorteilhaft, weil so eine bessere Wartbarkeit und Lastverteilung erreicht werden kann (vgl. Bodendorf & Zimmermann 2005, S. 72). Außerdem erlaubt es so eine flexible Anpassung der nach außen agierenden Module oder Agenten an aufkommende Technologien wie Webservices oder RFID, ohne dass die inneren Kernkomponenten verändert werden müssen (vgl. Zimmermann & Paschke 2003, S. 6). Diese Aufteilung entspricht letztendlich dem Prinzip der klassischen Middleware, welche ebenfalls eine Komplexitätsreduktion zwischen verschiedenen Systemen bietet. Fox et al. (2000) beschreiben die Verwendung von Agenten für alle Funktionen einer Supply Chain. Unter anderem werden diese auch zur Produktionsplanung, Materialbestellung und Statusgenerierung während der Produktion sowie bei auftretenden Problemen genutzt. Durch Simulation kann das Verhalten der Agenten und somit des Gesamtsystems bei

Ausfällen geprüft werden (vgl. Fox et al. 2000, S. 183 - 185). Die proaktive Benachrichtigung anderer Agenten zur Behandlung von Problemen entspricht dem vorgestellten Konzept des SCEM und eignet sich nach Auffassung und Praxistests der Autoren gut für diese Problemstellung, da in den vorgenommenen Simulationen die gewünschten Ergebnisse erzielt werden konnten.

Doch welchen Nutzen birgt das SCEM für die Supply Chain von nachwachsenden Rohstoffen? Zunächst sorgen die übermittelten Daten über die komplette Supply Chain hinweg für eine verbesserte Informationsgrundlage oder schaffen diese gegebenenfalls erst. Des Weiteren werden durch die Monitoring-Funktion Probleme nicht nur sofort entdeckt, sondern auch an die betroffenen Partner weitergeleitet. Diese können ihre Produktionsplanung dann gegebenenfalls anpassen, Rohstoffe aus anderen Quellen zukaufen, ihrerseits die Probleme an nachgelagerte Partner kommunizieren (sofern diese nicht Teil der Supply Chain sind) oder weitere geeignete Maßnahmen ergreifen. Diese Maßnahmen können durch regelbasierte Expertensysteme vollautomatisch eingeleitet werden, so dass keine manuellen Eingriffe notwendig werden, welche andernfalls wiederum zu Verzögerungen führen könnten. Damit weist das SCEM eine sehr gute Eignung für die betrachtete Problemstellung auf, da Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden können. Gerade die Integration von Auto-ID-Verfahren wie RFID für Paletten, Container oder Fahrzeuge birgt großes Potential zur Automatisierung des gesamten SCEM. Allerdings muss beachtet werden, dass die Probleme typischerweise bereits bei der ersten Stufe, dem originären Rohstoffproduzenten, auftreten. Dieser kann Qualitätsprobleme feststellen und auch abweichende Mengen oder Lieferzeitpunkte abschätzen. Insofern ist es nicht zwingend erforderlich, dass die gesamte Supply Chain am SCEM teilnimmt, sondern es ist auch eine vereinfachte Variante denkbar, in der lediglich die erste Stufe alle weiteren Stufen informiert. Auf den nachfolgenden Stufen treten nur selten Probleme auf, welche Auswirkungen auf die Qualität oder Quantität haben. Es tauchen eher Probleme bezüglich der Zeit, wie Verzögerungen auf Ebene der LSPs, auf. Zwischen dem Rohstoffproduzenten und dem Empfänger können lediglich außergewöhnliche Ereignisse wie Diebstahl, schlechte Transportbedingungen oder Verderb, welcher allerdings wiederum durch zeitliche Verzögerungen entsteht, zu Qualitäts- und Quantitätsänderungen führen. Aus diesem Grund ist eine Vollimplementierung des SCEM über die gesamte Supply Chain zwar wünschenswert und birgt auch weitere Vorteile, zum Umgang mit den hier betrachteten Problemen ist sie aber nicht zwingend erforderlich. Es muss allerdings auch beachtet werden, dass gerade kleine und mittelständische Unternehmen oftmals keine oder nur grundlegende Methoden und Konzepte des Supply Chain Managements anwenden, so dass dort eine Einführung des spezialisierten Teilkonzepts SCEM nicht möglich und sinnvoll erscheint (vgl. Alvarenga & Schoenthaler 2003, S. 35).

Letztendlich können die gewonnenen Daten auch zur Bewertung der Lieferanten und Logistikdienstleister herangezogen werden, indem Kennzahlen wie Liefertreue, Lieferdauer und Qualitätskennzahlen gebildet werden. Basierend auf diesen Bewertungen kann die zukünftige Auswahl der Supply Chain Partner erfolgen. Außerdem können so Trends und systematische bzw. strukturelle Probleme innerhalb der Supply Chain erkannt und behoben werden (vgl. Nissen 2002, S. 477). Diese Kennzahlen spiegeln die bereits erwähnte Anforderung „Measurement“ wider. Bei einheitlicher Berechnungsweise kann auch ein Vergleich über verschiedene Supply Chains hinweg erfolgen, so dass Kennzahlen über Lieferanten und LSPs in einem Datenpool gespeichert und ausgetauscht werden können.

6 Fazit

In diesem Arbeitsbericht wurden Methoden und Verfahren dargestellt, die sowohl in der wissenschaftlichen Forschung als auch in der betrieblichen Praxis genutzt werden, um mit Unsicherheiten während der Produktionsplanung umzugehen. Unsicherheit wurde dabei in quantitative und qualitative Unsicherheiten unterschieden. Die Methoden und Verfahren wurden anschließend gezielt im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit bei der Produktionsplanung mit nachwachsenden Rohstoffen sowie deren speziellen Erfordernissen geprüft. Da bei nachwachsenden Rohstoffen viele externe Einflussfaktoren auf die Liefermenge und -qualität vorliegen, sind herkömmliche Verfahren wie die lineare, nicht-lineare und dynamische Optimierung im Hinblick auf die Mengenplanung nur schlecht anwendbar. Ein Einbezug der unsicheren Faktoren erfolgt hier nicht oder nur über Kapazitätenvektoren, welche lediglich Mengenrestriktionen der Inputfaktoren abbilden können. Der Übertrag der Pinch-Analyse aus den Ingenieurwissenschaften in die Wirtschaftswissenschaften scheint interessant, aber für eine komplexe Planung unzureichend. Dieses Verfahren eignet sich vor allem für eine Grobplanung und für die Simulation, da die Auswirkungen von Parameteränderungen schnell ersichtlich werden. Die statistischen Verfahren dienen als Grundlage zur Datenbereitstellung für alle anderen Methoden, sind aber auch selbstständig bei einfachen Fragestellungen anwendbar. Außerdem können mit statistischen Analysen Einflussfaktoren aufgedeckt werden, die dann zukünftig bei der Planung berücksichtigt werden können. Die stochastische Optimierung bezieht Zufallsvariablen explizit ein, welche bspw. mittels der statistisch gewonnen Datengrundlage bereitgestellt werden können. Die beste Eignung für den Umgang mit mengenbezogenen Unsicherheiten weist die Lagerhaltung, die alternative bzw. flexible Planung und die Fuzzy-Logik auf. Auch wenn die Lagerhaltung nur als reaktive Maßnahme zu sehen ist, so ist sie dennoch gängige Praxis zur Schaffung einer künstlichen Sicherheit in der betrieblichen

Verfahren	Nutzungsmöglichkeit	Eignung
Lagerhaltung	Lediglich Kompensation, typisches Vorgehen	Gut
Alternative und flexible Planung	Vorplanung, zeitliche Verschiebung der Entscheidung	Gut
Fuzzy-Logik	Abbildung menschlicher Ausdrücke, unsichere Werte	Gut
Statistische Verfahren und Forecasting	Datengrundlage, Auffinden von Einflussfaktoren	Mittel
Stochastische Optimierung	Zufallsvariablen, Determinisierung	Mittel
Lineare Optimierung	Kaum (fester Kapazitätenvektor)	Gering
Nicht-lineare Optimierung	Nur saisonale Einflüsse	Gering
Dynamische Optimierung	Nur saisonale Einflüsse, zeitliche Strukturen	Gering
Pinch-Analyse	Grobplanung, schnelle Anpassung	Gering

Abbildung 6-1: Eignung und Nutzung der untersuchten Methoden (Quantität)

Praxis. Ähnlich ist dies bei der alternativen Planung, bei der im Vorfeld verschiedene Szenarien entwickelt werden. Für diese Szenarien werden dann entsprechende Produktionsplanungsstrategien festgelegt. Die endgültige Entscheidung wird dann auf den Lieferzeitpunkt der Rohstoffe verschoben, wodurch eine zeitliche Verzögerung der Entscheidung hin zu einer Situation unter vollständigen Informationen stattfindet. Die Fuzzy-Logik hat ihre Einsatzmöglichkeiten bereits in zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten gezeigt, so scheint auch eine gute Eignung für die betrachtete Problemstellung vorzuliegen. Insbesondere die Formalisierung von menschlichen Ausdrücken und Urteilen ist im Hinblick auf Mitarbeiterwissen („tacit knowledge“ nach Polanyi 1958; Borghoff & Pareschi 1997, S. 836) sinnvoll verwendbar. Die Eignung der betrachteten Verfahren und Methoden ist in Abbildung 6-1 nochmals zusammengefasst.

Im Hinblick auf die qualitative Unsicherheit existieren nur wenig Verfahren, welche für diese Anwendung geeignet erscheinen. Die meisten qualitativen Unsicherheiten lassen sich in quantitative Unsicherheiten übertragen, wenn bspw. durch Ausschuss schlichtweg weniger Material zur Verfügung steht. Aus diesem Grund können die beiden Unsicherheitsarten nicht getrennt betrachtet werden, sondern auch bei Qualitätsminderungen können die oben beschriebenen Verfahren genutzt werden. Die statistischen Verfahren dienen auch hier wieder als Datengrundlage, um so die historischen Erfahrungen nutzen zu können und Wahrscheinlichkeiten für qualitativ bedingte Ausfälle abschätzen zu können. Zum Ausgleich kann ebenso die Lagerhaltung genutzt werden, was wiederum dem gängigen Vorgehen in Unternehmen entspricht. Die Vor- oder Nachbearbeitung von Rohstoffen ist sehr einzelfallabhängig, da viele technische, stoffliche und ökonomische Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Grundsätzlich erscheint dieses Verfahren als geeignet, seine tatsächliche Anwendbarkeit kann aber nicht für jeden Fall garantiert werden. Abbildung 6-2 fasst die Verfahren zum Umgang mit qualitativen Unsicherheiten nochmals zusammen.

Verfahren	Nutzungsmöglichkeit	Eignung
Lagerhaltung	Lediglich Kompensation, typisches Vorgehen	Gut
Statistische Verfahren und Forecasting	Datengrundlage, Auffinden von Einflussfaktoren	Mittel
Vor und Nacharbeit	Einzelfallabhängig, nicht standardisierbar	Mittel

Abbildung 6-2: Eignung und Nutzung der untersuchten Methoden (Qualität)

Zur Gewinnung neuer Erkenntnisse kann auch der Umgang mit Unsicherheiten in anderen Bereichen wie dem Risikomanagement von Banken untersucht werden. Anschließend muss geprüft werden, ob eine Übertragung dieser Ideen und Ergebnisse auf die Problemstellung der unsicheren Produktionsplanung erfolgen kann. Eine weitere Betrachtung kann innerhalb der Lebensmittelindustrie erfolgen, da dort Rohstoffe tierischen und pflanzlichen Ursprungs genutzt werden. Somit treten ähnliche Probleme mit der Qualität und Menge der Rohstoffe auf. Aus diesen Untersuchungen können unter Umständen neue Erkenntnisse für die industrielle Produktion mit nachwachsenden Rohstoffen abgeleitet werden.

Als kritischer Punkt ist vor allem die verfügbare Datengrundlage zu sehen, auf der die verschiedenen Verfahren und Methoden arbeiten. Je aktueller und genauer die Daten zu den Mengen und Qualitäten der zu erwartenden Rohstoffe vor dem Lieferzeitpunkt ist, desto genauer können die Planungen ausgeführt werden und umso zuverlässiger sind die damit erzeugten Produktionspläne. Aus diesem Grund erscheint ein umfassendes Supply Chain Management, bei dem die Lieferanten und originären Rohstoffproduzenten einbezogen werden, als zwingend notwendig. Hierbei ist insbesondere das Konzept des Supply Chain Event Managements vielversprechend, da neben herkömmlichen lieferbegleitenden insbesondere auch ereignisabhängige Daten generiert werden. Damit ist es möglich, Ereignisse mit Einfluss auf die Produktionsplanung frühstmöglich an das betroffene Unternehmen zu signalisieren. Die zentrale Fragestellung, welche hierbei in der zukünftigen wissenschaftlichen Forschung als auch im betrieblichen Alltag betrachtet werden muss, ist die Herkunft, Verwendbarkeit, Aktualität und Weiterleitung bzw. Integration der Daten. Es ist also zu klären, welche Daten an welcher Stelle der Supply Chain erhoben werden können und ob diese sinnvoll in der Produktionsplanung nutzbar sind bzw. dazu beitragen können, Unsicherheiten zu reduzieren oder im Idealfall sogar zu beseitigen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen kann letztlich geprüft werden, welche Unterstützungspotentiale durch IT-Systeme gegeben sind. Dabei ist zunächst an die Automatisierung der Datenerhebung, -aufbereitung und -übertragung zu denken, aber auch an die Auswertung ebendieser Daten. Auto-ID-Techniken wie RFID können bei der Erkennung und Verfolgung von Lieferungen helfen, die Anwendbarkeit dieser Technik sollte im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe aus fachlicher und ökonomischer Sicht untersucht werden. Als letzter Schritt muss die Integration der Daten und externen IT-Systeme in die PPS-Module des ERP-Systems beim produzierenden Unternehmen untersucht werden. Erst dieser Schritt ermöglicht letztendlich die vollständige, zeitnahe und automatische Aktualisierung von Produktionsplänen auf Basis der beschriebenen Daten. Nur so kann die Planung unter Zuhilfenahme aller verfügbaren Informationen, also der maximal erreichbaren Sicherheit, erfolgen.

Im Bereich der Agrar- und Forstwissenschaften oder auch der Materialforschung sollten die Einflussfaktoren auf Mengen- und Qualitätsschwankungen der nachwachsenden Rohstoffe erforscht werden. So könnten durch Betrachtung dieser Einflussfaktoren weitere Daten für die Produktionsplanung gewonnen werden, indem bspw. durch Umweltinformationssysteme gesammelte Daten zu Bodenqualitäten und Wetter für Prognosen genutzt werden. Bei Umweltinformationsdaten müssen ebenso wie bei Liefer- und Ereignisdaten die Verwendbarkeit und Nützlichkeit für die Produktionsplanung erforscht werden.

Literaturverzeichnis

- Adam 1996: Adam, D: Planung und Entscheidung: Modelle- Ziele- Methoden; mit Fallstudien und Lösungen, Gabler, Wiesbaden, 1996.
- Alvarenga & Schoenthaler 2003: Alverenga, C. A. & Schoenthaler, R. C.: A New Take on Supply Chain Event Management, in: Supply Chain Management Review (7) Nr. 2, 2003, S. 29 - 35.
- Backhaus et al. 2006: Backhaus, K. / Erichson, B. / Plinke, W. / Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden, Springer, Berlin [u. a.], 2006.
- Bauer 2006: Bauer, R. U.: Nachwachsende Rohstoffe, in: Petra Knecht [Hrsg.]: Technische Textilien, Deutscher Fachverlag, 2006.
- Bellmann 1957: Bellmann, R.: Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton 1957.
- Biermann et al. 2000: Biermann, U. / Friedt, W. / Lang, S. / Lühs, W. / Machmüller, G. / Metzger, J.O. / Rüschen. Klaas, M. / Schäfer, H.J. / Schneider, M.P.: Neue Synthesen mit Ölen und Fetten als nachwachsende Rohstoffe für die chemische Industrie, in: Angewandte Chemie (112) Nr. 13, 2000, S. 2292 - 2310.
- Bittner 2000: Bittner, M.: E-Business Requires Supply Chain Event Management: The Report on Supply Chain Management, AMR Research, Boston, 2000.
- Bloech et al. 2001: Bloech, J. / Bogaschewsky, R. / Götze, U. / Roland, F.: Einführung in die Produktion, Physica, Heidelberg 2001.
- Bodendorf & Zimmermann 2005: Bodendorf, F. & Zimmermann, R.: Proactive Supply-Chain Event Management with Agent Technology, in: International Journal of Electronic Commerce (9) Nr. 4, 2004, S. 57 - 89.
- Borghoff & Pareschi 1997: Borghoff, U. M. & Pareschi, R.: Information Technology for Knowledge Management, in: Journal of Universal Computer Science (3) Nr. 8, 1997, S. 835 - 842.
- Breitner 2008: Breitner, M. H.: Neuronales Netz, in: Kurbel, K. / Becker, J. / Gronau, N. / Sinz, E. / Suhl, L. [Hrsg.]: Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik, Online-Lexikon, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, <http://www.oldenbourg.de:8080/wi-enzyklopaedie>, 2008, abgerufen am 29.01.2010.
- Bretzke & Klett 2004: Bretzke, W.-R. / Klett, M.: Supply Chain Event Management als Entwicklungspotenzial für Logistikdienstleister, in: Beckmann, H. [Hrsg.]: Supply Chain Management, Springer, Berlin [u. a.] 2004, S.145 - 160.
- Cantor 1895: Cantor, G.: Beiträge zur Begründung der transfiniten Mengenlehre, in: Mathematische Annalen 46 (1895), S. 31.
- Carlson & Yano 1986: Carlson, R. C. & Yano, C. A.: Safety stocks in MRP-Systems with emergency setups for components, in: Management Science (32) Nr. 4, 1986, S. 403 - 412.

- Cescutti et al. 2006: Cescutti, G. / Schneider, T. / Bluhm, C.: Baumaterialien, Dämmprodukte und Möbel, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Cucchiella & Gastaldi 2006: Cucchiella, F. & Gastaldi, M.: Risk management in supply chain: a real option approach, in: Journal of Manufacturing Technology (17) Nr. 6, 2006, S. 700 - 720.
- DaimlerChrysler Communications 2008: DaimlerChrysler Communications: Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz S-Klasse, Stuttgart & Auburn Hills (USA), http://sustainability2008.daimler.com/daimler/annual/2008/nb/English/pdf/Umweltzertifikat_Mercedes-Benz_S-Klasse.pdf, 2008, abgerufen am 23.10.2009.
- Dantzig 1955: Dantzig, G.B.: Linear Programming under uncertainty, in: Management Science (1), 1955, S. 197 - 206.
- Deimling & Kaltschmitt (2000): Deimling, S. & Kaltschmitt, M.: Leitfaden Bioenergie : Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. FNR Gülzow, 2000.
- Domschke & Drexl 1991: Domschke, W. & Drexl, A.: Einführung in Operations Research, Springer, Berlin [u. a.] 1991.
- Evonik Industries o.J.: Leistungen - Strom und Wärme aus Biomasse, http://www.steag-saarenergie.de/de/02_Leistungen/02.php, o.J., abgerufen am 23.10.2009.
- Fabry 2004: Fabry, B.: Tenside: Eigenschaften, Rohstoffe, Produktion, Anwendungen, in: Chemie in unserer Zeit (25) Nr. 4, 2004, S. 214 - 222.
- FNR 2002 : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Energie aus Biomasse, FNR Gülzow, 2002.
- FNR 2007: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie, FNR Gülzow, 2007.
- FNR 2009a: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Basisinfo nachwachsende Rohstoffe, <http://www.nachwachsenderohstoffe.de/basisinfo-nachwachsende-rohstoffe.html>, 2009, abgerufen am 23.10.2009.
- FNR 2009b: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Biokraftstoffe, <http://www.biokraftstoffe.info/kraftstoffe.html>, 2009, abgerufen am 23.10.2009.
- Fox et al. 2000: Fox, M. S. / Barbuceanu, M. / Teigen, R.: Agent-Oriented Supply-Chain Management, in: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems (12), 2000, S. 165 - 188.
- Frost & Sullivan 2009: Frost & Sullivan: Chemische Industrie entdeckt nachwachsende Rohstoffe, <http://www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=164168196>, 2009, abgerufen am 23.10.2009.
- Gebhard 2009: Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit, Gabler, Wiesbaden 2009.
- Geldermann et al. 2007: Geldermann, J. / Ludwig, J. / Treitz, M. / Rentz, O.: Production planning by pinch analysis for biomass use in dynamic and seasonal markets, in: Proceedings 19th International Conference on Production Research 2007, Valparaiso (Chile).

- Glaser et al. 1992: Glaser, H. / Geiger, W. / Rohde, V.: PPS: Produktionsplanung und -steuerung : Grundlagen - Konzepte - Anwendungen, Gabler, Wiesbaden 1992.
- Guide et al. 2000: Guide, V.D.R. / Jayaraman, V. / Srivastava, R. / Benton, W.C.: Supply-Chain Management for Recoverable Manufacturing System, in: Interfaces (30) Nr. 3, 2000, S. 125 - 142.
- Goh et al. 2007: Goh, M. / Lim, J. Y. S./ Meng, F.: A stochastic model for risk management in global supply chain networks, in: European Journal of Operational Research (182) Nr. 1, 2007, S. 164 - 173.
- Grosche et al. 2003 : Grosche, G. / Ziegler, V. / Ziegler, D. [Hrsg.]: Taschenbuch der Mathematik Teil II, Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2003.
- Handfield & Nichols 1999: Handfield, R. B. & Nichols, E. L.: Introduction to Supply Chain Management, Prentice Hall, Upper Saddle River [u. a.] 1999.
- Hartmann & Kaltschmitt 2002: Hartmann, H. & Kaltschmitt, M.: Biomasse in Energiesystemen, in FNR: Nachhaltige Rohstoffe – Vielfalt aus 1001 Projektidee, 2002, S. 26 - 27.
- Heusler et al. 2006: Heusler, K. F./ Stölzle, W./ Bachmann, H.: Supply Chain Event Management – Grundlagen, Funktionen und potenzielle Akteure, in: WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium (1), 2006, S. 19 - 24.
- Ho 1989: Ho, C.-J.: Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness, in: International Journal of Production Research (27) Nr. 4, 1989, S. 1115 - 1135.
- Hofmann et al. 2006: Hofmann, F./ Kalies, M./ Schneider, S./ Scholwin, F./ Weber, M.: Elektrische Energie, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachhaltige Rohstoffe, Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Hoffmeister et al. 2006: Hoffmeister, C./ Schneider, T./ Müssig, J.: Textilien, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachhaltige Rohstoffe, Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Honsel 2009: Honsel, Gregor: Hanf an Bord. In: Technology Review, Oktober 2009, S. 72 - 73.
- Jung & Steinbuchel 2001: Jung, C. & Steinbuchel, A.: Bioplastik aus Nutzpflanzen: Palette der nachwachsenden Rohstoffe erweitert, in: Biologie in unserer Zeit (31) Nr. 4, 2001, S. 250 - 258.
- Kalies et al. 2006: Kalies, M./ Rommeiß, N./ Schneider, S./ Witt, J.: Thermische Energie, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachhaltige Rohstoffe, Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Koberstein 2008: Koberstein, A.: Stochastische Optimierung, in: Kurbel, K./Becker, J./Gronau, N./Sinz, E./Suhl, L. [Hrsg.]: Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik, Online-Lexikon, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, <http://www.oldenbourg.de:8080/wi-enzyklopaedie>, 2008, abgerufen am 23.10.2009.
- Kruse & Nauck 1996: Kruse, R. & Nauck, D.: Neuronale Fuzzy-Systeme, in: Konnektionismus und Neuronale Netze, GMD-Forschungszentrum Informatik GmbH, S. 157 - 170.

- Leible et al. 2001: Leible, L. / Kälber, S. / Nieke, E.: Nachwachsende Rohstoffe – Eine Zwischenbilanz, in: Grunwald, A. [Hrsg.]: ITAS 1999/2000 Jahrbuch des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe 2001, S. 25 - 41.
- Lenz & Weber 2006: Lenz, V. & Weber, M.: Schmier- und Verfahrensstoffe, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Li 2007: Li, Pu: Prozessoptimierung unter Unsicherheiten, Oldenbourg, München und Wien 2007.
- Li et al. 2003: Li, P. / Wendt, M. / Wozny, G.: Optimale Produktionsplanung für verfahrenstechnische Prozesse unter unsicheren Marktbedingungen, in: Chemie Ingenieur Technik (75) Nr. 7, 2003, S. 832 - 842.
- Nicolai et al. 1999: Nicolai, H. / Schotten, M. / Much, D.: Aufgaben, in: Luczak, H. & Eversheimer, W. [Hrsg.]: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte, Springer, Berlin [u. a.] 1999.
- Madanski 1960: Madanski, M.: Inequalities for stochastic linear programming problems, in: Management Science (6), 1960, S. 197 - 204.
- Minol & Sinemus 2004: Minol, K. & Sinemus, K.: Rohstoffe aus Designerpflanzen, in: mensch+umwelt spezial (17), 2004-2005, S. 39 - 44.
- Mula/Poler/Garcia 2006: Mula, J. / Poler, R. / Garcia, J. P.: MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach, in: Fuzzy Sets and Systems (157), 2006, S. 74 - 97.
- Müller-Langer et al. 2006: Müller-Langer, F. / Vogel, A. / Kaltschmitt, M. / Hofmann, F. / Scholwin, F. / Henke, J. / Schmitz, N.: Treibstoffe, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Müller-Sämann et al. 2002: Müller-Sämann, K.M. / Reinhardt, G. / Vetter, R. / Gärtner, S.: Nachwachsende Rohstoffe in Baden-Württemberg: Identifizierung vorteilhafter Produktlinien zur stofflichen Nutzung unter besonderer Berücksichtigung umweltgerechter Anbauverfahren, Karlsruhe 2002.
- Müller-Wondorf 2009: Müller-Wondorf, Rolf: Biorohstoffe florieren in der Industrie, in: VDI nachrichten Nr. 41, 2009, S. 9.
- Müssig et al. 2006a: Müssig, J. / Hoffmeister, C. / Schneider, T.: Faserverbundwerkstoffe und Formteile, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Müssig et al. 2006b: Müssig, J. / Hoffmeister, C. / Schneider, T.: Verpackungsprodukte, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Neumann 1977: Neumann, K.: Operations Research Verfahren, Band II, Carl Hanser, München 1977.
- Neumann & Morlock 1993: Neumann, K. & Morlock, M.: Operations Research, Hanser, Wien 1993.

- Nietsch 1993: Nietsch, T. / Rautenstrauch, C. / Rehfeldt, M. / Rosemann, M. / Turowski, K.: Ansätze für die Verbesserung von PPS-Systemen durch Fuzzy-Logik, in: Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Münster 1993.
- Nissen 2002: Nissen, V.: Supply Chain Event Management, in: Wirtschaftsinformatik (44) Nr. 5, 2002, S. 477 - 480.
- Nöthinger & Caluori 2009: Nöthinger, Markus & Caluori, Tobias: Wie der Klimawandel die Beschaffungskette beeinflusst, in: io new management Nr. 9, 2009, S. 16 - 20.
- Ötschmann & Rüggeberg 2003: Ötschmann, K. & Rüggeberg, C.: Events in der Supply Chain erfolgreich steuern, http://www.competence-site.de/downloads/49/4c/i_file_10252/Supply_Chain_Event_Management.pdf, 2003, abgerufen am 23.10.2009.
- Otto 2003: Otto, A.: Supply Chain Event Management: Three Perspectives, in: The International Journal of Logistics Management (14) Nr. 2, 2003, S. 1 - 13.
- Pahl et al. 2005: Pahl, J. / Voß, S./ Mies, A.: Supply Chain Integration: Improvements of global lead times with SCEM, in: Geldermann, J. / Treitz, M. / Schollenberger, H. / Rentz, O. [Hrsg.]: Challenges for Industrial Production, Workshop of the PepOn Project: Integrated Process Design for Inter-Enterprise Plant Layout Planning of Dynamic Mass Flow Networks, Karlsruhe, 2005, S. 79 - 88.
- Peters 2007: Peters, D.: Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2007.
- Petrovic et al. 1998: Petrovic, D. / Roy, R. / Petrovic, R.: Modelling and simulation of a supply chain in an uncertain environment, in: European Journal of Operational Research (109), 1998, S. 299 - 309.
- Polanyi 1958: Polanyi, M.: Personal Knowledge, The University of Chicago Press, Chicago 1958.
- Projektgruppe Bioenergiedörfer 2007: Projektgruppe Bioenergiedörfer: Bioenergiedörfer - Dörfer mit Zukunft, Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE) der Universität Göttingen, August 2007.
- Pujawan & Geraldin 2009: Pujawan, I. N. & Geraldin, L. H.: House of risk: a model für proactive supply chain risk management, in: Business Process Management Journal (15) Nr. 6, 2009, S. 953 - 967.
- Rohde 2004: Rohde, J.: Coordination and Integration, in: Stadler, H & Kilger, C. [Hrsg.]: Supply chain management and advanced planning, Springer, Berlin [u. a.] 2004, S. 245 - 257.
- Rommelfanger & Eickemeier 2002: Rommelfanger, H. J. & Eickemeier, S. H.: Entscheidungstheorie – Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen, Springer, Berlin [u.a] 2002.
- Ruppert et al. 2008: Ruppert, H. / Eigner-Thiel, S. / Girschner, W. / Karpenstein-Machan, M. / Roland, F. / Ruwisch, V. / Sauer, B. / Schmuck, P.: Wege zum Bioenergiedorf – Leitfaden, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2008.
- Siebert 1983: Siebert, Horst: Ökonomische Theorie natürlicher Ressourcen, Mohr, Tübingen 1983.

- Schmitz et al. 2006: Schmitz, N. / Kroth, E. / Steinhoff, B. / Grohs, B.: Pharma und Kosmetik, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2006.
- Scholl 2001: Scholl, A.: Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen- Konzepte und Methoden- experimentelle Untersuchungen, Birkhäuser, Basel 2001.
- Schürbüscher et al. 1992: Schürbücher, D. / Metzner, W. / Lempp, P.: Besondere Anforderungen an die Produktionsplanung und -steuerung in der chemischen und pharmazeutischen Industrie, in: Chemie Ingenieur Technik (64) Nr. 4, 1992, S. 334 - 341.
- Shobrys & White 2002: Shobrys, D. E. & White, D. C.: Planning, Scheduling and control systems: why cannot they work together, in: Computers and Chemical Engineering (26) Nr. 2, 2002, S. 149 - 160.
- Singhvi et al. 2003: Singhvi, A. / Madhavan, K. P. / Uday V. S.: Pinch Analysis for Production Planning in Supply Chains, in: Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations, Coral Springs (USA), 2003.
- Sinha et al. 2004: Sinha, P. R. / Whitman, L. E. / Malzahn, D.: Methodology to mitigate supplier risk in an aerospace supply chain, in: Supply Chain Management: An International Journal (9), Nr. 2, 2004, S. 154 - 168.
- Suhl 2008: Suhl, L.: Nichtlineare Optimierung, in: Kurbel, K. / Becker, J. / Gronau, N. / Sinz, E. / Suhl, L. [Hrsg.]: Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik, Online-Lexikon, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, <http://www.oldenbourg.de:8080/wi-enzyklopaedie>, 2008, abgerufen am 23.10.2009.
- Tang 2006: Tang, C. S.: Perspectives in supply chain risk management, in: International Journal of Production Economics (103) Nr. 2, 2004, S. 451 - 488.
- Tempelmeier 2003: Tempelmeier, H.: Tempelmeier, H.: Materiallogistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung und das Supply Chain Management, Springer, Berlin [u. a.] 2003.
- Tempelmeier 2006: Tempelmeier, H.: Materiallogistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen, Springer, Berlin [u.a.] 2006.
- Von Armansperg 2006: von Armansperg, M.: Chemie, in: meó consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen [Hrsg.]: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006.
- Wieser & Lauterbach 2001: Wieser, O. & Lauterbach, B.: Supply Chain Event Management mit mySAP SCM (Supply Chain Management), in: HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik Nr. 219, 2001, S. 65 - 71.
- Wildemann 2007: Wildemann, H.: Supply Chain Management, in: Köhler, R./Küpper, H./Pfungsten, A. [Hrsg.]: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2007, S. 1721 - 1730.

- Yano & Carlson 1987: Yano, C. A. & Carlson, R. C.: Interaction between frequency of rescheduling and the role of safety stock in material requirements planning systems, in: International Journal of Production Research Nr. 25 (2), 1987, S. 221 - 232.
- Zadeh et al. 1996: Zadeh, L. A. / Klir, G. J. / Yuan, B.: Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers, World Scientific, River Edge 1996.
- Zimmermann 1987: Zimmermann, H.-J.: Operations Research, Methoden und Modelle, Für Ingenieure, Ökonomen und Informatiker, Vieweg, Braunschweig 1987.
- Zimmermann & Paschke 2003: Zimmermann, R. & Paschke, A.: PAMAS – an agent-based supply chain event management system, in: In: Proceedings of Americas Conference on Information Systems, Tampa, 2003.
- Zsidisin 2003: Zsidisin, G. A.: Managerial Perceptions of Supply Risk, in: The Journal of Supply Chain Management (39) Nr.1, 2003, S. 14 - 25.