

EUROPA-UNIVERSITÄT VIADRINA

VORNAME NAME
Matrikelnummer

Dezentrale mehrstufige Losgrößenplanung mittels automatisierter Verhandlung

Bachelorarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science,
eingereicht am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere
Finanzwirtschaft und Kapitalmarkttheorie

Datum:

7. Oktober 2022

Gutachter:

Herr Professor Husmann

Studiengang:

Betriebswirtschaftslehre



Inhaltsverzeichnis

1	Die Problemstellung	2
1.1	Zentrale Produktionsstruktur im MLULSP	3
1.2	Individuelle Nutzenmaximierung	3
1.3	Mangel an Information	4
2	Hombergers Methode	5
2.1	Multi Level Uncapacitated Lot-Sizing Problem	5
2.1.1	Einflussgrößen	7
2.1.2	Nebenbedingungen	9
2.2	Verhandlungsphase	9
2.3	Kodier- und Dekodierverfahren	9
2.4	Konzept des Simulated Annealing	13
2.4.1	Startwahrscheinlichkeit	14
2.4.2	Abkühlungsverlauf	15
3	Vorstellung der Ergebnisse	15
3.1	Vergleichsbasis und quantitative Resultate	15
3.2	Alternativen und Ergebnisse neuer Verfahren	16
3.3	Kritik und Vorschläge für zukünftige Arbeiten	16

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht über alle relevanten Variablen	8
2	Der Verhandlungsprozess	10
3	Externer Bedarf in den Perioden t_1, t_2 und t_3	11
4	Erstes Dekodierungsbeispiel	11
5	Zweites Dekodierungsbeispiel	12

Abbildungsverzeichnis

1	Unternehmenskostenvergleich	4
2	Produktionsstruktur	7
3	Multimodale Funktion	13

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird das Problem untersucht, wie mehrere miteinander kooperierende Unternehmen zu einem einheitlichen und kostengünstigen Produktionsplan gelangen, ohne dabei Unternehmensinterna preisgeben zu müssen.¹ Während es bereits einschlägige zahlreiche Modellformulierungen zur Optimierung oder zumindest Approximation der optimalen Lösung eines kostengünstigen und zugleich komplexen Produktionsprogrammes gibt, sind erst in der jüngsten Literatur Vorschläge zur Lösung eines Systems mit mehreren Unternehmen unterbreitet wurden. Durch intensive Beschäftigung mit den Herausforderungen einer solchen Situation wird ein komplexes Verfahren vorgestellt, welches die Probleme eines gemeinsamen Produktionsprogrammes mehrerer Unternehmen angreift. Durch Ausnutzen von Heuristiken, einem speziell entwickeltem Kodiermechanismus und dem Einsetzen eines Mediators werden hierbei Lösungen auf Basis eines Multi Level Unconstrained Lot-Sizing Problems (MLULSP) generiert, die dann mit den optimalen oder bisher besten Lösungen, die für einen Ansatz mit lediglich einem zentralen Unternehmen erzeugt wurden, verglichen werden. Die Ergebnisse dieses Vergleiches zeigen, dass der neue Ansatz kompetitive Lösungen hervorbringt und lediglich kleinere Abweichungen von den besten Lösungen akzeptiert werden müssen. Für einen Teil der Vergleichstests konnten sogar bessere Ergebnisse, als bisher bekannt waren, erzielt werden. Im Gegensatz zur Arbeit Hombergers soll in diesem Artikel die Ausgangssituation und die Methodik genauer dargestellt werden. Die Testergebnisse finden sich somit in verkürzter Form wieder.

1 Die Problemstellung

Durch sich eine beständig globalisierende Welt, die stärkere Vernetzung von Strukturen und der zunehmenden Transparenz in der Wirtschaft, stehen Unternehmen vor großen und hochkomplexen Aufgaben. Die Supply Chain, also die Lieferkette, eines Unternehmens wächst in diesem Umfeld zu einer sehr feingliedrigen Kette und bringt stets neue Herausforderungen mit sich. Eine dieser Herausforderungen im Rahmen des Supply Chain Management ist die Koordination und das Zusammenarbeiten mit Schnittstellen, wie zum Beispiel den Zulieferern.² Die Herausforderung hierbei besteht insbesondere darin, zwei mitunter völlig unterschiedliche Produktionsstätten aufeinander abzustimmen, um international wettbewerbsfähig zu bleiben. Dabei bleibt aber zu beachten, dass die Unternehmen nicht als fiktives Gebilde, sondern vielmehr als Zusammenschluss von einzelnen Menschen zu sehen sind, die aus einer gemeinsamen Anstrengung heraus Ziele erreichen möchten. (North, 1990) Insofern steht auch hier das vorrangige Ziel der Nutzenmaximierung insbesondere der eigenen Wohlfahrt im Vordergrund. Das dennoch Kooperation stattfindet ist der Tatsache geschuldet, dass diese Individuen durch Transaktionen ihre persönliche Situation aufwerten wollen. (Söllner, 2007) Dieses Verhalten führt letztlich im Rahmen der Produktionskostenoptimierung dazu, dass die Entscheidungsträger in einem Unternehmen als eigennützig zu bezeichnen sind und Informationen über die

¹Der Artikel basiert grundsätzlich auf dem Paper von Homberger 2010 zum Thema “Decentralized multi-level uncapacitated lot-sizing” und soll eine auch weiterführende Literatur einbeziehende Einführung zum dort dargestellten Sachverhalt leisten.

²CSCMP Supply Chain Management Definitions <http://cscmp.org/aboutcscmp/definitions.asp>
Abrufdatum: 12. Dezember 2011

eigene Kostenstruktur nur teilweise oder gar nicht preisgeben möchten. (Chu and Leon, 2008) Da insbesondere der Ansatz eines MLULSP über eine zentralisierte Produktionsstruktur erfolgt, würde ohne vorherige Modifikation dieses effektive Mittel der kostenoptimalen Produktionsprogrammsteuerung seine Wirkung nicht entfalten können. Der Zweck des von Homberger verfolgten Modells besteht also vor allem darin, das Modell des MLULSP derart zu verändern, dass es sich den Herausforderungen der modernen Supply Chain stellen kann und die Schwierigkeiten, die sich aus dem Verhalten der Entscheider eines Unternehmens ergeben, bestmöglich zu lösen vermag. Die Auswirkungen der drei genannten Probleme sollen im Folgenden skizziert werden:

1.1 Zentrale Produktionsstruktur im MLULSP

Die grundlegende Annahme des klassischen MLULSP ist eine zentrale Produktionsstruktur. Solche zentralisierten Verfahren sind aber nur dann anwendbar, wenn verschiedene Voraussetzungen vorliegen. Dazu gehören unter anderem die Bereitschaft, einen zentralen Entscheider zu akzeptieren und die Offenlegung interner Produktionsinformationen. (s. Sektion 1.3) Somit können die Lösungen aus diesem Verfahren lediglich als hypothetische Lösungen betrachtet werden, die einen geeigneten Vergleich zu anderen Ansätzen formulieren. (Homberger, 2010) Weiterhin ist davon auszugehen, dass Ergebnisse, die durch einen dezentralisierten Ansatz verfolgt werden, generell als schlechter einzuordnen sind, als solche, die von zentralen Ansätzen ausgehen. (Albrecht et al., 2006) Homberger schreibt 2010 sogar, dass derartige Ansätze immer zu schlechteren oder höchstens gleichwertigen Lösungen im Vergleich mit der zentralisierten Variante führen. Vor allem die in den Sektionen 1.2 und 1.3 beschriebenen Probleme werden von ihm als Grund hierfür angeführt. (Homberger, 2010)

1.2 Individuelle Nutzenmaximierung

Im Rahmen der neoklassischen Wirtschaftstheorie werden Individuen als eigennützig angesehen. Sie handeln somit im eigenen Interesse und sind daran interessiert, ihren eigenen Nutzen zu steigern. Bereits 1776 schrieb Smith³:

Nicht vom Wohlwollen des Metzgers, Brauers und Bäckers erwarten wir das, was wir zum Essen brauchen, sondern davon, dass sie ihre eigenen Interessen wahrnehmen. (Hudson, 1976)

Insofern steht für den Einzelnen nicht die Optimierung einer Gruppe oder eines Gesamtnutzens im Vordergrund. Für eine optimale Ausnutzung der Vorteile einer Supply Chain jedoch wäre eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich. Denn eine Optimierung der individuellen Kostenstruktur innerhalb der Supply Chain führt nicht zwingend zu einer Optimierung der Gesamtkostenstruktur. Dies wird auch in Grafik 1 deutlich.

³1976 wurde dieses Zitat von Hudson wieder aufgegriffen.

Abbildung 1: Unternehmenskostenvergleich

	Problem	Lösung 1 Gesamtkosten: 760	Lösung 2 Gesamtkosten: 970	Lösung 3 Gesamtkosten: 740																											
Unternehmen 1	$d_{1,1} = 80$ $d_{1,2} = 100$ $d_{1,3} = 125$ $h_1 = 2$ $s_1 = 120$	Kosten für F1: 360 $t = 1 \quad t = 2 \quad t = 3$ <table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>80</td><td>100</td><td>125</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	1	1	80	100	125	0	0	0	Kosten für F1: 820 $t = 1 \quad t = 2 \quad t = 3$ <table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>305</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>225</td><td>125</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	305	0	0	225	125	0	Kosten für F1: 440 $t = 1 \quad t = 2 \quad t = 3$ <table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>180</td><td>0</td><td>125</td></tr> <tr><td>100</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	1	180	0	125	100	0	0
		1	1	1																											
80	100	125																													
0	0	0																													
1	0	0																													
305	0	0																													
225	125	0																													
1	0	1																													
180	0	125																													
100	0	0																													
Unternehmen 2	$h_2 = 1$ $s_2 = 150$	Kosten für F2: 400 $t = 1 \quad t = 2 \quad t = 3$ <table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>180</td><td>0</td><td>125</td></tr> <tr><td>100</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	1	180	0	125	100	0	0	Kosten für F2: 150 $t = 1 \quad t = 2 \quad t = 3$ <table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>305</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	305	0	0	0	0	0	Kosten für F2: 300 $t = 1 \quad t = 2 \quad t = 3$ <table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>180</td><td>0</td><td>125</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	1	180	0	125	0	0	0
1	0	1																													
180	0	125																													
100	0	0																													
1	0	0																													
305	0	0																													
0	0	0																													
1	0	1																													
180	0	125																													
0	0	0																													

Legende:

t	Periode	<table border="1"><tr><td>1</td></tr></table>	1	Eine Produktion findet statt
1				
$d_{1,t}$	Bedarf für Produkt 1 in Periode t	<table border="1"><tr><td>180</td></tr></table>	180	Produktionsmenge
180				
h_i	Inventarkosten für Produkt i	<table border="1"><tr><td>100</td></tr></table>	100	Inventarmenge am Ende der Periode
100				
s_i	Rüstkosten für Produkt i			

Diese Darstellung von Homberger 2010 gibt Übersicht über eine Situation, in der in verschiedenen Perioden Bedarfe für Endprodukte, zum Beispiel durch Kundenbestellungen, entstehen. Diese Endprodukte benötigen zur Herstellung je genau ein Vorprodukt, welches jedoch bei einem anderen Unternehmen hergestellt werden muss. Die Entscheider in den Unternehmen stehen nun vor der Aufgabe, die Produktionskosten minimal zu gestalten, indem sie entscheiden, ob und wieviel auf Lager produziert wird und ob eine Produktion stattfindet. Alle drei in der Grafik dargestellten Lösungen stellen dabei zulässige Lösungen des Produktionsverfahrens dar. Zulässig bedeutet hierbei, dass alle Bedarfe befriedigt werden. Handelt Entscheider 1 nun eigennützig, so wählt er die erste Lösung, da diese die geringsten lokalen Kosten in Unternehmen 1 verspricht. Entscheider 2 hingegen würde sich für Lösung 2 entscheiden. Die dritte Lösung, welche hinsichtlich der Gesamtkosten minimal ist, würde von keinem der Entscheider freiwillig gewählt werden.

1.3 Mangel an Information

Um sämtliche relevante Einflussgrößen (siehe Sektion 2.1.1) für das MLULSP bereitzustellen, sind die kooperierenden Unternehmen dazu aufgefordert, Unternehmensinterna preiszugeben. Insbesondere die Darlegung der Kostenstruktur des Unternehmens ist hierbei von besonderer Bedeutung. (Homberger, 2010) Die Offenlegung derartiger Informationen birgt jedoch eine Gefahr in sich, die in der Wirtschaftstheorie als Moral Hazard bezeichnet wird. Moral Hazard oder moralische Versuchung, moralisches Wagnis entsteht immer dann, wenn zwei oder mehrere Parteien Risiken

miteinander teilen und das individuelle Verhalten der Einzelnen das Ergebnis für Andere beeinflussen kann. (Holmström, 1979) Die Versuchung liegt insbesondere darin, dass das Verhalten der Einzelnen durch Andere grundsätzlich nicht bindend steuerbar ist und somit ein Ausnutzen der Abhängigkeit die Konsequenz sein kann. Im Zusammenhang mit dem MLULSP könnte bei Offenlegung und anschließendem Ausnutzen der Kosteninformationen des jeweils anderen Unternehmens nachträglich ein Moral Hazard Problem in der Form auftreten, dass ein Unternehmen neue Preisverhandlungen initiieren will, da beispielsweise die Margen zu hoch angesetzt waren. Dieses Risiko ist nur schwer quantifizierbar und stellt somit einen Grund für die Unternehmen dar, die Informationen über ihre Produktion, so wie vom zentralen MLULSP gefordert, nicht darzulegen.

2 Hombergers Methode

Die Methode von Homberger basiert auf einem dezentralen Ansatz, ein MLULSP (siehe Sektion 2.1) zu lösen. Das von Homberger entwickelte Verfahren stellt dabei eine spezielle Form der Automated Negotiation dar. Automated Negotiation, oder automatisierte Verhandlung, beschreibt allgemein einen dezentralen Ansatz, bei dem unterschiedliche Software-Agenten zur Lösung eines gemeinsamen zentralen Problems miteinander kooperieren. Dabei wird die Menge zulässiger Lösungen des Problems von den Agenten durchsucht und ein geeignetes Ergebnis herausgearbeitet. (Jennings, 2000) Der Agent ist dabei ein Individuum, welches als eigennutzenorientiert gilt und zudem Entscheidungsgewalt besitzt. Beispielhaft wäre im Zusammenhang mit einer Supply Chain also ein rechtsgeschäftlicher Unternehmensvertreter ein solches Individuum, welches als Agent auftritt. Ein in der Literatur bekannter, sehr effektiver und im Laufe der Forschung stark weiterentwickelter Mechanismus für die automatisierte Verhandlung wurde von Klein et al. 2002 beschrieben, auf den auch Homberger zurückgreift. (Klein et al., 2002) Eine dieser Weiterentwicklungen, der Fall der Mediated Negotiation, also Verhandlung mithilfe eines Vermittlers, wurde von Albrecht et al. 2006 eingeführt und stellt ein zentrales Element von Hombergers Verfahren dar. (Albrecht et al., 2006) Nicht nur das dort implementierte heuristische Verfahren des Simulated Annealing, also simuliertem Abkühlen, sondern auch der eingesetzte Mediator spielen in Hombergers Methode eine wichtige Rolle. Der Mediator stellt hierbei eine dritte neutrale Instanz dar, die den Agenten Angebote unterbreitet. Diese Angebote bestehen im Grunde aus verschiedenen Produktionsplänen, die zulässige Lösungen zum MLULSP darstellen. Die Agenten werten anschließend die Angebote des Mediators aus und lehnen diese ab oder stimmen zu. Falls beide Agenten zustimmen, gilt das Angebot des Mediators als Vertrag zwischen beiden Agenten, eine theoretische Lösung zum MLULSP ist somit gefunden. Da diese nicht zwangsläufig die optimale Lösung darstellt, wird dieses Verfahren mehrfach wiederholt, bis ein geeignetes Ergebnis hervorgebracht wird. Ob ein Vertrag als dauerhafte Lösung akzeptiert wird sowie die Güte des Ergebnisses hängen stark von verschiedenen Rahmenbedingungen (siehe Sektion 2.4) ab.

2.1 Multi Level Uncapacitated Lot-Sizing Problem

Das Multi Level Uncapacitated Lot-Sizing Problem wurde 1980 von Steinberg und Napier erstmalig formuliert. (Steinberg and Napier, 1980) Es beschreibt allgemein

den Zusammenhang zwischen den Kosten der Produktion mehrerer Güter und den dazugehörigen Inputfaktoren über den gesamten Planungshorizont. Dabei sind die relevanten Kerngrößen die Lagerkosten und die Rüstkosten. Beides kann durch den Unternehmer beeinflusst werden, indem er entscheidet, ob und wieviel von einem Produkt i in einer Periode t produziert wird. Das MLULSP berücksichtigt dabei ferner den für die Produkte zugrunde liegenden Produktionsplan inklusive aller relevanten Vorprodukte. Vorprodukte sind dabei solche Produkte, die zur Produktion eines nachgelagerten Produktes benötigt werden. Sie unterscheiden sich zu den Endprodukten auch dadurch, dass sie im Regelfall keinem direkten Bedarf unterliegen, sondern deren Bedarf von den Bedarfen der nachgelagerten Produkte abhängig ist. Zentrales Moment des MLULSP ist somit die Optimierung der Produktion anhand der Kosten über sämtliche Produktionsstufen. Dabei kann ein Produkt i aus mehreren Vorprodukten bestehen und wiederum für mehrere nachgelagerte Produkte Vorprodukt sein. Es unterliegt jedoch einigen grundlegenden sowie weiteren von Dellaert und Jeunet 2000 und Homberger 2010 für deren Modellformulierungen hinzugefügten Annahmen. (Dellaert and Jeunet, 2000) Diese sind:

1. Die Produktionsmaschinen können unbegrenzt viel produzieren
2. Es existieren lediglich abhängige Bedarfe für Vorprodukte
3. Der Grundinventarbestand ist 0
4. Die Produkte müssen nicht in einer bestimmten Reihenfolge produziert werden
5. Um ein Produkt i herzustellen ist jeweils genau ein Stück der Vorprodukte $j \dots l$ erforderlich

Das MLULSP ist somit eine Optimierungsaufgabe folgender Gestalt:

$$\min C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T s_i \cdot y_{i,t} + h_i \cdot l_{i,t} \quad s.t. \quad (1)$$

$$l_{i,t} = l_{i,t-1} + x_{i,t} - d_{i,t}, \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$d_{i,t} = \sum_{j \in \Gamma(i)} e_{i,j} \cdot x_{j,t+t_i} \quad \forall i = 1, \dots, N; \Gamma(i) \neq \emptyset; t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$x_{i,t} - M \cdot y_{i,t} \leq 0, \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$l_{i,t} \geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (5)$$

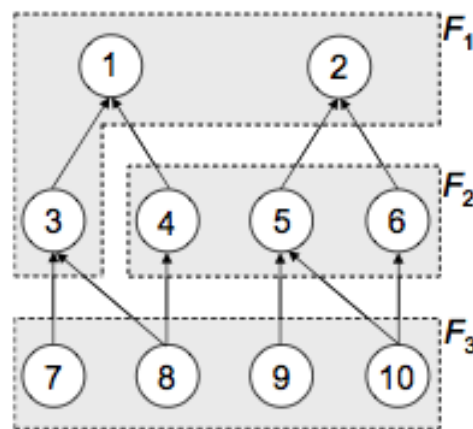
$$x_{i,t} \geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$y_{i,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (7)$$

Das lot-sizing Problem gilt in der Literatur dabei als NP-hard. (Brahimi et al., 2006) Ein solches Problem ist also nur mit großen polynomialen Zeitaufwand zu lösen, so dass für viele dieser Aufgabenstellungen keine optimalen Lösungen bislang bekannt sind. Dies ist der zentrale Grund für die Verwendung eines heuristischen Verfahrens, wie zum Beispiel das des Simulated Annealing aus Sektion 2.4. Bis heute

ist nicht geklärt, ob Probleme der Klasse NP-hard generell durch einen Algorithmus optimal gelöst werden können. Das in diesem Zusammenhang stehende P-NP-Problem, welches als eines der Millennium Probleme der Informatik gilt, verdeutlicht dies.⁴ Im Modell von Homberger wird der Produktionsplan innerhalb einer Supply Chain nun in der Form dargestellt, dass ein Überblick über den gesamten Produktionsverlauf vom Ausgangsprodukt in Unternehmen F_k über sämtliche Unternehmen F_k, \dots, F_n bis zu den Endprodukten gegeben wird. Besonderheit hierbei ist, dass sich das MLULSP aus Gleichung 1 nun zentral und unternehmensübergreifend auf alle Produktionsebenen bezieht. In Grafik 2 von Homberger (2011) wird dies noch einmal veranschaulicht. (Homberger and Gehring, 2011) Die Pfeile in der Grafik

Abbildung 2: Produktionsstruktur



erläutern dabei, in welche nachgelagerten Produkte das jeweilige Produkt einfließt. Die gesamten Produkte I werden weiterhin in n Teilklassen unterteilt. Jede Teilklassse k , wobei $k = 1, \dots, n$ gilt, ist einem Unternehmen zugeordnet. Das Unternehmen, welches die Produkte der Teilklassse k produziert wird also als F_k bezeichnet. Zu jedem einzelnen Unternehmen existiert ein Entscheider ag_k . Dieser Entscheider agiert im Sinne des Unternehmens eigennützig (vgl. Sektion 1.2) und minimiert die auf Unternehmensebene entstehenden Kosten analog folgender Funktion.

$$f_k = \sum_{i \in F_k} \sum_{t=1}^T s_i \cdot y_{i,t} + h_i \cdot l_{i,t} \quad (8)$$

Durch die Minimierung der Kosten aus den Teilklassen entsteht insgesamt keine Minimierung des übergeordneten MLULSP für die gesamte Supply Chain. (Homberger, 2010) Daher sind für eine effiziente Lösung einige weitere Anpassungen erforderlich.

2.1.1 Einflussgrößen

Das Modell des MLULSP inklusive seiner Nebenbedingungen enthält zahlreiche Variablen. Zur Erläuterung dieser soll Tabelle 1 dienen.

⁴vgl. hierzu <http://www.claymath.org/millennium/>

Tabelle 1: Übersicht über alle relevanten Variablen

Exogene Variablen	
N	Nummer des Produkts
I	Gesamtzahl der Produkte, $I = \{1, \dots, N\}$
R	Anzahl der Endprodukte ($R < N$)
T	Gesamtzahl der Perioden
$\Gamma(i)$	Alle Nachfolgeprodukte des Produktes i
$\Gamma^{-1}(i)$	Alle Vorgängerprodukte des Produktes i
s_i	Rüstkosten für das Produkt i (in Geldeinheiten)
h_i	Inventarkosten für das Produkt i in Geldeinheiten pro Produkt und Periode
$d_{i,t}$	Externer Bedarf für Endprodukte, ($\Gamma(i) = \emptyset$)
$e_{i,j}$	Menge des Produktes i um ein Produkt j herzustellen
t_i	Zeit, die benötigt wird, um ein Produkt i zu erlangen
M	Eine große Zahl

Endogene Variablen	
$x_{i,t}$	Produktionsmenge von i am Ende der Periode t
$l_{i,t}$	Inventarmenge des Produktes i am Ende der Periode t
$d_{i,t}$	Abhängiger Bedarf für ein Vorprodukt i , ($\Gamma(i) \neq \emptyset$)
$y_{i,t}$	Binärvariable, welche anzeigt, ob ein Produkt i in t produziert wird, $y \in \{0, 1\}$

2.1.2 Nebenbedingungen

Sämtliche Nebenbedingungen sind in den Gleichungen 2 bis 7 formuliert. Zusammenhang 2 beschreibt dabei den Inventarbestand. Sie stellt sicher, dass sich das Inventar über alle Perioden im Gleichgewicht befindet. Das Inventar in Periode t setzt sich also aus dem Inventarbestand der Vorperiode $t - 1$ mit der in dieser Periode produzierten Gütermenge abzüglich der Nachfrage nach diesem Produkt zusammen. Aus Gleichung 3 folgt, dass der Bedarf für ein Produkt i aus der Summe der Produktionsmengen der Produkte j ergibt, für das i Vorprodukt ist. Dabei wird zusätzlich die zur Herstellung von j benötigte Quantität $e_{i,j}$ von i berücksichtigt. Der Bedarf $d_{i,t}$ dieses Produktes heute ergibt sich weiterhin aus dem Bedarf des nachgelagerten Produktes j unter Berücksichtigung der Produktionszeit t_i , die für dieses nachgelagerte Produkt benötigt wird. Das Produkt i darf dabei nicht Endprodukt sein. Bedingung 4 besagt, dass wenn keine Produktion stattfindet, $y_{i,t}$ also 0 ist, keine Produktionsmengen $x_{i,t}$ entstehen. Es garantiert außerdem, dass Rüstkosten anfallen, sobald eine Produktion stattfindet. Die darauffolgenden Bedingungen 5 und 6 sind die Nichtnegativitätsbedingungen. Sie besagen, dass keine negativen Produktionsmengen oder Inventarbestände entstehen können. Die letzte Gleichung 7 bringt zum Ausdruck, dass die Entscheidung über eine Produktion nur zwei Ausgänge kennt, $y_{i,t} = 0$, wenn keine Produktion stattfindet oder $y_{i,t} = 1$, wenn eine Produktion stattfindet.

2.2 Verhandlungsphase

In den vorherigen Sektionen wurde erläutert, welches zentrale Problem mit dem MLULSP modelliert wird und wie die Agenten ag_k ihre lokalen Kosten optimieren. Um die Lücke zwischen zentralem MLULSP und dezentraler, lokaler Optimierung zu schließen wird im Verfahren von Homberger ein Mediator eingesetzt. Mit ihm soll erreicht werden, dass die Agenten trotz ihrer lokalen Perspektive das Gesamtproblem der Supply Chain ganzheitlich und umfassend lösen. Denn wie in Sektion 1 bereits beschrieben, ist es den Agenten nicht möglich in das Produktionsprogramm der jeweils anderen zu blicken. Der Mediator tritt dabei als Mittler zwischen den einzelnen Agenten auf und verhandelt mit diesen. Die Verhandlung findet mithilfe der folgenden in Tabelle 2 zu sehenden neun Schritte statt.

Ein Angebot c besteht dabei aus einem fix definiertem Produktionsschema für jeden Agenten. Es legt somit den gesamten Produktionsplan fest, also wann welches Gut produziert wird und wie lange es gelagert wird. Unter diesen Informationen können die Agenten leicht die daraus entstehenden Kosten im eigenen Unternehmen nachvollziehen. Ein darauffolgender, vom Mediator vorzuschlagender Vertrag c' soll anschließend aus der Nachbarumgebung von c erzeugt werden. Dieses Verfahren und wie dabei die geheimzuhaltenden Informationen der einzelnen Unternehmensstrukturen nicht publiziert werden ist der Sektion 2.3 zu entnehmen.

2.3 Kodier- und Dekodierverfahren

Eine zentrale Anforderung an eine Lösung für das Ausgangsproblem war es, dass Unternehmensinterna privat bleiben. Um dieser Forderung gerecht zu werden, sind die vom Mediator übermittelten Vertragsvorschläge c kodiert. Der in diesem Modell verwendete Kodier- und Dekodiermechanismus wurde von Homberger 2008 entwickelt.

Tabelle 2: Der Verhandlungsprozess

Schritt 1	Der Mediator erzeugt ein Angebot c , welches das Produktionsschema für jeden Agenten festlegt
Schritt 2	Ein Zähler wird erzeugt, der festhält, welche Verhandlungsrunde derzeit aktiv ist
Schritt 3	Die Agenten beurteilen die Verträge anhand ihrer individuellen Optimierung nach Gleichung 8
Schritt 4	Das Abkühlungsschema wird durch die Agenten festgelegt, vgl. hierzu Sektion 2.4
Schritt 5	Der Mediator sucht nun ein neues Angebot c' aus der direkten Umgebung des vorherigen Angebotes c und unterbreitet es den Agenten
Schritt 6	Die Agenten beurteilen dieses neue Angebot erneut anhand Gleichung 8
Schritt 7	Falls das Angebot von einem Agent akzeptiert wird, stimmt dieser mit 'ja'
Schritt 8	Haben alle Agenten mit 'ja' abgestimmt, wird dieser neue Vertrag c' zum Vertrag c , ansonsten wird direkt mit Schritt 9 fortgefahren
Schritt 9	Der Rundenzähler wird aktualisiert, die Verhandlung beginnt erneut bei Schritt 5

(Homberger, 2008) Ein Vertragsangebot wird demzufolge in einer $N \times T$ Bitmatrix übermittelt. Ein Matrixfeld der i -iten Produktionseinheit und t -ten Periode wird als $c_{i,t}$ bezeichnet. Diese Bitmatrix enthält lediglich die Werte 0 oder 1 in den jeweiligen Feldern in der Matrix. 1 steht dabei für das Zulassen einer Produktion eines Produktes i in einer Periode t . Beim Wert 0 in einem Feld der Matrix findet in dieser Periode keine Produktion des Gutes i statt. Dieser Wert $c_{i,t}$ sollte hierbei nicht mit der Variable $y_{i,t}$ verwechselt werden. Auch wenn $c_{i,t} = 1$ ist, gilt nicht automatisch $y_{i,t} = 1$, da $c_{i,t}$ lediglich darüber entscheidet, ob eine Produktion stattfinden kann.

Insgesamt lässt sich der Kodiermechanismus und Dekodiermechanismus in mehreren Schritten darstellen. Dies soll anhand des folgenden Beispiels deutlich gemacht werden. Gegeben seien ein Unternehmen F_1 und ein Unternehmen F_2 welche sich zur Produktion zweier voneinander unabhängiger Endprodukte zusammengeschlossen haben. Die beiden Endprodukte werden dabei ausschließlich in Unternehmen F_1 hergestellt. Zur Herstellung des Endproduktes $i = 1$ sowie für das Endprodukt $i = 2$ wird jeweils ein Vorprodukt $i = 3$ benötigt, welches ausschließlich in Unternehmen F_2 produziert werden kann. Unternehmen F_2 liefert somit Produkt 3 an Unternehmen F_1 , damit dieses beide Endprodukte herstellen kann. Alle Produkte können in der gleichen Periode hergestellt werden, in der sie in Auftrag gegeben werden. Dem Unternehmen F_1 hat nun folgenden, in Tabelle 3 zu sehenden, Bedarf an beiden Endprodukten, welcher beispielsweise aus Kundenaufträgen resultiert. Im Verfahren von Homberger übermittelt der Mediator nun die $N \times T$ Bitmatrix, deren Einträge $c_{i,t}$ zufällig erzeugt werden. In den Zeilen dieser Matrix finden sich somit die Produkte, in den Spalten die Perioden. In Tabelle 4 in Anlehnung an die Darstellung von Homberger 2008 findet sich eine solche Bitmatrix. (Homberger, 2008) Diese Matrix wird nun von den Unternehmen einzeln dekodiert. Der Eintrag $c_{1,3}$ beispielsweise

Tabelle 3: Externer Bedarf in den Perioden t_1, t_2 und t_3

Produkt 1	und	Produkt 2
15 0 30		0 30 40

signalisiert, dass in dieser Periode keine Produktion stattfinden soll. Ist in dieser Periode jedoch ein Bedarf vorhanden, wird dieser in die nächstmögliche vorhergehende Periode, in der eine Produktion nach Bitmatrix zulässig ist, verschoben. Weiterhin wird zur Dekodierung zeilenweise aufsteigend vorangegangen. Zunächst werden also die Produkte $i = 1$, dann $i = 2$ und so weiter bearbeitet. Für Endprodukte wird somit der Bedarf analog der externen Bedarfe ermittelt, für Vorprodukte anhand der Bedarfe für Endprodukte. Dabei wird jedoch berücksichtigt, ob dieses Endprodukt in dieser Periode produziert wird. Der Bedarf für das Vorprodukt ergibt sich somit als die Summe der Losgrößen der Nachfolgerprodukte $\Gamma(i)$. In unserem Beispiel ist der Bedarf $d_{3,2}$ somit $30 + 40 = 70$, da in Periode zwei Endprodukt 1 zu 30 Einheiten und Endprodukt 2 zu 40 Einheiten produziert werden soll. Die aufsteigende Bearbeitung der Bedarfsgrößen stellt sicher, dass für alle Produkte stets die zur Produktion notwendigen Vorprodukte vorhanden sind. In unserem Beispiel wird auch deutlich, dass nicht immer $c_{i,t} = y_{i,t}$ gilt. Die Bitmatrix schlägt in $c_{2,3}$ zwar eine Produktion vor, da in den Vorperioden jedoch bereits der gesamte Bedarf produziert wurde, findet in dieser Periode keine Produktion statt. Dieser Zusammenhang gewährleistet darüber hinaus auch, dass von der Auswertung der Bitmatrix nicht auf das Produktionsprogramm geschlossen werden kann. Es bleibt, wie gefordert, also geheim. Der Inventarbestand in unserem Beispiel errechnet sich aus Subtraktion des Bedarfs von der Losgröße plus den Inventarbestand vorhergehender Perioden. Diese Gleichung findet sich auch in Nebenbedingung 2 wieder.

Tabelle 4: Erstes Dekodierungsbeispiel

	Bitmatrix		Bedarf		Losgröße		Inventar
$c_{1,t}$	1 1 0	$d_{1,t}$	15 0 30	$x_{1,t}$	15 30 0	$l_{1,t}$	0 30 0
$c_{2,t}$	1 1 1	$d_{2,t}$	0 30 40	$x_{2,t}$	0 30 40	$l_{2,t}$	0 0 0
$c_{3,t}$	1 1 0	$d_{3,t}$	15 60 40	$x_{3,t}$	15 100 0	$l_{3,t}$	0 40 0

Mithilfe der nun dekodierten Bitmatrix können die Unternehmen ihre Kosten anhand Gleichung 8 ermitteln. Dabei wird in unserem Beispiel angenommen, dass $s_1 = 20, s_2 = 10, s_3 = 15, h_1 = 2, h_2 = 3$ und $h_3 = 6$. Es entstehen somit folgende Kosten auf Unternehmensebene.

$$\begin{aligned}
 C_1^1 &= \sum_{i \in F_1} \sum_{t=1}^T s_i \cdot y_{i,t} + h_i \cdot l_{i,t} \\
 C_1^1 &= 20 \cdot 1 + 20 \cdot 1 + 20 \cdot 0 + 10 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 10 \cdot 0 + \\
 &\quad 2 \cdot 0 + 2 \cdot 30 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 30 + 3 \cdot 40 + 3 \cdot 0 \\
 C_1^1 &= 330
 \end{aligned}$$

$$C_2^1 = \sum_{i \in F_2} \sum_{t=1}^T s_i \cdot y_{i,t} + h_i \cdot l_{i,t}$$

$$C_2^1 = 15 \cdot 1 + 15 \cdot 1 + 15 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 6 \cdot 0$$

$$C_2^1 = 30$$

Die Gesamtkosten der Produktion betragen somit $C_1^1 + C_2^1 = 330 + 30 = 360$. Im Konzept von Homberger würde dieser Vertrag c nun zunächst in einer ersten Verhandlungsrunde angenommen werden. Anschließend erfolgt die nachfolgende Runde, in der ein neues Verhandlungsangebot c' vom Mediator übermittelt wird. Dieses soll dabei aus der Nachbarschaft von c kommen. (Homberger, 2008) Um dies zu gewährleisten, darf sich beim Angebot c' im Vergleich zu c lediglich ein Bit aus der Bitmatrix ändern. In unserem Beispiel schlägt der Mediator den beiden Unternehmen nun das in Tabelle 5 zu sehende Vertragsangebot in Form der Bitmatrix vor. Es stammt aus der Nachbarschaft von c , da lediglich $c_{2,2}$ verändert wurde. Der Dekodierungsprozess findet nun erneut statt und ist in Tabelle 5 illustriert.

Tabelle 5: Zweites Dekodierungsbeispiel

	Bitmatrix			Bedarf			Losgröße			Inventar					
$c_{1,t}$	1	1	0	$d_{1,t}$	15	0	30	$x_{1,t}$	15	30	0	$l_{1,t}$	0	30	0
$c_{2,t}$	1	0	1	$d_{2,t}$	0	30	40	$x_{2,t}$	30	0	40	$l_{2,t}$	30	0	0
$c_{3,t}$	1	1	0	$d_{3,t}$	45	30	40	$x_{3,t}$	45	70	0	$l_{3,t}$	0	40	0

Die Unternehmen kalkulieren daraufhin erneut ihre individuellen Kosten.

$$C_1^2 = \sum_{i \in F_1} \sum_{t=1}^T s_i \cdot y_{i,t} + h_i \cdot l_{i,t}$$

$$C_1^2 = 20 \cdot 1 + 20 \cdot 1 + 20 \cdot 0 + 10 \cdot 1 + 10 \cdot 0 + 10 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 2 \cdot 30 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 30 + 3 \cdot 0 + 3 \cdot 0$$

$$C_1^2 = 210$$

$$C_2^2 = \sum_{i \in F_2} \sum_{t=1}^T s_i \cdot y_{i,t} + h_i \cdot l_{i,t}$$

$$C_2^2 = 15 \cdot 1 + 15 \cdot 1 + 15 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 6 \cdot 0$$

$$C_2^2 = 30$$

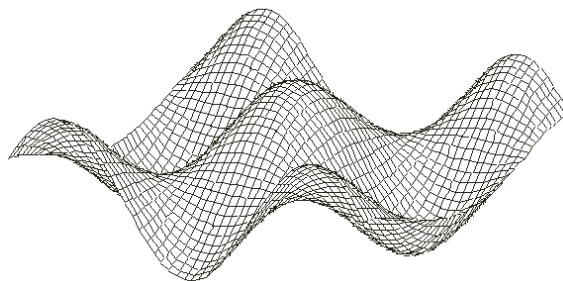
Es ist nun im Vergleich zur ersten Vertragssituation zu erkennen, dass die Gesamtkosten auf $C_1^2 + C_2^2 = 210 + 30 = 240$ gesunken sind. Doch obwohl dies insgesamt eine stark verbesserte Situation darstellt, ist nicht klar, ob diese Lösung auch akzeptiert wird. Denn der Kostenrückgang war lediglich bei Unternehmen 1, nicht aber bei Unternehmen 2 spürbar. Unternehmen 2 ist also indifferent zwischen beiden Angeboten und stimmt nicht eindeutig mit ja zu dem Angebot. Denkbar sind auch Situationen, bei denen sich Unternehmen 2 leicht verschlechtert, die Gesamtkosten sich aber insgesamt stark verbessern. Damit derartige Lösungen auch akzeptiert werden, ist ein Konzept zu integrieren, welches die Unternehmen dazu bringt, auch schlechtere Lösungen zu akzeptieren. Dieses findet sich in Sektion 2.4 wieder.

2.4 Konzept des Simulated Annealing

Da insbesondere bei großen Produktionsprogrammen also auch vielen Perioden das MLULSP ein Problem darstellt, welches NP-hard ist, ist ein heuristisches Verfahren für dessen Lösung angemessen. Dieses überprüft zwar nicht sämtliche mögliche Lösungen, begibt sich jedoch über einen gewissen Zeitraum auf die Suche nach dieser. Weiterhin ist es notwendig, dass die Unternehmen auch Vertragsvorschläge c' akzeptieren, die schlechter als die bisherige individuelle Lösung für sie sind. Wäre dies nicht der Fall, würde der Verhandlungsprozess sehr schnell beendet sein. (Fink, 2004)

Kuik und Salomon waren die ersten, die das heuristische Verfahren des Simulated Annealing auf eine Produktionsprogrammplanung anwendeten. (Kuik and Salomon, 1990) Sie beschreiben dabei das heuristische Verfahren des Simulated Annealing als iteratives Verfahren, welches dazu dient, von einer aktuellen Lösung zu einer benachbarten Lösung zu gelangen. Dies habe vor allem den Grund, dass die aktuelle Lösung lediglich ein lokales Minimum der Funktion darstellt. Das übergeordnete Ziel ist es jedoch, ein globales Minimum der Funktion zu finden. Um dies zu erreichen ist es notwendig, Abweichungen vom aktuellen Ergebnis zu erlauben, die das Ergebnis zunächst verschlechtern. (Kuik and Salomon, 1990) Denn oftmals ist es bei multimodalen, also mehrgipfligen, Funktionen notwendig, zunächst einen Gipfel zu verlassen, um zu einem eventuell höheren zu gelangen. Ein Beispiel für eine solche Funktion findet sich in folgender Grafik.⁵

Abbildung 3: Multimodale Funktion



Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wird eine Übertragungsregel geschaffen, die erlaubt, mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auch Verschlechterungen anzunehmen. Damit der Prozess jedoch auch zu einem Ende findet, enthält dieser eine Temperaturvariable, die sich mit der Zeit abkühlt. Diese Abkühlung bewirkt, dass die Wahrscheinlichkeit, einen schlechteren Funktionswert zu akzeptieren, mit der Zeit abnimmt. Mit welcher Geschwindigkeit diese Abkühlung stattfindet, wird in Sektion 2.4.2 beschrieben. Das Akzeptanzkriterium, also mit welcher Wahrscheinlichkeit auch Verschlechterungen akzeptiert werden, wird dabei als Metropolis Kriterium bezeichnet. Dieser in der Literatur als Metropolis-Algorithmus

⁵<http://home.arcor.de/guido.schluckebier/studien/gfx/22funktion.png>, abgerufen am 04.01.2012

bekannte Terminus wurde von Metropolis et al. 1953 entwickelt und ist ursprünglich als Abkühlungsmechanismus von Feststoffen dargestellt worden. (Metropolis et al., 1953) Im Modell von Homberger ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein besserer oder schlechterer Vertrag angenommen wird, der Agent also mit ja stimmt, folgendermaßen definiert, wobei nr die Nummer der Runde darstellt.

$$P_k(c, c', nr) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } f_k(c') \leq f_k(c) \\ \exp\left(\frac{f_k(c) - f_k(c')}{T_{nr}^k}\right) & \text{sonst} \end{cases} \quad (9)$$

Aus der Gleichung ist zu erkennen, dass eine durch den neuen Vertrag c' erzeugte Verbesserung der individuellen Unternehmenskosten immer dazu führt, dass der Vertrag angenommen wird. Die Wahrscheinlichkeit der Annahme ist also 1. Falls eine Verschlechterung eintritt kann es dennoch dazu kommen, dass der Vertrag angenommen wird. Dabei spielt die Stärke der Verschlechterung $f_k(c) - f_k(c')$ eine Rolle in der Form, dass weitreichende Verschlechterungen zu einer geringen Annahmewahrscheinlichkeit führen. Außerdem spielt die Temperatur T_{nr}^k eine wichtige Rolle. Sie repräsentiert eine Variable, die mit fortschreitender Runde zunehmend an Wert verliert, beziehungsweise abkühlt. Durch das Verringern dieses Wertes im Zeitablauf wird gewährleistet, dass die iterative Suche mithilfe des Simulated Annealing ein zeitlich angemessenes Ende finden kann. Der Term $\exp\left(\frac{f_k(c) - f_k(c')}{T_{nr}^k}\right)$ nimmt im Zeitablauf also ab, so dass die Wahrscheinlichkeit einer Annahme gegen 0 strebt. Dabei stellt sich jedoch die Frage, welchen Wert T_{nr}^k in der ersten Runde haben soll und wie der Prozess der Abnahme der Temperatur verlaufen soll. Beide Fragen werden in den folgenden Sektionen geklärt.

2.4.1 Startwahrscheinlichkeit

Die Startwahrscheinlichkeit P_{init} , also die anfängliche Wahrscheinlichkeit, mit der auch eine Verschlechterung des Vertrages in Kauf genommen wird, ist ein wesentlicher aber gleichzeitig frei zu wählender Parameter des Modells. Die Agenten selbst würden freiwillig diese Wahrscheinlichkeit mit 0 festlegen, da eine negative Abweichung keinen individuellen Nutzen hervorbringt. (vgl. Sektion 1.2) Daher müssen die Agenten mit einer bindenden, also erzwungenen, Anfangswahrscheinlichkeit ausgestattet werden. (Fink, 2004) Um den Term $\exp\left(\frac{f_k(c) - f_k(c')}{T_{nr}^k}\right)$ eine solche Wahrscheinlichkeit zuzuordnen, kann ausschließlich der Parameter T_0^k angepasst werden. Um von einer selbst gewählten Startwahrscheinlichkeit zu einem entsprechenden T_0^k zu gelangen sind nach Fink folgende Schritte notwendig: (Fink, 2006)

1. Ein Versuchslauf mit lediglich einem Agenten und weniger Runden wird durchgeführt
2. Vom Mediator vorgeschlagene Verträge werden nur angenommen, wenn keine negative Abweichung vom vorherigen Vertrag vorliegt
3. Die Entscheidungen der anderen Unternehmer werden lediglich simuliert.

Nun sei m_1^k die Menge der nicht negativ abweichenden Verträge und m_2^k die Menge der negativ abweichenden Verträge. Eine zu m_2^k gehörige negative Abweichung wird mit Δ_j^k bezeichnet, wobei $j = 1, \dots, m_2^k$. Anschließend wird T_0^k mithilfe eines iterativen Verfahrens aus folgender Gleichung gewonnen:

$$P_{init} = \frac{m_1^k + \sum_{j=1}^{m_2^k} \exp\left(\frac{\Delta_j^k}{T_0^k}\right)}{m_1^k + m_2^k} \quad (10)$$

Es ist zu beachten, dass für jeden Agenten diese Prozedur erneut durchgeführt werden muss, da jeder Agent ein individuelles T_0^k erhält, da seine Kostenstruktur und somit auch die Menge der akzeptierten, bzw. abgelehnten Verträge individuell sind.

2.4.2 Abkühlungsverlauf

Homberger stellt 2010 insgesamt drei Prozeduren vor, wie sich die Temperatur T_{nr}^k im Zeitablauf verändern, beziehungsweise abkühlen soll. (Homberger, 2010) Diese Vorgehensweise ist ebenso frei wählbar. Gemeinsam haben alle Vorgehensweisen, dass T_{nr}^k mit zunehmender Rundenanzahl an Wert verliert. Es werden dabei der lineare, der geometrische und der logarithmische Abkühlungsmechanismus unterschieden. Sie differieren prinzipiell lediglich in der Geschwindigkeit der Abnahme der Temperatur in verschiedenen Rundenphasen. Der geometrische beispielsweise verliert zu Beginn schneller an Wahrscheinlichkeitsmasse als der lineare. Insgesamt gibt es jedoch keinen optimalen Abkühlungsverlauf, die Stärke der einzelnen Prozeduren ist stets vom zu untersuchenden Problem abhängig.

3 Vorstellung der Ergebnisse

Homberger konnte mit seinem neu entwickelten Verfahren Ergebnisse erzielen, die den optimalen oder besten bekannten Lösungen teilweise sehr Nahe kamen. Mithilfe dieses Verfahrens ist es also möglich, eine Supply Chain unter den gegebenen Voraussetzungen effizient zu gestalten. Das verwendete heuristische Verfahren konnte für einige der Probleminstanzen im Ein-Agenten-Fall, also aus zentraler Perspektive, sogar bessere Ergebnisse hervorbringen, als sämtliche bis dahin in der Literatur bekannte Verfahren.

3.1 Vergleichsbasis und quantitative Resultate

Zum Überprüfen der Qualität des Modells benutzt Homberger die in der Literatur oft verwendeten 176 Probleminstanzen, die sich zum Beispiel durch verschiedene externe Bedarfe unterscheiden. Dellaert und Jeunet (2000), Pitakaso et al. (2007) sowie Homberger und Gehring (2009) greifen in ihren Aufsätzen ebenso auf diese zurück. (Dellaert and Jeunet, 2000), (Pitakaso et al., 2007), (Homberger and Gehring, 2009) Die Probleminstanzen können weiterhin in drei Klassen unterteilt werden, je nach Anzahl ihrer Perioden und der Anzahl ihrer Produkte. Vor allem aber geben diese drei Klassen aufsteigend ihren Komplexitätsgrad wieder. Während für Klasse 1 noch optimale Lösungen bekannt sind, sind für die Probleme in Klasse 3 lediglich beste bekannte und keine optimalen Lösungen bekannt. Den einzelnen Problemstellungen

werden von Homberger nun Unternehmen zugeordnet, die auf verschiedenen Produktionsebenen tätig sind. Auch werden Inventarkosten und Rüstkosten entsprechend zugeordnet. Anschließend testet Homberger die verschiedenen Einflussgrößen wie die Wahl des Abkühlungsverlaufes, die maximale Verhandlungsrundenanzahl oder die Startwahrscheinlichkeit P_{init} . Dabei fand Homberger heraus, dass mit steigender Anzahl Agenten es sinnvoll ist, die Startwahrscheinlichkeit P_{init} zu erhöhen. Außerdem scheint es eine positive Korrelation bezüglich der Ergebnisqualität zwischen der maximalen Verhandlungsrundenanzahl und der Komplexität des Problems zu geben.

Nach Festlegung der oben genannten besten Wahlparameter erzeugten die Ergebnisse von Homberger im zentralen, Ein-Agenten-Fall für 24 der Probleme neue beste bekannte Lösungen. Die Lösungen im Mehragentenfall lagen jedoch hinter den besten bekannten Lösungen zurück, was a priori jedoch bereits anzunehmen war. Basierend auf der Arbeit von Dudek und Stadtler ist generell von einer Verschlechterung im Mehragentenfall von 1,9% auszugehen. (Dudek and Stadtler, 2005) Je mehr Agenten an der Supply Chain beteiligt sind, desto schlechter werden die mit Hombergers Verfahren erzeugten Lösungen. Bei der Komplexitätsklasse 3 und fünf Agenten war bereits eine durchschnittliche Verschlechterung zum besten bekannten Ergebnis von 58,65% zu bemerken.

3.2 Alternativen und Ergebnisse neuer Verfahren

Um die Idee der automatisierten Verhandlung weiter zu verfolgen, sind an verschiedenen Stellen des Verfahrens Änderungen möglich. Derartige Änderungen, insbesondere am verwendeten heuristischen Verfahren nahm Homberger in darauffolgenden Aufsätzen bereits selbst vor. 2010 verwendete er dafür einen auf Pheromonen basierenden Mechanismus, der das Simulated Annealing ersetzen soll. Homberger hatte dahingehend Erfolg, dass er es schaffte, für einige der Probleminstanzen bessere Lösungen als mit dem Simulated Annealing zu erzielen. (Homberger and Gehring, 2010) Im darauffolgenden Jahr 2011 verwendete Homberger einen Ameisenalgorithmus um das heuristische Verfahren zu ersetzen. Dabei fand er heraus, dass es mit diesem neuen Verfahren ebenso möglich ist, in vielen Probleminstanzen bessere Ergebnisse als das Simulated Annealing hervorzubringen. Mithilfe statistischer Tests konnte er zeigen, dass das neue Verfahren generell bessere Ergebnisse hervorbringt, wobei jedoch eine höhere Bearbeitungszeit der ausführenden Rechensysteme in Kauf genommen werden muss. Homberger führt dazu als Grund an, dass die Adaption der Pheromonmatrix sehr zeitintensiv ist. (Homberger and Gehring, 2011)

3.3 Kritik und Vorschläge für zukünftige Arbeiten

Insgesamt ist das Modell eine starke Grundlage für den Aufbau von effizienten Supply Chains. Dennoch enthält es einige Aspekte, die zu hinterfragen sind. Dazu zählt unter anderem, dass die Inventarkosten für ein Produkt über alle Perioden stets gleich sind. In der Realität jedoch kann es sein, dass durch zu geringe Kapazität die Lagerung zusätzlicher Güter teurer wird, da beispielsweise neue Lager angemietet werden müssen. Außerdem wird davon ausgegangen, dass jede Maschine unendlich viel Produktionskapazität hat und auf ihr lediglich ein einziges Produkt

gefertigt wird.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass in Hombergers Verfahren zwar Agenten mit ihren individuellen Nutzenorientierungen berücksichtigt werden, nie jedoch die konkreten Nutzenfunktionen verwendet werden. Smith et al. bezieht in seinen Überlegungen Unsicherheit sowie nutzentheoretische Aspekte mit ein. (Smith et al., 2007) Dies erscheint a priori auch als sinnvoll, da Individuen unterschiedliche Risikopräferenzen haben.

Auch spielt der Mediator in Hombergers Modell eine weitreichende Rolle. Sein Verhalten besitzt erheblichen Einfluss auf den gesamten Ergebnisverlauf und dessen Implementation verursacht oft hohe Softwarekosten. Dennoch ist es möglich, auch Verhandlung ohne das Einschalten eines Mediators durchzuführen, ohne dass die genannten Ausgangsvoraussetzungen verletzt werden. (Duan et al., 2012)

Ein letzter Kritikpunkt gilt Hombergers Annahme, dass die Agenten sich nach der ersten Runde kooperativ Verhalten. Dies ergeht aus der Tatsache, dass es nach der festgelegten Startwahrscheinlichkeit P_{init} keine weiteren Punkte gibt, bis zu der sich die Wahrscheinlichkeit zwischenzeitlich abkühlt. Die Abkühlungsverfahren machen die Implementation solcher Punkte nicht möglich. (Homberger, 2010)

Aus den Kritikpunkten entstehen zu einem großen Teil auch die Vorschläge für zukünftige Arbeiten. Einerseits könnte der nutzentheoretische Aspekt besser herausgearbeitet werden und mit dem Verfahren von Homberger kombiniert werden. Andererseits wäre eine Fallstudie denkbar, bei der eine reale Supply Chain unter einer Gesamtkostenperspektive ein derartiges System implementiert. Auch ergiebig könnte eine Übersicht über die Einflussfaktoren auf das Verfahren von Homberger, wie Startwahrscheinlichkeit P_{init} , maximale Rundenanzahl etc. sein, die den genauen Zusammenhang dieser Parameter und den Problemgrößen wie Komplexitätsgrad, Anzahl Agenten oder Produktstruktur beschreibt.

Literatur

- Albrecht, M., Püttmann, C., Scheckenbach, B., Stadtler, H., and Braun, H. (2006). Recommendation for collaborative planning interface for service sc at the master planning level of an aps. *Report 2.5. RWTH Aachen University*.
- Brahimi, N., Dauzere-Peres, S., Najid, N., and Nordli, A. (2006). Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, 168(1):1–16.
- Chu, C. and Leon, V. (2008). Single-vendor multi-buyer inventory coordination under private information. *European Journal of Operational Research*, 191(2):485–503.
- Dellaert, N. and Jeunet, J. (2000). Solving large unconstrained multilevel lot-sizing problems using a hybrid genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 38(5):1083–1099.
- Duan, L., Dođru, M. K., Özen, U., and Beck, J. C. (2012). A negotiation framework for linked combinatorial optimization problems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 25(1):158–182.
- Dudek, G. and Stadtler, H. (2005). Negotiation-based collaborative planning between supply chains partners. *European Journal of Operational Research*, 163(3):668–687.
- Fink, A. (2004). Supply chain coordination by means of automated negotiations. In *System Sciences, 2004. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on*, pages 1–10. IEEE.
- Fink, A. (2006). Supply chain coordination by means of automated negotiations between autonomous agents. *Studies in computational intelligence*, 28:351–372.
- Holmström, B. (1979). Moral hazard and observability. *The Bell Journal of Economics*, 10(1):74–91.
- Homberger, J. (2008). A parallel genetic algorithm for the multilevel unconstrained lot-sizing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 20(1):124–132.
- Homberger, J. (2010). Decentralized multi-level uncapacitated lot-sizing by automated negotiation. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 8(2):155–180.
- Homberger, J. and Gehring, H. (2009). An ant colony optimization approach for the multi-level unconstrained lot-sizing problem. In *System Sciences, 2009. HICSS'09. 42nd Hawaii International Conference on*, pages 1–7. IEEE.
- Homberger, J. and Gehring, H. (2010). A pheromone-based negotiation mechanism for lot-sizing in supply chains. In *System Sciences (HICSS), 2010 43rd Hawaii International Conference on*, pages 1–10. IEEE.
- Homberger, J. and Gehring, H. (2011). An ant colony optimization-based negotiation approach for lot-sizing in supply chains. *IJIPM: International Journal of Information Processing and Management*, 2(3):86–99.

- Hudson, M. (1976). Der Wohlstand der Nationen. Eine Untersuchung seiner Natur and seiner Ursachen. *History of Political Economy*, 8(4):578–580.
- Jennings, N. (2000). Automated negotiation. In *Proceedings of the 5th international conference on the practical application of intelligent agents and multi-agent systems*, pages 22–30. ACM.
- Klein, M., Faratin, P., and Bar-Yam, Y. (2002). Using an annealing mediator to solve the prisoners dilemma in the negotiation of complex contracts. *Agent-Mediated Electronic Commerce IV. Designing Mechanisms and Systems*, pages 177–191.
- Kuik, R. and Salomon, M. (1990). Multi-level lot-sizing problem: Evaluation of a simulated-annealing heuristic. *European Journal of Operational Research*, 45(1):25–37.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., and Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6):1087–1092.
- North, D. (1990). *Institutions, institutional change, and economic performance*. Cambridge Univ Pr.
- Pitakaso, R., Almeder, C., Doerner, K., and Hartl, R. (2007). A max-min ant system for unconstrained multi-level lot-sizing problems. *Computers & operations research*, 34(9):2533–2552.
- Smith, S., Gallagher, A., and Zimmerman, T. (2007). Distributed management of flexible times schedules. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1–8. ACM.
- Söllner, A. (2007). *Einführung in das internationale Management: eine institutionenökonomische Perspektive*. Gabler Verlag.
- Steinberg, E. and Napier, H. (1980). Optimal multi-level lot sizing for requirements planning systems. *Management Science*, pages 1258–1271.