Zwischenbetriebliche Logistik

Richard Hackelbusch

Fakultät 2: Department für Informatik
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
richard.hackelbusch@informatik.uni-oldenburg.de

15. Juli 2004

Zusammenfassung

Inhalt dieser Ausarbeitung ist das Modell zur Reduzierung von Emissionen bei der zwischenbetrieblichen Logistik, das in der Vorlesung behandelt worden ist. Dieses Modell basiert auf der Bestellmengenfunktion nach Harris, welche daher auch hergeleitet werden soll. Außerdem wird auf weitere Probleme und Lösungen in Bezug auf die ökologische Logistikplanung eingegangen.

Einleitung

Die Optimierung von logistischen Vorgängen ist zunächst ein rein ökonomisches Problem. Eine bestimmte Ware soll in richtiger Menge in einem vorgegebenen Zeitfenster zu einem bestimmten Ort geliefert werden. Dabei gilt die Prämisse, dass die dafür anfallenden Kosten minimiert werden sollen.

Die bei der Logistik anfallenden Kosten können viele Aspekte umfassen: Jeder Meter der eigentlichen Lieferung verursacht Lohnkosten für den oder die Fahrer, Kosten für den Treibstoff (z.B. Diesel oder Kerosin) und führt zu Wertminderung an den Transportmitteln (z.B. Verschleiß von Bremsen). Desweiteren fallen Kosten bei Wartezeiten und nicht ausgelasteten Transportmitteln an. Ein weiterer Punkt sind die anfallenden Lagerhaltungskosten, wenn eine Ware nicht sofort ausgeliefert werden kann.

Es gibt also in der Transportplanung eine große Anzahl von Optimierungsmöglichkeiten: Neben dem Fahren von möglichst kurzen Routen kann die Wahl zwischen verschiedenen Transportmitteln (z.B. große oder kleine LKW, Flugzeug oder Zug) unterschiedlicher Lage, Anzahl und Größe von verwendeten Lagern gefällt werden. Dabei besteht allerdings das Problem, dass nicht alle Entscheidungen kurzfristig gefällt oder geändert werden können: So ist es z.B. nicht ohne Weiteres möglich, die LKW-Flotte von einigen großen auf viele kleine LKW („Sprinter“) zu ändern, da hierzu ein gewisses Kapital nötig ist, und solche Entscheidungen eine lange Laufzeit bzw. Abschreibungszeit benötigen, um sich zu amortisieren.

Aus ökologischer Sicht besteht das Problem, dass die ökonomischen Ziele nicht unbedingt positiv mit den ökologischen Zielen korrelieren müssen. Primäre ökologische Zielsetzung in der Transportplanung ist eine minimale Umweltbelastung, z.B. durch minimale Emissionen. Emissionen können Schadstoffe wie z.B. Kohlenstoffmonoxid- bzw. Dioxid, Ruß und Schwefel aber auch Lärm sein. Einen ökonomischen Kostenanteil haben vor allem die Emissionen, welche durch die Verbrennung von Treibstoff wie z.B. Diesel oder Kerosin entstehen. Dieser Kostenanteil durch Treibstoffverbrauch ist allerdings logistikglobal letztlich nicht ausschlaggebend für die langfristige Transportplanung, da er dafür zu unbedeutend ist. Als Beispiel sei hierfür auf die Entwicklung des Welthandels mit Vorleistungen verwiesen: Dieser ist in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen, da es sich einfach rechnet, Produkte bzw. deren Vorleistungen (Zwischenprodukte) in Regionen in der Welt herzustellen, in denen deren Produktionskosten möglichst minimal sind, und sie anschließend einmal um den Globus zu transportieren, anstelle sie in der Nähe des Absatzmarktes zu produzieren. Durch das derzeitige Bestreben nach Schaffung von Freihandelszonen und Reduzierung der Zölle sowie die Vollendung des EU-Binnenmarktes[1] wird und wurde dieser Prozess noch weiter verstärkt.

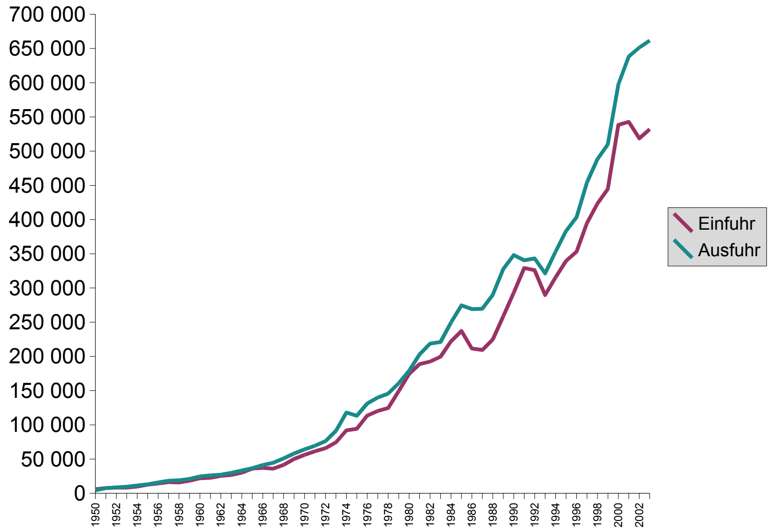

Abbildung 1: Entwicklung des Außenhandels in der Bundesrepublik Deutschland von 1950 bis 2003 in Mill. €, vgl. [1]

Möchte man dennoch die Logistik unter ökologischen Gesichtspunkten planen, dann müssen die ökologischen Anforderungen in den Zielfunktionen ein entsprechendes Gewicht einnehmen.

[1] Der hierdurch ermöglichte enorme Anstieg des Außenhandels in den 1990er Jahren ist in Abbildung 1 besonders gut zu erkennen.

Transportplanung

Die Transportplanung unter den verschiedenen harten („muss“) und weichen („kann“) Nebenbedingungen zu einem bezüglich der Zielfunktion optimalen Ergebnis zu überführen, ist ein NP-vollständiges Problem (vgl. [2]). Aus diesem Grund ist es nur sinnvoll, ein optimales Ergebnis mit Hilfe von Heuristiken und iterativen Verbesserungsverfahren anzunähern. Modelle hierfür werden weiter unten kurz vorgestellt. Zunächst soll allerdings das vereinfachte Optimierungsmodell, welches in der Vorlesung vorgestellt worden ist, dargestellt werden.

Vereinfachte Transportoptimierung unter ökologischen Aspekten

Dieses Modell zur Transportoptimierung ist soweit vereinfacht, dass es ausschließlich eine optimale Bestellmenge und eine optimale Bestellfrequenz nach Vorgabe eines Gesamtbedarfs *eines* Transportgutes unter der Prämisse von minimalen Emissionen berechnet. Durch diese vorgenommenen Beschränkungen ist die Berechnung eines Optimums dafür sehr einfach und schnell durchzuführen.

Bestellmengenformel nach HARRIS

Grundlage dieses Modells ist die klassische Bestellmengenformel nach HARRIS, welche zunächst hergeleitet werden soll (vgl. [3])[2]. Es sei dabei von der einfachsten Ausprägung der Formel ausgegangen, welche folgende Annahmen voraussetzt:

- Eine Bestellung wird genau dann vorgenommen, wenn ein bestimmter gegebener Lagerbestand k unterschritten wird. Dabei wird die optimale Bestellmenge Q^* hinsichtlich der Kosten optimiert.
- Für die Bestellgrenze k gilt: $k = 0$, d.h. es wird erst bei vollständiger Lagerenleerung nachbestellt.
- Die Wiederbeschaffungszeit ist gleich Null.
- Eine Lieferung geht als Ganzes zu, so dass keine Fehlmenge auftreten können.
- Die Abgangsrate aus dem Lager ist konstant.
- Bestellkosten fallen unabhängig der bestellten Menge fix mit c an. Jede gelagerte Einheit Ware kostet pro Zeiteinheit den Satz l.
- Es soll die Summe aus Beschaffungskosten (Summe der Bestellfixkosten c in € pro Bestellvorgang) und Lagerhaltungskosten l (in € pro Stück und Zeiteinheit) minimiert werden.

Abbildung 2: Lagerbestand bei einmaliger Bestellung von 4000 Stück

Es sollten allerdings noch einige Vorüberlegungen angestellt werden, bevor die Bestellmengenformel nach Harris hergeleitet wird. Abbildung 2 zeigt die Situation, die sich unter Berücksichtigung der oben gemachten Annahmen ergibt, wenn in einem Jahr 4000 Einheiten eines Gutes aus dem Lager abgehen, das Lager zu Periodenbeginn leer ist und nur eine Bestellung vorgenommen werden soll. Man kann sehen, dass die Lagerhaltungskosten in diesem Fall relativ hoch währen, weil in dem beschriebenen Fall im Schnitt 2000 Einheiten in dem Lager gehalten werden müssen (ausgedrückt durch das gestrichelte Rechteck, dessen Größe der Größe des Dreiecks der Lagerbestandskurve entspricht).

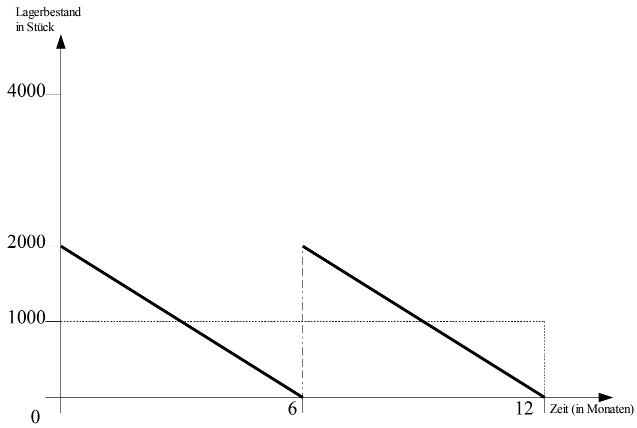

Abbildung 3: Lagerbestand bei zweimaliger Bestellung von je 2000 Stück

Um nun die Lagerhaltungskosten zu reduzieren, kann man die Anzahl der Bestellungen innerhalb der Planungsperiode erhöhen und pro Bestellung entsprechend weniger Ware

[2] Die folgenden Ausführungen und Abbildungen beziehen zur Bestellmengenformel nach Harris beziehen sich auf [3].

anfordern. Abbildung 3 zeigt die gleiche Situation wie oben nur mit dem Unterschied, dass jetzt zwei Bestellungen vorgenommen werden. Wie zu sehen ist, ist das Rechteck - durch die gestrichelte Linie beschrieben - nur noch halb so groß wie im vorherigen Fall. Im Schnitt werden jetzt nur noch 1000 Einheiten im Lager gehalten. Gleichzeitig sind dafür die Kosten für die Bestellungen (pauschal anfallend pro Bestellung unabhängig von der bestellten Menge, s.o.) auf das Doppelte gestiegen.

Der Zusammenhang zwischen Lagerhaltungskosten K_L, Beschaffungskosten K_B, Gesamtkosten K sowie der optimalen Bestellmenge Q^* ist in Abbildung 4 zu erkennen: Der Schnittpunkt der Kurven der Lagerhaltungskosten und der Beschaffungskosten beschreibt die kostenminimale Bestellmenge Q^* (minimale Gesamtkosten).

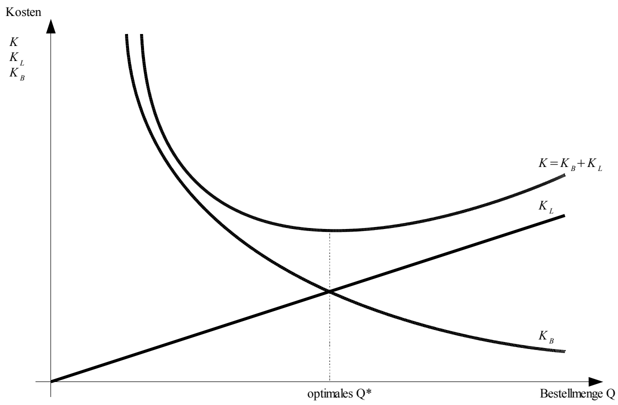

Abbildung 4: Bestimmung der optimalen Bestellmenge Q^* mit minimalen Kosten

Aus diesen Vorüberlegungen lässt sich jetzt relativ einfach die klassische Bestellmengenformel nach Harris herleiten. Dazu werden folgende Variablen definiert:

T Länge des Planungszeitraum in Zeiteinheiten

x Gesamtbedarf an dem Material im Planungszeitraum T

Q Bestellmenge, welche den Gesamtbedarf x in gleichen Portionen abdeckt.

$\frac{x}{Q} = h$ Bestellhäufigkeit

c Bestellfixe Kosten (Pauschalkosten, die pro Bestellung unabhängig von der Bestellmenge anfallen, s.o.)

l Lagerkostensatz (Kosten, die pro eingelagerte Materialeinheit und Zeiteinheit anfallen, s.o.)

Mit den oben definierten Variablen lassen sich nun die Beschaffungskosten K_B einfach beschreiben; sie sind die Kosten pro Bestellung multipliziert mit der Anzahl der Bestellungen im Planungszeitraum:

$$K_B = c \cdot h = c \cdot \frac{x}{Q}$$

Die Lagerhaltungskosten sind ausdrückbar als durchschnittliche Lagermenge ($0,5 \cdot Q$, die Hälfte der durchgeführten Bestellung, s.o., vgl. Abbildungen 2 und 3) multipliziert mit dem Lagerkostensatz l und dem Planungszeitraum T:

$$K_L = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot l \cdot T$$

Die Bestellmenge soll wie bereits erwähnt im Hinblick auf die Kosten minimiert werden. Die anfallenden Kosten entsprechen der Summe aus Beschaffungskosten und Lagerhaltungskosten:

$$K = K_B + K_L = c \cdot \frac{x}{Q} + \frac{1}{2} \cdot Q \cdot l \cdot T$$

Die Formel für das kostenminimale Optimum lässt sich nun einfach durch das Nullsetzen der ersten Ableitung von K nach Q bestimmen, wodurch die Extrempunkte der Kostenfunktion K beschrieben werden (vgl. Abbildung 4):

$$\begin{aligned}
& \frac{\delta K}{\delta Q} = \frac{\delta K_B}{\delta Q} + \frac{\delta K_L}{\delta Q} = -c \cdot \frac{x}{Q^2} + \frac{1}{2} \cdot l \cdot T = 0 \\
\Rightarrow \quad & \frac{c \cdot x}{Q^2} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot T \\
\Rightarrow \quad & \frac{Q^2}{c \cdot x} = \frac{2}{l \cdot T} \\
\Rightarrow \quad & Q^2 = \frac{2 \cdot c \cdot x}{l \cdot T} \\
\Rightarrow \quad & Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot x}{l \cdot T}} \text{ (Bestellmengenformel nach Harris)}
\end{aligned}$$

Beispiel:
$T = 1$ Jahr, $x = 3600$ Stück, $c = 360$ € pro Bestellung, $l = 1,80$ € pro Stück und Jahr:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot 360 \cdot 3600}{1,80 \cdot 1}} = 1200$$

Die geringsten Kosten fallen bei 3 Bestellungen von je 1200 Stück an. Dabei fallen $3 \cdot c = 3 \cdot 360$ € $= 1080$ € Bestellkosten und $0,5 \cdot Q \cdot l \cdot T = 0,5 \cdot 1200 \cdot 1,80$ € $= 1080$ € Lagerhaltungskosten, insgesamt also 2160 € Kosten an.

Transportoptimierung für minimale Emissionen

Das in der Vorlesung vorgestellte Modell zur Transportoptimierung geht grundsätzlich von den gleichen Annahmen aus, von denen zuvor auch für die Bestellmengenformel nach Harris ausgegangen worden ist. Nur wird im Folgenden nicht mehr von Kosten gesprochen, die minimiert werden sollen, sondern von Emissionen. Daraus ergeben sich u.a. Umbenennungen und Ergänzungen der Variablen.

Die vormaligen Lagerhaltungskosten werden jetzt als Lageremissionen E_L interpretiert, und die vormaligen Bestellkosten als Transportemissionen E_T interpretiert. Es wird davon ausgegangen, dass die Lagerung und der Transport sowohl von der Bestellmenge unabhängige fixe Emissionen als auch davon abhängige variable Emissionen ausstoßen, welche durch entsprechende Emissionssätze gewichtet werden. Daher werden jetzt zunächst für die neuen Anforderungen die benötigten Variablen definiert und darauf die Transport- und die Lageremissionen beschrieben.

Neu eingeführte Variablen:

- $e_{T,a}$ frequenzabhängiger Transportemissionssatz
- $e_{T,u}$ frequenzunabhängiger Transportemissionssatz
- $e_{L,a}$ bestandsabhängiger Lageremissionssatz
- $e_{L,u}$ bestandsunabhängiger Lageremissionssatz
- s Transportstrecke

Für die Berechnung der Transportemissionen T_L wird die Formel der Bestellkosten[3] B_L leicht modifiziert, indem jetzt die Bestellfixkosten c durch die Transportstrecke s ersetzt werden, sowie dieser variable Kostenteil mit dem frequenzabhängigen Transportemissionssatz multipliziert wird und ein fixer frequenzunabhängiger Transportemissionssatz multipliziert mit dem Gesamtbedarf hinzugefügt wird:

$$E_T = s \cdot h \cdot e_{T,a} + x \cdot e_{T,u} = s \cdot \frac{x}{Q} \cdot e_{T,a} + x \cdot e_{T,u}$$

Analog zur Formel der Lagerhaltungskosten[4] wird die Formel der Lageremissionen definiert. Auch hier wird der variable Emissionsanteil mit einem bestandsabhängigen Lageremissionssatz (anstelle des Lagerkostensatzes l) multipliziert und ein fixer bestandsunabhängiger Lageremissionssatz hinzugefügt:

$$E_L = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot e_{L,a} \cdot T + e_{L,u}$$

[3] Bestellkosten: $K_B = c \cdot h = c \cdot \frac{x}{Q}$, s.o.
[4] Lagerhaltungskosten: $K_L = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot l \cdot T$, s.o.

Ziel ist es, die insgesamt anfallenden Emissionen zu minimieren. Die gesamten Emissionen lassen sich einfach durch die Addition von E_T mit E_L bestimmen:

$$E = E_T + E_L = s \cdot \frac{x}{Q} \cdot e_{T,a} + x \cdot e_{T,u} + \frac{1}{2} \cdot Q \cdot e_{L,a} \cdot T + e_{L,u}$$

Bei der Summe der Emissionen kann natürlich auch wieder zwischen variablen und fixen Emissionen unterschieden werden:

$$E = s \cdot \frac{x}{Q} \cdot e_{T,a} + \frac{1}{2} \cdot Q \cdot e_{L,a} \cdot T \quad + \quad x \cdot e_{T,u} + e_{L,u}$$

Analog wie die Bestellmengenformel nach Harris kann auch die Formel für die emissionsärmste Logistik durch Ableiten der Formel nach Q und anschließendes Nullsetzen ermittelt werden, wobei die fixen Anteile ihre Bedeutung verlieren:

$$\begin{aligned}
& \frac{\delta E}{\delta Q} = \frac{\delta E_T}{\delta Q} + \frac{\delta E_L}{\delta Q} = -s \cdot \frac{x \cdot e_{T,a}}{Q^2} + \frac{1}{2} \cdot e_{L,a} \cdot T \\
\Rightarrow \quad & s \cdot \frac{x \cdot e_{T,a}}{Q^2} = \frac{1}{2} \cdot e_{L,a} \cdot T \\
\Rightarrow \quad & \frac{Q^2}{s \cdot x \cdot e_{T,a}} = \frac{2}{e_{L,a} \cdot T} \\
\Rightarrow \quad & Q^2 = \frac{2 \cdot s \cdot x \cdot e_{T,a}}{e_{L,a} \cdot T} \\
\Rightarrow \quad & Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot s \cdot x \cdot e_{T,a}}{e_{L,a} \cdot T}} \text{ (Optimale Bestellmenge für minimale Emissionen)}
\end{aligned}$$

Wie man sehen kann, haben nur die variablen Emissionsanteile Auswirkungen auf die optimale Bestellmenge zur Erzielung minimaler Emissionen. Dies ist in Abbildung 5 nochmal visualisiert.

Beispiel:
$T = 1$ Jahr, $x = 5000$ Stück, $s = 250$ Kilometer, $e_{L,a} = 2$ pro Stück und Jahr, $e_{T,a} = 1,25$ pro Kilometer und Jahr:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot 250 \cdot 5000 \cdot 1,25}{2 \cdot 1}} = 1250$$

Die geringsten Emissionen werden bei 4 Bestellungen von je 1250 Stück ausgestoßen.

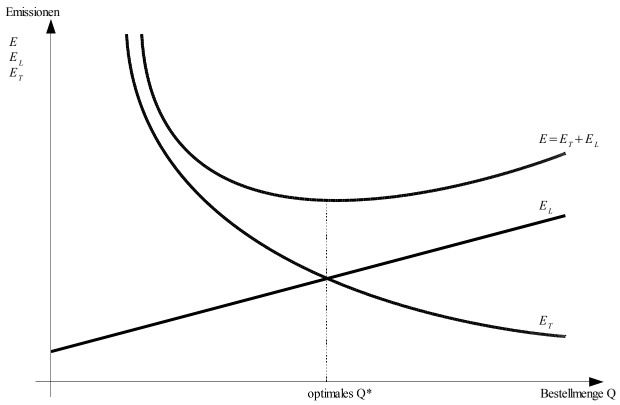

Abbildung 5: Bestimmung der optimalen Bestellmenge Q^* mit minimalen Emissionen

Allgemeinere Transportplanung

Die Einschränkungen und Voraussetzungen, die für die Anwendung des oben vorgestellten Modells zur Transportoptimierung gelten müssen, liegen in der Realität meist nicht vor. Aus diesem Grund gibt es weitere Modelle für Transportplanung. Das Problem dabei ist jedoch, dass es sich bei diesen Modellen fast immer um NP-vollständige Probleme handelt, die sich bei Vereinfachung auf bekannte NP-vollständige Probleme wie das Problem des Handlungsreisenden zurückführen lassen können (vgl. [4]).

Ein Beispiel hierfür wäre z.B. die Routenplanung für die Entsorgungslogistik. Um diese vornehmen zu können, ist umfangreiches Datenmaterial (z.B. Karten) notwendig.

Planungssysteme für diese Art von NP-vollständigen Problemen arbeiten fast immer mit Heuristiken zur Erstellung initialer Transportpläne, welche dann mit iterativen Verbesserungsverfahren (z.B. über genetische Algorithmen, Schwarmintelligenz oder neuronale Netze) zu optimieren versucht werden. In der Abteilung Informationssysteme des Departments liefen und laufen mehrere Forschungsarbeiten zur Transportplanung, welche den oben beschriebenen Weg versuchen zu gehen. So z.B. als Einbettung in Problemlösungsansätze der Ablaufplanung [5] und weiterführend [6].

Neben der Routenplanung gibt es noch weitere Optimierungsfelder bei der Planung von Logistik: So kann es sinnvoll sein, dass Hersteller, Zulieferer, Größhändler, Zwischenhändler und der Verkäufer ihre Bestellvorgänge harmonisieren, damit Probleme wie der „Bullenpeitscheneffekt[5]" nicht auftreten. Aber auch anderer Informationsaustausch kann helfen, unnötige Emissionen zu vermeiden. Das Problem dabei ist jedoch meist, dass wirtschaftlich handelnde Subjekte interne Informationen oder Planungssouveränität abgeben müssten, was verständlicherweise nicht extensiv betrieben wird.

[5]Geringe Bestellmengenänderungen beim Verkäufer können sich so durchschlagen, dass der Hersteller in einer Periode die doppelte Menge und in einer anderen Periode gar nichts herstellen muss.

Literatur

[1] Statistisches Bundesamt Deutschland
http://www.destatis.de/themen/d/thm_aussen.htm

[2] **Hackelbusch, Richard:** *GUI für ein Transportplanungssystem*. Oldenburg, 2004
http://www-is.informatik.uni-oldenburg.de/lehre/lehre_2946.htm

[3] **Fandel, Günter et al:** *Gestaltung realer Güterprozesse - Beschaffung und Lagerhaltung*. Hagen, 1983

[4] **Lenstra, J.K. et al.:** *Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems*. Networks, Vol. 11, 1981.

[5] **Sauer, Jürgen:** *Multi-Side Scheduling - Hierarchisch koordinierte Ablaufplanung auf mehreren Ebenen*. Habilitationsschrift an der Universität Oldenburg, 2002.

[6] **Störk, Jörn:** *Planning Transport in the Supply Chain*. In: **M.H. Hamza (Hrsg.)**: *Proceedings of the Intl. Conference on Artificial Intelligence and Applications*. Innsbruck, 2004