

Transport und Logistik

Die richtige Menge zur richtigen Zeit am richtigen Ort: Grundkonzepte der betrieblichen Logistik

Version 4.10 © Harry Zingel 1997-2007, EMail: HZingel@aol.com, Internet: <http://www.zingel.de>
Nur für Zwecke der Aus- und Fortbildung

Inhaltsübersicht

1.	Grundgedanken	2	2.6.2.	Kanban-Konzepte	12
1.1.	Definition und Probleme der Logistik	2	2.6.2.1.	Grundlegende Definition	12
1.2.	Dieses Skript	2	2.6.2.2.	Dezentrales Informationsmanagement per Kanban	13
1.3.	Zur Herkunft der Logistik	2	2.6.2.3.	Gestaltung des Kanban-Steuerungsmodells	13
2.	Logistik als Teildisziplin der Betriebswirtschaft	2	3.	Mathematische Probleme der Logistik	14
2.1.	Grundsätzliches Optimierungsproblem	2	3.1.	Die zwei Problemtypen der Logistik	15
2.2.	Rahmenbedingungen der Logistik	4	3.2.	Allgemeine Formulierung des Transportproblems	15
2.3.	Logistische Leistungserstellung	4	3.3.	Verfahren zur Aufstellung eines Fahrplanes	16
2.4.	Grundsätzliche logistische Strategien	5	3.4.	Die Umsetzung von Landkarten	17
2.4.1.	Der Auftrag als Erkenntnisquelle	5	4.	Anwendungsbeispiel und spezielle Probleme	18
2.4.2.	Zentralisierung und Dezentralisierung	5	4.1.	Ein Einführungsbeispiel	18
2.4.3.	Anzahl der Transportstufen	6	4.1.1.	Die Ausgangssituation	18
2.4.4.	Logistik und die ABC-Analyse	7	4.1.2.	Erste Iteration	19
2.4.5.	Wahl des Transportmittels	7	4.1.3.	Zweite Iteration	19
2.4.6.	Entscheidungsstrategie	8	4.1.4.	Dritte Iteration	19
2.5.	Logistik und Lagerung	8	4.1.5.	Vierte Iteration	20
2.5.1.	Lagerordnung und Logistik	8	4.1.6.	Fünfte Iteration	20
2.5.2.	Elemente der Lager- und Transporttechnik	9	4.1.7.	Sechste Iteration	20
2.5.3.	Umschlag und Kommissionierung	10	4.1.8.	Siebte Iteration	21
2.5.3.1.	Umschlag	10	4.1.9.	Achte Iteration – Erreichen der Basislösung	21
2.5.3.2.	Kommissionierung	10	4.2.	Prüfung der gewonnenen Basislösung auf Optimalität	21
2.5.3.3.	Weitere Funktionen von Umschlag und Kommissionierung	10	4.2.1.	Die Potentialmethode	21
2.5.3.4.	Kommissioniersysteme	11	4.2.2.	Mehrdeutigkeit, Gabelungen, Backtracking	22
2.6.	Logistische Gesamtkonzepte	11	4.2.3.	Spezielle Probleme bei der Potentialprüfung	23
2.6.1.	Supply Chain Management Konzepte	11	4.3.	Auflösung der Empfangs- und der Versandbedingung	25
2.6.1.1.	Grundlegende Definition	11	4.4.	Deckungsbeitragsoptimierung	26
2.6.1.2.	Ziele des Supply Chain Managements	12	4.5.	Optimierung nicht-optimaler Lösungen	27
2.6.1.3.	Prozeßgetriebene Ansätze	12	4.6.	Das Travelling Salesman Problem	28

In Zeiten zunehmender Beschränkungen des produktiven Sektors werden logistische Konzepte immer wichtiger. Das offenbart sich schon am Inhalt der universitären Lehrpläne, die den Begriff „Produktionstheorie“ heute kaum noch enthalten, dafür aber „Logistik“ oder „Beschaffung“ mehr oder weniger synonym einsetzen: es wird also nicht mehr produziert, sondern nur noch transportiert oder beschafft!

Dieses kleine Skript befaßt sich mit den eigentlichen logistischen Skripten und ergänzt die materialwirtschaftlichen und produktionstheoretischen Schriften auf der BWL CD.

Die folgenden Skripte werden in Rahmen dieses Werkes vorausgesetzt:

Bestellmenge.pdf	Grundgedanken der Bestellmengenplanung.
Disposition.pdf	Konzepte der Bedarfsplanung.
Produktion Skript.pdf	Grundgedanken der Produktionstheorie.

Die folgenden Dateien enthalten numerische Lösungen zu den hier dargestellten Problemen und sollten ggfs. ausprobiert werden:

Angebotsvergleich.xls	Angebotsvergleich, mit Berechnung der Lagerkennziffern.
Demonstration Normalverteilung.xls	Probieren Sie das Konzept der Normalverteilung interaktiv aus!
FIFO-LIFO Modellrechnung.xls	Handelsrechtliche Bewertung nach Durchschnitts- und Verbrauchsfolgeverfahren.
Gauß'sche Normalverteilung.xls	Tabelle der Normalverteilung.
Kalk Kosten.xls	Grundmodell der kalkulatorischen Kosten.
Lager Kennziffern Visualisierung.xls	Visualisiert die Lagerkennziffern. Interaktives Tool.
Lager Kennziffern.xls	Berechnet die Lagerkennziffern. Mit eigener Visualisierung.
Lagerkosten Rabatt.xls	Berechnet die Lagerkennziffern bei Rabatten im Einkauf. Mit Grafik.
Transport.xls	Berechnet die Vogel'sche Transportoptimierung und das Potentialverfahren.
Travelling Salesman Problem.xls	Modell des klassischen Reihenfolgeproblems der Transportrechnung.
Varianz.xls	Berechnet Mittelwert, Varianz und die Normalverteilung.

1. Grundgedanken

1.1. Definition und Probleme der Logistik

Logistik ist allgemein die Lehre von der *Bewegung und Platzierung von Gütern, Diensten und Personen* sowie allen dazu erforderlichen Konzepten und Tätigkeiten. Es geht also darum,

- die richtigen *Güter und Leistungen*
- am richtigen *Ort*,
- in richtiger *Menge*,
- zur richtigen *Zeit*,
- und in richtiger *Qualität*

zu bringen. Hierfür besteht eine schwer überschaubare *Vielzahl von Begriffen* mehr oder weniger deckungsgleichen Inhalts: „Warenverteilung“, „physische Distribution“, „Distributionslogistik“, „Marketinglogistik“, „Materialmanagement“ und viele andere mehr. Diese umfassende Gesamtaufgabe enthält *praktische, technische, organisatorische, rechtliche* und *mathematische* Teilkonzepte und Überlegungen.

1.2. Dieses Skript

Dieses Manuskript befaßt sich *mit den mathematischen und organisatorischen Problemen der Logistik*. Die *praktischen* und *technischen* Probleme werden nur gestreift. Für rechtliche Fragen besteht ein eigenes Schriftwerk.

Das vorliegende Werk wird durch eine *Vielzahl mathematischer Problemlösungen* in Microsoft® Excel® ergänzt. Dem Leser und Lernenden wird dringend empfohlen, diese Dateien auszuprobieren und auch die dahinterstehende Programmierung zu untersuchen und zu verstehen, denn in den Betrieben wird außer auf der Toilette kaum noch etwas ohne Computer flüssig erledigt. Dem registrierten Käufer der BWL CD stehen alle Kennwörter für die Excel-Arbeitsmappen zur Verfügung, so daß der Code und die Formeln ausgiebig studiert und ausprobiert werden können. Es geht also, auch wenn das in manchen Prüfungen - *leider!* - noch anders aussieht, nicht primär um die Vermittlung von Wissen, sondern um den *Erwerb von Fähigkeiten und Fertigkeiten*, und das geht nicht mehr ohne digitale Kompetenz ab. Oder, um es kurz zu machen: *Computer literacy* ist eine Basisqualifikation, die der Autor beim Leser voraussetzt, um die hier dargestellten theoretischen Konzepte wirklich anwenden zu können.

1.3. Zur Herkunft der Logistik

Wie viele andere theoretische Konzepte auch ist die Logistik ursprünglich eine Teildisziplin der *militärischen Strategielehre* und wurde seit etwa dem dreißigjährigen Krieg auf wirtschaftliche Probleme angepaßt. Insbesondere in der Zeit *seit dem ersten Weltkrieg* wurden zahlreiche militärische Konzepte auf Unternehmen übertragen. Dieses kleine Werk befaßt sich ausschließlich mit deren betriebswirtschaftlicher Anwendung auf Probleme der unternehmerischen Leistungserstellung. Dies weist uns auf die allgemeine Ähnlichkeit zwischen wirtschaftlichen und militärischen Konzepten hin, denn wie der Krieg eine *Auseinandersetzung mit Waffen* ist, so ist die

Wirtschaft ein *Konkurrenzkampf mit ökonomischen Mitteln*. Beides ist *einander äquivalent* (aber von sehr unterschiedlichem moralischen Wert!).

Die Logistik ist dabei mit der *Lager- und der Produktionstheorie* eng verbunden, weil in diesen beiden Bereichen Materialströme und Produkte transportiert und bereitgestellt werden müssen. Außer in der produzierenden Industrie ist die Logistik insbesondere im *Transportgewerbe* und im *Reiseverkehr* von Bedeutung. Insbesondere die Einsatzplanung von Verkehrsmitteln ist ohne mathematische Verfahren der Logistik kaum noch denkbar. Die hinter dem Inhaltsverzeichnis angegebenen *material- und produktionstheoretischen Skripte* sollten daher dem Leser bekannt sein.

2. Logistik als Teildisziplin der Betriebswirtschaft

Die Logistik befaßt sich mit der *physischen Bereitstellung von materiellen Produktionsfaktoren*. Sie ist daher nahe mit der *Produktionstheorie* und dem *Lagerwesen* verwandt. Zudem dient sie dem *Marketing*. Gliedert man sie nach Sachbezügen, so kann man unterscheiden:

- die *Unternehmenslogistik*, die sich mit Transportaufgaben innerhalb des Unternehmens befaßt, insbesondere (auch) mit dem Transport von *Halbfertig- und Fertigerzeugnissen*.
- die *Beschaffungslogistik*, die sich mit der Einkaufsseite und der Bereitstellung von Bedarfsgegenständen befaßt, insbesondere mit *Rohstoffen, Hilfsstoffen, Betriebsstoffen, Kaufteilen* und *Handelswaren*,
- die *Betriebslogistik*, die sich mit dem innerbetrieblichen Transport von *Material* (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen), *Kaufteilen, Unfertig- und Fertigerzeugnissen* innerhalb oder in Zusammenhang mit dem Produktionsprozeß befaßt.
- die *Distributionslogistik*, die sich mit dem Transport fertiger Objekte an Abnehmer, Nutzer und Kunden befaßt,
- die *Entsorgungslogistik*, die sich mit dem Transport von *Abprodukten* (Müll), *Ausschuß, Verderb* und anderen nicht mehr benötigten Faktoren beschäftigt.

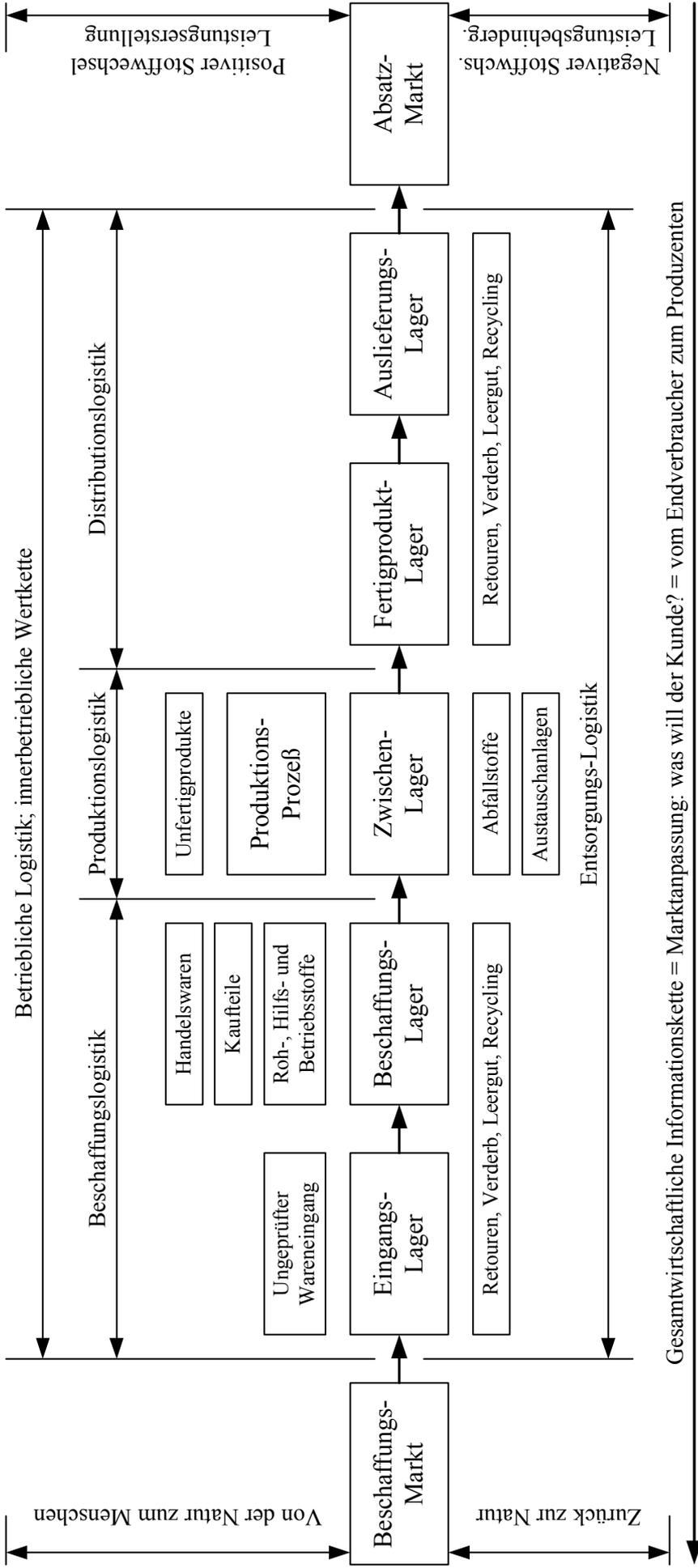
Für eine Gesamtübersicht zu den Inhalten, Mechanismen und Rahmenbedingungen der Logistik vgl. die Gesamtübersicht auf der Folgeseite.

2.1. Grundsätzliches Optimierungsproblem

Die Logistik kann als *Optimierungsproblem* mit *grundsätzlichem Zielwiderspruch* definiert werden. Die Logistik zielt darauf, *Transportleistungen* zu erbringen. Je höher aber das Potential der erbrachten Leistung ist, also je mehr, je schneller und je qualitativ besser transportiert wird, desto höher sind auch die *Kosten*; jede Kostenminimierung führt aber tendenziell auch zu einer *Verschlechterung der erbrachten Leistung*. Eine Aufgabe der Logistik ist es also, den Widerspruch zwischen den Zielen der Leistungsverbesserung und der Kostensenkung *aufzulösen* oder zu *mindern*.

Gesamtübersicht: Teilbereiche, Mechanismen und Rahmenbedingungen der Logistik

Gesamtwirtschaftliche Wertkette = Güter- und Leistungsfluß = vom Rohstoff zum Endverbraucher



Allgemeine wirtschaftspolitische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen der Logistik

Politische Bedingungen (Globalisierung, Triadisierung)
Rohstoffverfügbarkeit, Marktzugang, Politische Preise,
Transportbe- und verhinderung, Ökologie, Ökologismus

Technischer Fortschritt, Automatisierung,
Informations- und Kommunikations-
technologie, Politische Beschränkungen

Politische Bedingungen (Globalisierung, Triadisierung)
Rohstoffverfügbarkeit, Marktzugang, Politische Preise,
Transportbe- und verhinderung, Ökologie, Ökologismus

Arbeitsmarktsituation, allgemeine Haltung der Öffentlichkeit zu Produktion und Logistik, Wirtschaftsfreundlichkeit oder -feindlichkeit der Verwaltung, Energiekosten, Steuerrecht

Zielwidersprüche in der Logistik	
Leistungsoptimierung: Richtige Bedarfsobjekte, am richtigen Ort in richtiger Menge zur richtigen Zeit und in richtiger Qualität bereitstellen.	Kostenoptimierung: Logistische Leistungserbringung zu möglichst geringen Kosten.
<ul style="list-style-type: none"> ● Hohe Bestände ● Viele Lager ● Eiltransporte ● Zahlreiche Transportmittel 	<ul style="list-style-type: none"> ● Geringe Bestände ● Wenige Lager ● Standard- und langsame Transporte ● Wenige Transportmittel

Die meisten Konzepte der Logistik befassen sich daher auf die eine oder andere mit der Frage, wie man diese einander widersprechenden Ziele zur Harmonie bringen kann, also wie man zu vergleichsweise geringen oder sinkenden Kosten doch eine hochwertige Leistung erbringen kann.

2.2. Rahmenbedingungen der Logistik

Die Logistik unterliegt wie kaum ein anderer Teilbereich der Betriebswirtschaft *staatlicher und ideologischer Reglementierung*. Während beispielsweise im Rechnungswesen die Regelungsdichte auch hoch ist (und weiter wächst), so sind inzwischen doch viele Regelwerke wie z.B. die IFRS/IAS von *sachkundigen Regelungsgebern* erstellt; die Rahmenbedingungen der Logistik werden jedoch oft von *rein ideologisch motivierten Gesetzgebern* erstellt, so daß die grundsätzliche Optimierungsaufgabe der Logistik um eine Komponente der Einhaltung oft absurder gesetzlicher Restriktionen bei gleichzeitiger *Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des betrieblichen System* erweitert wird.

Wichtige Rahmenbedingungen der Logistik sind:

- Politische Situation: EU-Osterweiterung, Globalisierung, Internationalisierung und Triadisierung, Zugang (oder Sperrung) des Marktzuganges, Öffnung bislang verschlossener Märkte, Liberalisierung von Rechtssystemen;
- Arbeitsmarkt: Angebot qualifizierter und/oder günstiger Arbeitskräfte, Arbeitslosigkeit, Zustrom von Arbeitskräften aus Osteuropa;
- Technologie: Automatisierung, Informations- und Kommunikationstechnologien, neue Lagertechnik, neue Transporttechniken, neue, schnellere oder sicherere Transportmittel;
- Qualität: Sinkende Bereitschaft der Kunden zu warten, höhere Bedeutung von Qualität und Pünktlichkeit, Entwicklung zur Dienstleistungsgesellschaft, größere Bereitschaft zu Beschwerde, Anforderung der Kunden, daß der Leistungserbringer ein Zertifikat nach ISO 9000 besitzen müsse, generell zunehmende Relevanz des Qualitätsmanagements;
- Markt: Entwicklung vom Verkäufer- zum Käufermarkt, vom Mangelmarkt zur Marktsättigung, Zunahme der Konkurrenz, Billigkonkurrenz aus Osteuropa, geringere Anbieterbindung des Kunden und höhere Bereitschaft zum Anbieterwechsel;
- Ökologie: Umweltverschmutzung durch Verkehr, Verpackungs- und Müllvermeidung, Schaffung geschlossener Stoffkreisläufe;

- Ökologismus: Einschränkungen und Überwachung des Straßenverkehrs durch ideologische Gesetze wie z.B. Maut, Mineralölsteuer, Überreglementierung der logistischen Leistungserbringung, steigende Energiekosten, zunehmende Notwendigkeit, existenzbedrohende Reglementierungen u.B. durch Verlagerung (Outsourcing) zu umgehen.

2.3. Logistische Leistungserstellung

Um die Leistung der Logistik zu erfüllen, sind eine Vielzahl grundlegender Strategien anwendbar, die vielfach an anderer Stelle auf der CD bereits dargestellt werden (z.B. Lagerhaltungsmodelle, Lagerstrategien, Dispositionskonzepte, Transportarten, Transportoptimierung). Aus Sicht des Leistungsempfängers sind aber

- die Lieferzeit,
- die Lieferfähigkeit,
- die Liefertreue,
- die Lieferqualität,
- die Auskunftsbereitschaft über Lieferungen und
- die Lieferflexibilität

wesentliche Indikatoren der Servicequalität des Logistikers.

- Lieferzeit ist hierbei die Fähigkeit, das gewünschte Gut *zur richtigen* (vom Kunden oder Bedarfsträger gewünschten) *Zeit* und *in kurzer Transportzeit* bereitzustellen;
- Lieferfähigkeit ist die Fähigkeit, das gewünschte Gut *überhaupt* bereitstellen zu können, es also zur Bedarfzeit bereitzuhaben,
- Liefertreue ist die Fähigkeit, vertragliche Abmachungen über *Zeit und Art* des Transportvorganges einzuhalten,
- Lieferqualität ist die Fähigkeit, die Transportaufgabe in einer *für einen bestimmten Transportzweck geeigneten Art und Weise* zu erledigen (was die allgemeine *Qualitätsdefinition* und das *Kano-Modell* umfaßt), also die zu transportierenden Objekte in einer sachgerechten Art und Weise zu behandeln,
- Auskunftsbereitschaft über Lieferungen ist die Fähigkeit, dem Auftraggeber oder sonstigen Interessenten zeitnah Auskünfte über alle Aspekte der Erledigung der Transportaufgabe zu erteilen, also etwa über den gegenwärtigen Aufenthaltsort, Abhol- oder Zustellzeitpunkt der Lieferung und andere Aspekte der Erledigung der Transportaufgabe *Rechenschaft ablegen zu können*,

- **Lieferflexibilität** ist die Fähigkeit, auf Änderungen der Bedürfnisse des Nachfrages etwa hinsichtlich Terminen, Zeiten oder Qualitäten *schnell und angemessen eingehen zu können*, also stets das bieten zu können, was ein Nachfrager vom Logistiker wünscht.

Diese einzelnen hierbei vorausgesetzten Indikatoren der Leistungsqualität des Logistikers bedingen einander und stehen untereinander in wechselseitiger Beziehung zueinander. Sie bilden damit ein *mehrdimensionales System von Parametern* oder, mathematisch gesprochen, eine *komplexe, mehrdimensionale Optimierungsaufgabe*. Dieses System ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, daß die den einzelnen Parametern zugrundeliegenden theoretischen Grundlagen nur auf einer vergleichsweise kleinen Zahl von Basisstrategien beruhen: gewählte Transportart und -mittel, Lagerstrategie und die Organisation der Auftragsbearbeitung bilden die Grundlagen auf denen die Qualität der logistischen Arbeit beruht.



2.4. Grundsätzliche logistische Strategien

Eine Zahl *grundsätzlicher Strategien* lassen sich unterscheiden. Sie bestimmen die grundlegende Struktur logistischer Systeme.

2.4.1. Der Auftrag als Erkenntnisquelle

Wesentliches Bestimmungselement logistischer Strategien ist der *Kundenauftrag*. Die aus ihm ersichtlichen Daten bestimmen die Wahl der logistischen Methoden:

- Auftragsnummer und -Datum,
- gewünschte oder geforderte Liefertermine und -Ziele,
- erforderliche Transportmittel und physikalische Transportbedingungen (Kühlung, Transportverpackung usw),
- Mengen und Volumen der Transporte,
- Sicherheitsstandards und
- Liefer- und Transportkosten.

Die Auftragsabwicklung soll

- einen dem Güterfluß *vorausgehenden* Informationsfluß sicherstellen (Lieferankündigung, Versandmitteilung, Auftragsbestätigung usw),
- einen den Güterfluß *begleitenden* Informationsfluß sicherstellen (Laufkarten, Auftragsdaten, Zuordnung

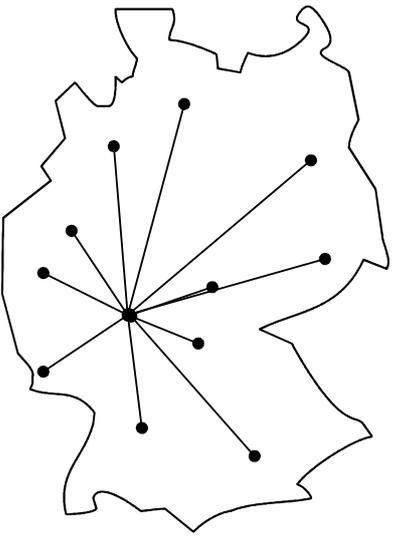
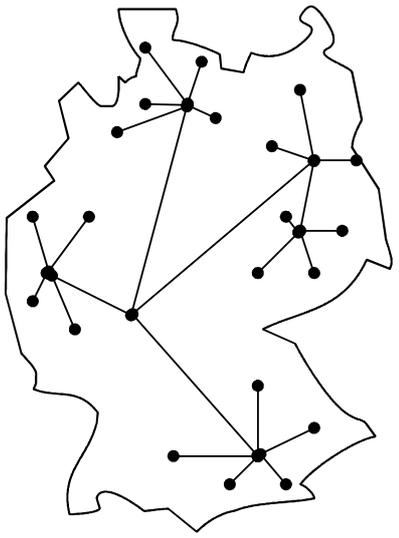
von Beständen und Lagermengen, Verfolgung des Güterflusses im logistischen Netzwerk, Sicherstellung der Auskunftsbarkeit) und

- einen dem Güterfluß *nachfolgenden* Informationsfluß sicherstellen (Rechnungen, Zahlungsmeldungen, Mahnungen, Rückmeldungen über Zustellung und ggfs. Schäden).

Der Auftrag selbst, und die in ihm verkörperte Information über den Bedarf an Transportdienstleistungen im Markt, ist ein wesentliches Element der dem Güterfluß *umgekehrten* Informationsversorgung: Der Logistiker muß ständig lernen, was am Markt gewünscht oder abgelehnt wird, für welche Arten von Transportleistungen Bedarf besteht und welche nicht (mehr) benötigt werden. Dies entspricht der *allgemeinen Anpassung an Marktgegebenheiten*.

2.4.2. Zentralisierung und Dezentralisierung

Zentralisierung ist allgemein gesprochen die *Zusammenfassung von Gleichartigem*. In der Logistik spricht man von Zentralisierung, wenn Transportaktivitäten in einer Stelle *konzentriert* (*zusammengefaßt*) werden; Dezentralisierung liegt vor, wenn die Transportaktivitäten eines Unternehmens *auf viele Standorte verteilt* werden. Die

Zentralisierung und Dezentralisierung in der Logistik		Übersicht über Bestimmungselemente der Zentralisierung oder Dezentralisierung logistischer Strukturen	
			
Markt	Lieferzeit	Ausreichende Lieferzeit	Knappe Lieferzeit, Termindruck
	Kundeninteraktion	Belieferung	Abholung
	Kundenstruktur	Wenige Großkunden, homogen	Viele Kleinkunden, inhomogen
Produkte	Sortiment	Breit (Diversifikation)	Schmal (Differenzierung)
	Produktwert	hoch	niedrig
	Absatzmengen	klein	groß
	Sendungsgewichte	hoch	niedrig
	Sendungsgröße	groß	klein
Prod.	Versender und Empfänger	wenige	viele
	Produktionsverfahren	Einzelfertigung, Serienfertigung	Werkstatt- und Baustellenfertigung
Rahmenbeding.	Nationale Eigenheiten	wenige	viele
	Nationale Reglementierungen	wenige	viele
	Steigerung der Transportkosten	mäßig	hoch
	Steigerung der Verkehrsdichte	mäßig	hoch
	Strategische Ausrichtung	Absicherung gegen Konfiskation	Lokalisierung, Marktzugang

Frage der Zentralisierung logistischer Prozesse hängt von einer Vielzahl einzelner Komponenten ab und ist eine strategische Entscheidung des Unternehmens.

Bekanntestes Beispiel für dezentrale Logistik ist die *Post*, die an nahezu jedem Ort einen logistischen Stützpunkt unterhält; weniger bekannt sind die *logistischen Strukturen großer Unternehmen*, die oft viel zentraler beschaffen sind, weil sie nur auf wenige Abnehmer aber größere Sendungen zielen. Die richtige Zentralisierungsstrategie kann erheblich helfen, Kosten zu senken; durch ungünstige räumliche Strukturen können *überproportional anwachsende Kosten* entstehen.

2.4.3. Anzahl der Transportstufen

Die Anzahl der Transportstufen ist die *Zahl der Umlagevorgänge* (Transshipments) und/oder *Zwischenlagervorgänge* auf dem Weg vom Versender zum Empfänger. Das ist nicht immer mit der gewählten Zentralisierungsstrategie deckungsgleich, weil auch bei zentralem Versand Umladevorgänge möglich sind; allerdings werden dezentrale logistische Systeme zumeist auch mehrstufig sein.

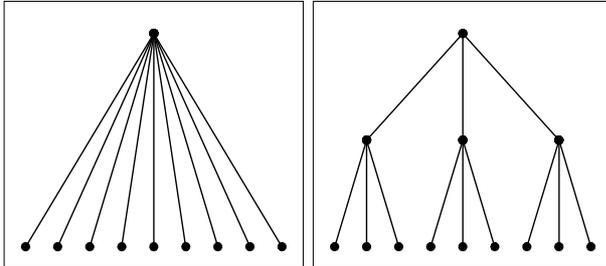
Transshipment ist in diesem Sinne die Umlagerung einer Ware von einem Transportmittel auf ein anderes *unter Wechsel des Transportbehältnisses*. Hierzu ist es wichtig, die drei Arten von Behältern zu unterscheiden:

- **Produktverpackung** ist die Verpackung, die das *Produkt selbst benötigt*, um Umwelteinflüssen außerhalb der Transportbedingungen widerstehen zu können, beispielsweise die luftdichte Kaffeeverpackung,
- **Transportverpackung** ist die Verpackung, die speziell dazu dient, das Produkt vor den *Umwelteinflüssen des Transportes* zu schützen und viele einzelne (kleine) Produkte für Transportzwecke zusammenzufassen, etwa der Karton,
- **Transportbehältnis** ist der *Teil des Transportmittels*, der der Aufnahme des Produktes dient, beispielsweise die Ladefläche.

Tankwagen beispielsweise transportieren Güter ohne Produkt- oder Transportbehältnisse; Container sind Transportverpackungen aber Ladecontainer von Flugzeugen sind Transportbehältnisse, die Transportverpackungen (z.B. Koffer von Reisenden) aufnehmen.

Das Umladen des geschlossenen Containers beispielsweise auf ein anderes Schiff stellt damit kein Transshipment dar, wohl aber das Umfüllen von Flüssigkeiten oder Ent- und wieder Beladen von Schüttgütern.

Dies entspricht im wesentlichen der Vorgehensweise bei der Intra-stat-Meldung: wenn ein Transshipment vorliegt, dann ist (im intraeuropäischen Verkehr) auch eine Intra-stat-Meldung erforderlich.



- Direkter Weg vom Versender zum Empfänger: Transporte können zwar unterbrochen werden, aber *kein Transshipment* und *keine Zwischenlagerung* ist möglich.
- Indirekter Weg vom Versender zum Empfänger: Die Güter werden auf dem Weg zum Empfänger *zwischenlagert* und können *umgeladen* werden.

Wichtige Einflußfaktoren auf die Wahl der optimalen Anzahl der Transportstufen sind:

- Unterschiede zwischen *Lang- und Kurzstrecken-transportwegen* (Autobahn vs. enge Altstadtstraße),
- Unterschiede zwischen *zu wählenden Transportmitteln* (Schiff oder Flugzeug vs. Lieferwagen),
- Unterschiede zwischen *Transportbehältnis und Transportverpackung* (Container vs. Pappkarton),
- Nationale oder regionale *Anforderungen an die Produkte* (Etikettierungen in Landeswährung und/oder Landessprache erst am oder nahe am Zielort),
- Erfüllung nationaler oder regionaler *Sicherheits-, Qualitäts- oder Zertifizierungsanforderungen* (z.B. bei Lebensmitteln, Medikamenten oder auch technischen Gütern),
- Erfüllung *nationaler oder regionaler steuerlicher Anforderungen* (z.B. Verbrauchssteuern bei Alkohol und Zigaretten),
- Zahl, Standort und Größe von *Kunden*.

Die Wahl der Zentralisierungsstruktur und Prozeßgestaltung ist ein Teilbereich der grundsätzlichen strategischen *Standortentscheidung*.

2.4.4. Logistik und die ABC-Analyse

Zentralisierung und einstufige Prozeßgestaltung werden meist eher bei *A-Produkten* und/oder *A-Kunden* im Sinne der ABC-Analyse sinnvoll sein; diese Kunden sind groß bzw. nachfragestark genug, einen direkten Transport und ggfs. die Bereitstellung spezifischer Transportmittel zu rechtfertigen. Ein gutes Beispiel hierfür sind *industrielle Großtransporte*.

Bei *C-Kunden* und *C-Produkten* wird zumeist eher Dezentralisierung und Mehrstufigkeit günstiger sein. Für diese Kunden werden keine spezifischen Transportmittel bereitgestellt. Die Bedarfsobjekte vieler Kunden werden gemeinsam transportiert und ein logistisches Netz aus Transportstützpunkten dient der Optimierung der Transportwege. Das beste Beispiel hierfür ist die *Post*.

2.4.5. Wahl des Transportmittels

Die Wahl des Transportmittels hängt von *Eigenschaften des zu transportierenden Gutes* und von *Transportzweck* ab. Brennbare Flüssigkeiten transportiert man anders als Bücher und Abfallstoffe anders als Neuware. Man kann innerbetriebliche und außerbetriebliche Transporte unterscheiden.

Die grundsätzliche Unterscheidung der Güter ist

- Stückgüter in eigener Transportverpackung,
- Flüssiggüter mit oder ohne eigene Transportverpackung und
- Schüttgüter.

Diese Unterteilung bestimmt nur die Art des Transportbehältnisses; für fast alle Transportmittel gibt es Transportbehältnisse für alle Arten von Gütern, etwa Tanks, Container oder Behälter für Schüttgut jeweils für LKW, Schiffe, Eisenbahnwaggons oder Flugzeuge.

Die Wahl des Transportmittels soll einen Kompromiß zwischen Schnelligkeit, Kosten, Sicherheit und anderen Bestimmungselementen der logistischen Servicequalität gewährleisten.

Wichtige Bestimmungsvariablen für die Art des Transportmittels sind:

Rahmenbedingungen zur Wahl des richtigen Transportmittels				
Transportmittel	LKW	Schiff	Flugzeug	Eisenbahn
Flexibilität	sehr hoch	hoch	sehr hoch	gering
Kosten pro t	mittel	gering	hoch	mittel/hoch
Schnelligkeit	mittel/hoch	gering	sehr hoch	gering
Eignung für Lose	klein/mittel	sehr groß	klein/mittel	groß
Direktbelieferung	gut geeignet	nur Häfen	eher gut	mittel/gering
Generelle Eignung	Stückgüter, individuelle Lieferungen	Massengüter, weltweite Langstreckentransporte	Mittel- bis Langstreckentransporte hochwertiger oder eiliger Güter	Rohstoffe und Massengüter ohne oder mit geringen Anforderungen

Werden mehrere Transportarten in einem einzigen Transport nacheinander verwendet, so spricht man von einem *multimodalen Transport*. Dies ist insbesondere wichtig bei der Umladung von Gütern von Schiffen auf LKW und/oder umgekehrt. Der multimodale Transport kann durch ein einzigen Satz von Dokumenten, ein *multimodales bill of lading*, abgedeckt sein. Multimodale Transporte bedingen Transshipments, wenn nicht Container ungeröffnet umgeladen werden.

Die Frage, ob ein Transshipment vorliegt, kann von großer Bedeutung im internationalen Zahlungsverkehr sein, denn viele Akkreditive erlauben bzw. verbieten Transshipments, weil diese *zusätzliche Risiken* bergen (Diebstahl, Verlust).

Die Tatsache, daß die praktische Bedeutung der Eisenbahn trotz ihrer massiven Förderung durch den Staat (u.a. gemäß Art. 87e GG) immer weiter zurückgeht, zeigt deren grundsätzlich geringe Eignung zur Lösung logistischer Probleme außer beim Landtransport großer Mengen von Rohstoffen. Die Bedeutung des Straßenverkehrs nimmt ständig zu, obwohl dieser massiv unter ideologischen Einschränkungen leidet. Der Flugverkehr bietet zudem eine Möglichkeit, nationale Ideologien und politische Einschränkungen zu umgehen (z.B. bei der Besteuerung bei Flugbenzin).

2.4.6. Entscheidungsstrategie

Die Entscheidung über Zentralisierung, Transportstufen und Wahl des Transportmittels ist eine *vielfältige* und oft *langfristig bindende* Entscheidung. Es reicht daher meist nicht, diese Entscheidung als reine Kostenvergleichsrechnung auszuführen, weil auch schlecht oder gar nicht quantifizierbare Größen eine Rolle spielen. Eine der wichtigsten Entscheidungsstrategien ist daher die *Nutzwertanalyse*. Diese ist ein Verfahren der Nutzen-Kosten-Untersuchung, das die Wirksamkeit von Prozessen in nichtmonetären Einheiten im Hinblick auf ein formuliertes Ziel oder Zielsystem beurteilt und bewertet. Auf diese

Art lassen sich auch nichtmonetäre oder nichtquantitative Entscheidungsgründe in die Überlegung einbeziehen. Die Nutzwertanalyse baut häufig auf dem *Erwartungswert* auf bzw. ist eine Variante der Erwartungswertrechnung. Sie kann mehrere Zielparameter parallel berücksichtigen und erlaubt die Aufstellung einer konsistenten Zielhierarchie.

2.5. Logistik und Lagerung

Obwohl die Lagertheorie eigentlich ein eigener Bereich der betriebswirtschaftlichen Funktionenlehre ist, ist sie doch *eng mit der Logistik verbunden*, weil logistische Prozesse häufig auch Lagerungen bedingen. Zu den Aufgaben, die die Logistik in Zusammenarbeit mit der Lagerung erfüllen soll, gehören

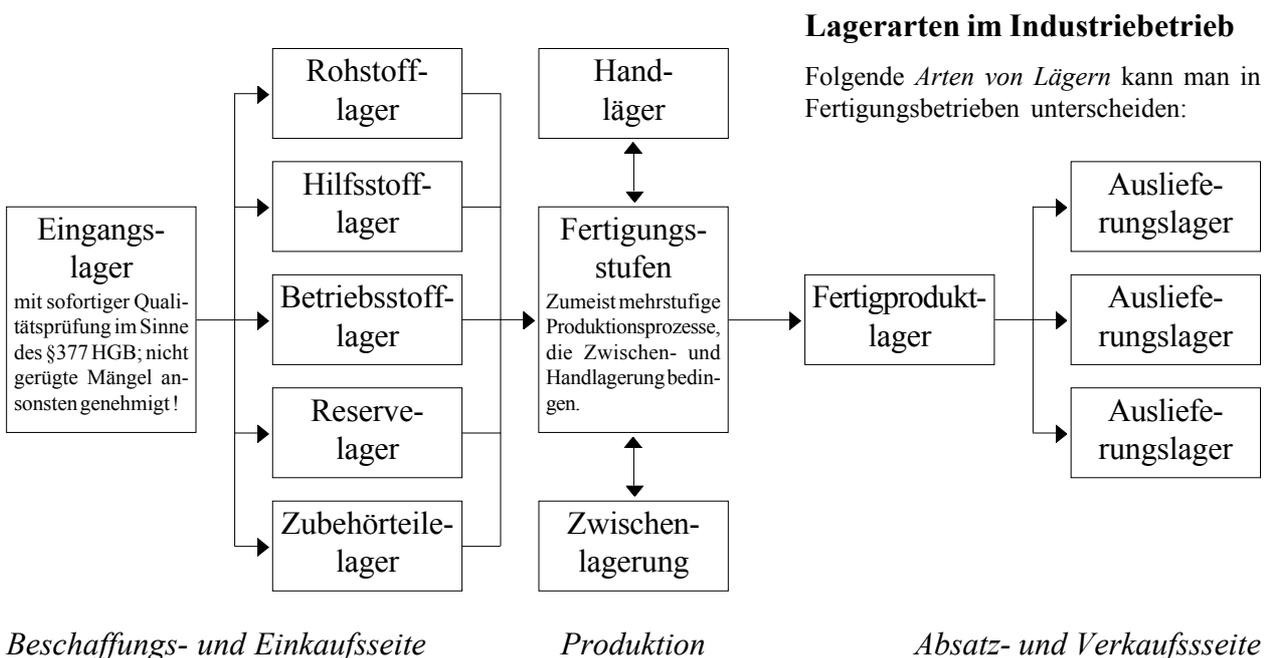
- *Versorgen* mit Bedarfsgegenständen,
- *Entsorgen* von Abprodukten,
- *Kommissionieren*, d.h., die Bereitstellung bedarfsge-rechter Mengen.

2.5.1. Lagerordnung und Logistik

Unter der *Lagerordnung* versteht man die Ordnung, in der die Bedarfsobjekte im Lager abgelegt werden, also die *Zuordnung von Lagerraum und Lagergut* unter dem Gesichtspunkt der *Produktivitätssteigerung*. Die Lagerordnung ist ein Problem der *Lagergestaltung* und gehört in den Bereich der *Lagerplanung*. Zwischen logistischer Strategie und Lagerordnung muß *Harmonie* bestehen, d.h., die gewählte Lagerordnung muß die logistische Aufgabe unterstützen.

Insbesondere unterscheidet man *zwei Grundmodelle*:

- Festplatzsystem: jedes Material hat seinen *festen Stammplatz* und darf/kann nur dort abgelegt werden.
- Freiplatzsystem, auch chaotische Lagerhaltung: jeder im Lager vorhandene freie Stellplatz steht für *jede Art von Bedarfsobjekt* zur Verfügung, alles kann also *überall* sein.



Das zugrundeliegende *Informationssystem* (zumeist auf Basis einer *Datenbank*) muß folgende Fragen beantworten können:

- Auf welchem Lagerplatz befindet sich welches Material?
- Welches Material befindet sich auf welchem Lagerplatz?

Chaotische Lagerhaltung ist damit erst mit Hilfe elektronischer Systeme möglich und verbreitet sich daher erst in den vergangenen Jahrzehnten in nennenswertem Umfang; allerdings kann ein elektronisches Verwaltungssystem die chaotische Lagerhaltung dann auch mit Verfahren der *Transportoptimierung* verbinden und zu einer erheblichen *Optimierung von innerbetrieblichen Prozessen* führen.

Hier ist zumeist die verwendete *Lager- und Transporttechnik* relevant.

2.5.2. Elemente der Lager- und Transporttechnik

Unter *Lagertechnik* versteht man die Gesamtheit der in einem Lager benutzten *technischen Sachmittel* zur Aufbewahrung der Lagerobjekte und zu deren innerbetrieblichen Transport. Die Lagertechnik hat Einfluß auf die möglichen oder anwendbaren Optimierungsalgorithmen (im Bereich des *Operations Research*) und die verwendete bzw. mögliche *Lagergestaltung*. man unterscheidet *Aufbewahrungs- und Transporttechnik*.

Wichtige Elemente der *Aufbewahrungstechnik* sind:

- **Einschubregale**: Regalart, bei der Container oder Behälter genau in Regalfächer passen und das Lagergut nach außen hin völlig umschließen. Ausführungen, die durch eine Neigung der Einschubbahnen eine Bewegung der Container auf ein Ziel hin ermöglichen, sind oft zugleich auch Durchlaufregallager.
- **Flachbodenregal**: Jede Regalart, bei der die Regalböden keine Neigung besitzen. Oft als Handlager, vielfach in Verbindung mit Regalfahrzeugen.
- **Hochregal**: in die Höhe ausgedehntes und damit Grundfläche sparendes Regalsystem. Aufgrund der Höhe ist ein in der Regel computergesteuertes Entnahme- und Einlagerungssystem erforderlich, das häufig mit Optimierungsmodellen kombiniert Wege- oder Zeitoptimierung betreibt. Das Hochregal ermöglicht eine hohe Warendichte und eine maximale Ausnutzung des vorhandenen Raumes.
- **Karussellregal**: Eine Regalart mit horizontaler rotierender Achse. Container oder Behälter sind damit entlang einer horizontalen Öffnung zugänglich. Ähnliche Systeme sind manchmal auch als „Paternoster“ bekannt.
- **Kragarmregallager**: Spezielle Regalart, bei der Langgut (Röhren, Stangen) auf Querholmen gelagert werden. Ein mechanisches Greifsystem kann die Lagerobjekte in das Lager einbringen oder entnehmen.

- **Lagerbehälter** sind neben dem Container, der durch seine genormten Abmessungen (20“) die Umladung von Schiffen auf LKW beschleunigt und damit die Produktivität und die Umschlagshäufigkeit erhöht, die ebenfalls genormte Palette, auf die auch ein gitterartiger Aufbau zum Zusammenhalten der Ladeobjekte befestigt werden kann (Gitterboxpalette). Unter Kolli (oder: Colli) versteht man die einzelnen Packstücke, also die kleinste Einheit der Logistik. Eine Versandeinheit kann in mehrere Packstücke unterteilt sein. Durch die individuelle Identifikation der einzelnen Packstücke kann die Versandeinheit stets zusammengehalten oder auch über mehrere Transporte hinweg koordiniert werden. Wechselaufbauten sind containerähnliche Transportbehälter, die im Verkehr auf der Straße und auf der Schiene benutzt werden aber nicht stapelbar sind. Durch ihre genormte Größe passen mehrere auf einen LKW bzw. einen Waggon.

- **Packmittel** sind alle Materialien, die zur Verpackung der Ware dienen. Sie sollen die Ware vor Umwelteinflüssen auf dem Transport sichern, die Umwelt vor Einflüssen der Ware schützen (Geruch, chemische Substanzen, Strahlung, Explosion, Brand usw), einzelne Teile der Ware zusammenhalten aber auch (für den Handel) präsentieren. Packmittel, bei denen der Präsentationszweck im Vordergrund steht, heißen auch Verkaufsverpackungen; Packmittel, die primär dem Transport und/oder der Sicherung der Ware dienen, heißen auch Transportverpackungen.

- **Palettierer, Palettierroboter** sind alle technischen (und/oder automatischen) Vorrichtungen zum Verpacken von Packstücken auf Paletten, zumeist unter Verwendung von Packmitteln.

- **Runge**: Ein Sonderbehälter mit Aufsteckbügel zum hängenden Transport.

- **Umlaufregal**: Eine Regalart mit vertikaler rotierender Achse. Entnahme und Befüllung geschehen damit entlang eines vertikalen Bereiches.

Die wichtigsten *Transporttechniken* der Logistik lassen sich unterscheiden in:

- **Verkehrsmittel**: nicht-ortsgebundenes Hilfsmittel, das auf öffentlichen Verkehrswegen (Straße, Schiene, Wasser, Luft) transportiert,

- **Transportsmittel**: nicht-ortsgebundenes Hilfsmittel, das auf innerbetrieblichen Verkehrswegen bewegt und

- **Fördermittel**: ortsgebundenes Hilfsmittel, das innerhalb anderer Systeme (Regale, Bänder, Hallen) transportiert.

Praktische Beispiele im Rahmen ortsfester Lagerung oder des Güterumschlages sind:

- **Durchlaufregallager**: Lager- und Transporttechnik, bei der sich Paletten oder Container an oder auf einem Rollen- oder Schienensystem häufig nur schwerkraftgetrieben auf ein Ziel zubewegen. Das System hält damit das FIFO-Prinzip streng ein.

- **Gabelstapler**: die wahrscheinlich häufigste betriebliche Transportart zum motorisierten Bewegen von Paletten.
- **Flurfördermittel** sind alle Transportmittel, die zum Transport den Boden berühren müssen, also z.B. Gabelstapler, Handgabelschubwagen usw.
- **Flurfreie Fördermittel** sind alle Transportmittel, die den Boden nicht berühren müssen, also Kräne aber auch Systeme mit über dem Lager angebrachten Schienen oder Laufrollen.
- **Handgabelhubwagen**: Horizontaltransportmittel in der Regel für Paletten, das mit der Hand gezogen (oder geschoben) wird.
- **Kreisförderer**: Flurfreies Transportmittel, bei dem durch ein an der Decke des Lagerraumes angebrachtes mechanisches System die Lagerobjekte bewegt werden, oft einfach ein Kran.
- **Pritsche**: Eine Wechselbrücke für LKW, die ermöglicht, eine Ware oder auch einen Container ohne Umladen mit unterschiedlichen LKW zu transportieren, indem einfach verschiedene Fahrzeuge vorgespannt werden.
- **Schleppkreisförderer**: Flurtransportmittel, das Behälter oder Trolleys kontinuierlich bewegt, oft als Teil eines umfassenden innerbetrieblichen Transportsystems. Geschieht die Bewegung des Systems durch ein mechanisches Antriebssystem im Hallenboden, dann spricht man oft von einem sogenannten *Unterpflug-Schleppkreisförderer*.

2.5.3. Umschlag und Kommissionierung

Transport- und Produktverpackung unterscheiden sich oft erheblich. Zudem zwingen Eigenschaften des Transportbehältnisses und des Transport- oder Verkehrsmittels, andere Mengen in anderen Verpackungen zu transportieren als auszuliefern. Die Lagerung erfüllt daher im Zusammenhang mit der Logistik *zwei spezielle Aufgaben*:

2.5.3.1. Umschlag

Umschlag ist zunächst einfach die *Umladung* von einem Transport- oder Verkehrsmittel auf ein anderes. Der Umschlag kann *strategisch* bedingt sein, wenn etwa die dezentrale Bereithaltung von Gütern aus Marktgründen *gewünscht* ist, und eine längere Lagerung bedingen. Sie kann auch taktisch bedingt sein, wenn Langstrecken-Verkehrsmittel Eigenschaften haben, die für Kurzstrecken-transporte z.B. hin zum Kunden *nicht taugen*, etwa wenn große Sattelschlepper nicht durch enge Altstadtstraßen fahren können.

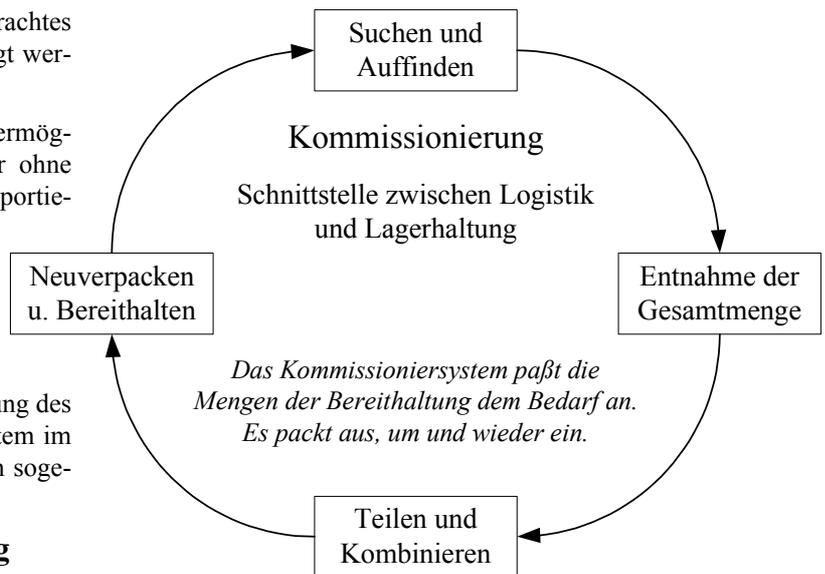
Umschlagprozesse verursachen einen *erheblichen Teil der Logistikkosten* und sind daher vielfaches Ziel von *Optimierungsstrategien*. Diese können aus dem *Operations Research* stammen und etwa in den (nachstehend dargestellten) Methoden der Transport-, Wege- und Mengenoptimierung bestehen; sie können aber auch langfristig orientiert sein und beispielsweise in der Zusammenfassung von Umschlags- und physischen Veränderungsprozessen an den Transportgütern bestehen. Hier spricht man von der *Kommissionierung*.

menfassung von Umschlags- und physischen Veränderungsprozessen an den Transportgütern bestehen. Hier spricht man von der *Kommissionierung*.

2.5.3.2. Kommissionierung

Kommissionierung liegt vor, wenn Güter im Rahmen des Transportes, zumeist bei mehrstufigem Transport im Zusammenhang mit Lagerprozessen, *umgepackt* werden. Das Umpacken soll

- die Güter aus transportgerechten Verpackungen (Container) in bedarfsgerechte Verpackungen (Kartons) *umpacken* und
- zumeist große Transportmengen in bedarfsgerechten Kleinmengen *bereitstellen*:



Besonders der zweite Aspekt bedingt in der Regel schon eine Lagerung, weil Transport- und Bedarfszeitpunkte *nicht zusammenfallen*.

Man kann auch sagen, daß durch die Kommissionierung der *Übergang von der art- zur auftragsgerechten Zusammenfassung von Bedarfsgegenständen* stattfindet: werden Kleidungsstücke beispielsweise in verschlossenen Containern feuchtigkeits-, licht-, luft- und staubgeschützt artgerecht per Schiff transportiert, so müssen sie im Verkaufsraum offen auf Bügeln in einer transparenten Plastehülle auftragsgerecht bereitgestellt werden. Diese Transformation übernimmt die Kommissionierung, die daher in eine *Zentralisierungsstrategie* eingebunden sein muß.

2.5.3.3. Weitere Funktionen von Umschlag und Kommissionierung

Im Zusammenhang mit dem Warenumschlag und der Kommissionierung werden oft *weitere Dienstleistungen* vom Logistiker übernommen, die nicht eigentlich Aufgaben der Logistik sind, sich aber gut in den Transport- und Bereitstellungsprozeß *integrieren*:

- Das Auszeichnen von Gütern mit *Preisschildern* oder Waren-, Marken- und anderen Zeichen,
- Das Anbringen von *Wareninformationen*,

- Das Anbringen von *Sicherungsetiketten gegen Ladendiebstahl*,
- das Abringen von *Barcode-Labels* und *RFID-Etiketten*,
- *Qualitäts-, Mengen und andere Kontrollen* sowie deren *Rückmeldung an den Auftraggeber* als Teil der Erfassungs- und Kontrollaufgabe, also zur Sicherstellung des dem Warenfluß umgekehrten Informationsfluß vom Bedarf zum Produzenten.

2.5.3.4. Kommissioniersysteme

Kommissioniersysteme unterscheiden sich äußerlich nicht von anderen Transport- und Lagertechniken. Das Umpacken und ggfs. weitere Bearbeiten (z.B. Etikettieren) von Waren erfordert aber eine *ausgefeilte Materialflußstrategie*. Hier kann man unterscheiden:

- **Einstufige Systeme:** Das Umpacken geschieht in *einem Arbeitsgang*;
- **Mehrstufige Systeme:** Die Warenbearbeitung besteht aus *mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten*, die mindestens nach Phase *abgestimmt*, oft auch nach Zeit *vertaktet* sein müssen.

Wenn die Kommissionierung weitere Dienstleistungen wie Etikettierung oder Auszeichnung umfaßt, ist sie *praktisch immer mehrstufig*.

Um einer steigenden Menge und größeren Breite des Sortiments im Kommissionierlager gerecht werden zu können, muß meist das Festplatzsystem zugunsten chaotischer Lagerung *aufgegeben werden*. Flexible Lagerplatzvergabe ermöglicht die *Einsparung von Lagerraum* und die *Optimierung von Wegstrecken*.

Die Arbeitsgänge am Ende der Kommissionierung (z.B. die Sortierpackerei) müssen *weitgehend* von der Kommissionierung selbst *losgelöst* werden. Das erlaubt die Bearbeitung auftragsweise und erhöht die Unabhängigkeit vom Nachschub. Die Zahl der Zugriffe in das Lager sinkt mit zunehmender Entkoppelung zwischen Kommissionierung und Belieferung. Zudem kann durch Wegfall des Auftragsbezuges der einzelne Behälter oft *höher befüllt werden*, so daß die *Behälterzahl sinkt* und die *Leistung der Fördertechnik steigt*. Schließlich erlaubt die Loslösung von Kommissionierung und Transport die *Konzentration fehlerintensiver manueller Vorgänge*.

2.6. Logistische Gesamtkonzepte

Aus den vorstehend dargestellten Elementen haben sich im Laufe der Zeit *strategische Gesamtkonzepte* herausge-

bildet. Diese sind in sich konsistente Summen aus aufeinander bezüglichen Einzelverfahrensweisen, die insgesamt einen Marktvorteil begründen. Die Globalisierung und die Triadisierung *begünstigen* die Herausbildung solcher Strategien; Ökologismus und Antiliberalismus beispielsweise in Europa *behindern* sie – zum Teil mit geradezu wahnwitzigen Aufrufen wie dem aus dem Frühjahr 2007, keine Kiwis mehr zu essen, weil diese zuviel CO₂ „verbrauchen“. Sieht man von solchem ideologischen Unsinn ab, so lassen sich unterscheiden:

- *überbetriebliche Logistikkonzepte*, die meist in der Nähe zu Lean Management Strategien stehen und den Güterfluß entlang der gesamtwirtschaftlichen Wertekette zum Gegenstand haben. Sie heißen *Versorgungskettenmodelle* oder *Supply Chain Konzepte*.
- *innerbetriebliche Logistikkonzepte*, die meist die Sicherung des Leistungsprozesses und die Rationalisierung von Abläufen zum Ziel haben. Sie entwickeln sich oft aufgrund der Basis des von Toyota eingeführten Kanban-Systems.

2.6.1. Supply Chain Management Konzepte

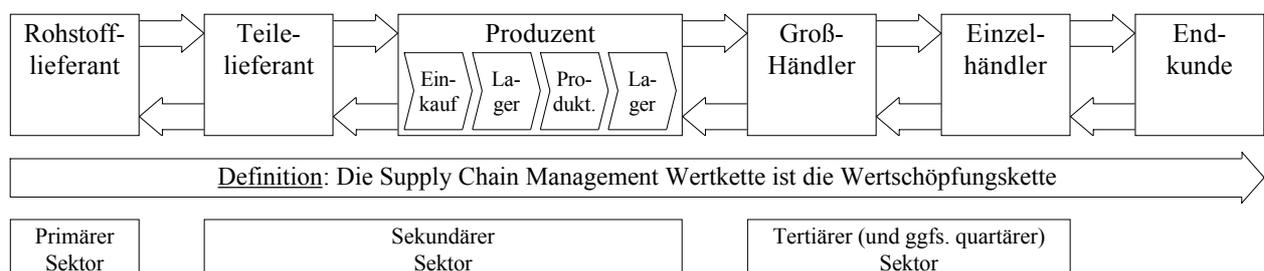
2.6.1.1. Grundlegende Definition

Unter *Supply Chain Management* (SCM) versteht man allgemein jedes Konzept der Optimierung der unternehmensinternen oder unternehmensübergreifenden Wertschöpfungskette. In der Praxis bezieht sich der Begriff aber fast immer auf mindestens betriebsübergreifende Modelle.

Die *Wertschöpfungskette* ist dabei der Weg von der Natur zum Menschen, also vom Gut zum Produkt. Als Gut bezeichnet man bekanntlich, was einen Nutzen vermitteln könnte, als Produkt hingegen, was tatsächlich einen Nutzen vermittelt. Die Schaffung dieses konkreten Nutzens aus der Potentialität der Möglichkeiten ist die Aufgabe der betrieblichen Produktionsfaktorkombination. Da Wirtschaft ein physischer Stoffwechselprozeß in der Gesellschaft ist („Austausch nützlicher Güter“), besteht Bedarf an einer Organisation der Versorgung mit Bedarfsgütern.

Der *Managementbegriff* bezieht sich allgemein auf die Steuerung von Sach- und Personalmitteln.

In der Praxis ist die Versorgungskette („Supply Chain“) ein *Netzwerk verschiedener Unternehmen oder Unternehmensteile*, die *koordiniert zusammenarbeiten*, um ein Produkt oder eine Leistung herzustellen und zum Endkunden zu bringen. Der Begriff wird meist mit „Lieferkette“ oder „Logistikkette“ übersetzt, wobei diese Begriffe



mit der Auffassung der „Supply Chain“ als Produktionsnetzwerk oder auch als Unternehmensnetzwerk gleichgesetzt werden. Der Begriff steht damit dem im Kern kollektivistischen *Lean Management Ansatz* nahe.

Weder in der wissenschaftlichen Literatur noch unter den Praktikern hat sich jedoch bis heute eine *einheitliche Definition* für den Begriff Supply Chain Management herausgebildet, was zu einer gewissen *Unübersichtlichkeit des Themas* geführt hat, besonders hinsichtlich der richtigen Software-Auswahl. Einigkeit herrscht aber zumindest darin, daß sowohl die informationstechnische Integration als auch die partnerschaftliche Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg zu den Kernelementen des Supply Chain Managements gehören.

Allen Ansätzen ist eigen, daß nicht nur der Güter-, sondern auch der i.d.R. entgegengesetzte *Informationsfluß* betrachtet werden (vgl. Abbildung vorstehende Seite). Supply Chain Management ist also immer auch *Informationsmanagement*.

2.6.1.2. Ziele des Supply Chain Managements

Das Supply Chain Management steht i.d.R. als Oberbegriff für die *Optimierung der Supply Chain*. Hierzu verfolgt das S. unternehmensinterne und unternehmensübergreifende Ziele und bedient sich zu ihrer Erreichung geeigneter Konzepte. Hauptziele sind dabei z.B die Schaffung von Transparenz und der Abbau von Informationshindernissen die ganzheitliche Wertschöpfungsketten-Orientierung, die Verbesserung der Kontinuität der Material-, Informations- und Geldmittelflüsse oder die Optimierung der Komplexität. Im Rahmen des operativen Controllings bedarf es allerdings neben diesen eher allgemeinen Optimierungsrichtungen der Differenzierung von Zielen des Supply Chain Managements, die direkt über Kennzahlen gemessen werden können.

SCM strebt dabei insbesondere die Optimierung des Ablaufes hinsichtlich folgender Unterziele an:

- *Kostenvorteile*,
- *Zeitvorteile* und
- *Qualitätsvorteile*.

Diese Ziele können auch als Oberziele des Supply Chain Managements betrachtet werden. Als weitere Ziele (Unterziele) gelten:

- Der *Abbau von Lager- und Materialbeständen* in der Supply Chain,
- die *Optimierung des Informationsflusses* über Bedarf, Angebote, Bestände und Kapazitäten bzw. Erkennung von Restriktionen insbesondere für mathematische Auswertungen (Operations Research) und
- die *Verbesserung der Transparenz* durch Prozeß-, Applikations-, Daten- und Medienintegration und eine stufenweise Verkopplung von Planungsprozessen.

2.6.1.3. Prozeßgetriebene Ansätze

Zur Abstimmung des unternehmensübergreifenden Material- und Informationsflusses haben sich im Laufe der Zeit verschiedenen Supply Chain Management Konzepte

herausgebildet, die eine zeit- und kostenoptimale Gestaltung der Supply Chain Prozesse anstreben. Diese unterscheiden sich dabei erheblich in ihrer Grundkonzeption und in ihrem Branchenfokus, stehen aber oft den Grundgedanken der *Disposition* nahe bzw. bauen auf diesen auf.

In den letzten Jahren haben sich immer mehr neue Supply Chain Management Konzepte etabliert, die zentral auf die gemeinschaftliche „Win-Win“-Optimierung der Supply Chain abzielen. Im strategischen Supply Chain Management Zusammenhang bedeutet diese *kollaborative Zusammenarbeit*, daß zwei oder mehrere Supply Chain-Partner gemeinschaftlich abgestimmt, handeln. Ziel ist es, eine gemeinsame Informationsgrundlage zu bilden, hieraus abgestimmte Pläne abzuleiten, um schließlich existierende Erfolgspotentiale erschließen zu können. Unter dem Begriff „*Collaborative Supply Chain Management*“ („CSCM“) fassen diese Konzepte die Optimierung der gesamten Supply Chain als Gesamtproblem auf und versuchen, unternehmensübergreifende Optimierungskonzepte zu empfehlen. Das Supply Chain Management geht damit in einen grundsätzlich kollektivistischen Ansatz über, der dem Lean Management nahesteht oder diesem entlehnt ist; dies ist mindestens aus Gründen der elementaren Grundannahmen der Wirtschaft problematisch.

2.6.2. Kanban-Konzepte

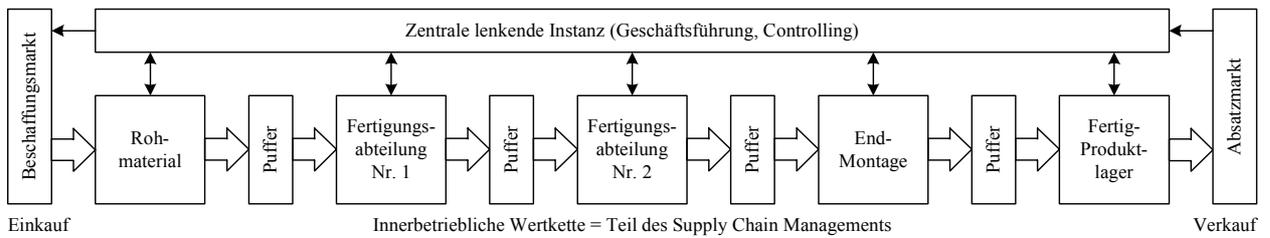
2.6.2.1. Grundlegende Definition

Von der *Toyota Motor Company* wurde in den 1970er Jahren im Zusammenhang mit der damaligen Einführung von Lean Management Konzepten ein Modell der innerbetrieblichen Materialflußsteuerung entwickelt, bei dem nicht jede Abteilung von einer zentralen lenkenden Instanz gesteuert wird, sondern die einzelnen Bereiche in der Wertkette sich gegenseitig steuern.

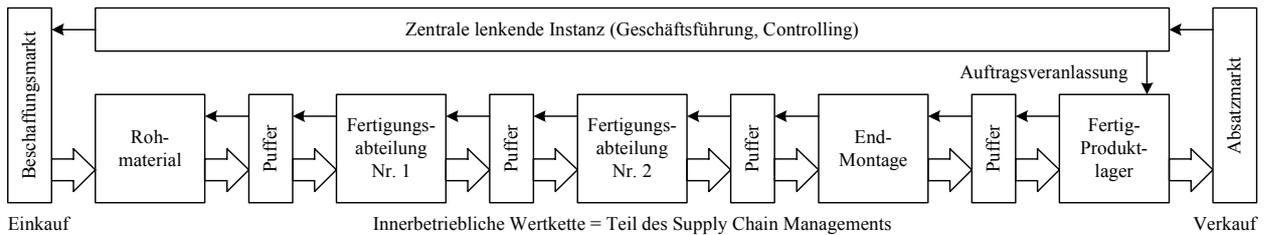
„Kanban“ bedeutet hierbei etwa „Karte“ oder „Laufkarte“. Die Kanbans bewegen sich wie bei jedem Supply Chain Management Modell *entgegen dem Materialfluß* und enthalten Informationen über den Materialbedarf, sind also Abrufdaten. Das Kanban-Konzept besteht also im wesentlichen in der *Regelung des Informationsflusses zur Optimierung des Materialflusses*. Das Kanban-System beruht damit auf Fertigung aufgrund (innerbetrieblicher) Bestellung. Es ahmt damit allgemeine Handlungsweisen auf Märkten innerbetrieblich nach. Da die einzelnen Fertigungsprozesse aber asynchron laufen, sind *Zwischenpuffer* erforderlich. Dies steigert zwar die Kapitalbindung im Lager, ermöglicht aber in den meisten Fällen Just-in-time-Modelle.

Seither sind viele einander meist ähnliche informationsgetriebene Systeme entwickelt worden, die oft alle als Kanban-Konzepte bezeichnet werden. Sie können Teil eines SCM-Systems sein (aber das SCM-Modell ist nicht Teil des Kanban-Systems).

Zwischen Supply Chain Management und Kanban-Modellen besteht meist eine *tiefgreifende Synergie*, weil die in einem System notwendigen Daten auch im anderen System nützlich sind.



Bei einem „traditionellen“ System der Materialflußsteuerung leitet eine zentrale Instanz alle Abteilungen. Der Informationsfluß (kleine Pfeile) ist vertikal, also zwischen den einzelnen Abteilungen im Leistungsprozeß und der übergeordneten Leitungsinstanz, die alle Informationen zum Materialfluß (dicke Pfeile) zugleich be- und verarbeiten muß. Der Materialfluß ist nie besser als der Überblick der zentralen Lenkungsinstanz.



Das Kanban-Prinzip baut auf *Dezentralisierung der Information*. Die zentrale lenkende Instanz interagiert nur noch mit außenstehenden Marktteilnehmern und veranlaßt den Fertigungsprozeß. Die Abteilungen in der Wertekette steuern sich dann über rückwärts laufende Informationen auf Laufkarten (*Kanban*) gegenseitig. Der Materialfluß ist damit immer so gut wie die vor Ort verfügbaren Informationen es erlauben.

2.6.2.2. Dezentrales Informationsmanagement per Kanban

Jede Abteilung bildet mit der vorgeschalteten Stelle einen weitgehend *autonom funktionierenden Regelkreis*.

- Die materialverbrauchende Stelle bezeichnet man als *Senke* und
- die das Material bereitstellende bzw. produzierende Stelle als *Quelle*.
- zum Ausgleich der zeitlichen Differenzen befindet sich zwischen beiden ein *Puffer*.

Die Senke ruft dabei das benötigte Material aus der Quelle ab. Hierdurch entsteht bei der Quelle eine *Lücke*, durch die die Quelle veranlaßt wird, neues Material bereitzustellen. Dies entspricht dem sogenannten „Supermarktprinzip“: durch den Kunden, der eine Ware aus dem Regal entnimmt, entsteht eine Lücke im Supermarktregal, die die Mitarbeiter des Marktes sogleich füllen. Die Lücke ist gleichsam eine Information über bestehenden (neuen) Materialbedarf.

Das Kanban-System *formalisiert diesen Informationsaustausch durch formale Datenträger* (die Laufkarten, „Kanbans“). Es ist also eine dezentrale Materialflußsteuerung nach dem Holprinzip (*Pull-Prinzip*). Die lenkende Zentralinstanz (Geschäftsleitung) löst nur den „hintersten“ Bedarf durch den Fertigungsauftrag an die Produktionsabteilung (oder gar durch Entnahme aus dem Fertigproduktlager) aus. Von hier aus „wandert“ die Bedarfsinformation dezentral rückwärts bis auf den Beschaffungsmarkt. Hier liegt zugleich auch die Schnittstelle in ein möglicherweise vorgeschaltetes Supply Chain Management System, das als *Verlängerung des Kanban-Modells* gesehen werden kann.

2.6.2.3. Gestaltung des Kanban-Steuerungsmodells

Das Modell erfordert *verteilte Kompetenz und Verantwortung im ganzen Produktionsapparat*. Es korreliert damit auch mit Führungsmodellen, die eine flache Hierarchie und Partizipation und Kooperation in den Vordergrund stellen, denn das garantiert meist bessere Ergebnisse, da die Zentralinstanz nicht alle im System zirkulierenden Informationen verarbeiten kann. Kanban-Modelle funktionieren daher nur schlecht im Rahmen autoritärer Führungsmodelle.

Die Kanban-Karten müssen mindestens *folgende Informationen* enthalten:

- *Identifikationsdaten* der benötigten Teile (Artikelnummer, Artikelbezeichnung, Menge, ggfs. Zeitpunkt des Bedarfes),
- die Identifikation der *Senke*,
- die Identifikation der *Quelle*,
- die Identifikation des *Pufferlagers*,
- den zu verwendenden *Behältertyp* und ggfs. *Transportweg* sowie
- weitere *materialspezifische Informationen* wie erforderliche Arbeitsgänge, Vorbereitungen, Lieferanten usw.

Es ist offensichtlich leicht, Kanban-Modelle mit den weiter unten in diesem Skript dargestellten *numerischen Optimierungsmodellen* zu koppeln, da die in einem Kanban-System bewegten Informationen gerade diejenigen sind, die die mathematische Optimierung ebenfalls benötigt. Beispielsweise eignen sich die Kanban-Daten auch zur *Wegeoptimierung* und *Transportoptimierung*. Sie bieten aber auch die Grundlage für die kaufmännische

Lagerbewertung z.B. nach Einzelbewertung, Durchschnitts- oder Verbrauchsfolgebewertung. Auch hier bietet sich eine Koppelung mit betrieblichen Informationssystemen an.

Weiterhin entsprechen die Daten der Kanbans den *Arbeitsanweisungen* des *Qualitätsmanagements*. Auch in dieser Hinsicht ist eine digitale Anbindung und Vereinheitlichung der Prozeß- und Datenbasis in einer einheitlichen Prozeßbank empfehlenswert. Ein- und dieselbe Datenbasis erscheint dann aus Sicht des QM als Qualitätssicherungshandbuch, aus Sicht des RM als Risikohandbuch, aus Sicht des Buchhalters als Bewertungsinformation und aus Sicht des Logistikers als Bedarfs- und Mengendaten.

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene *Arten von Kanban-Systemen* entwickelt:

- traditionell, d.h. auf Toyota zurückgehend, gibt es jeweils nur eine Laufkarte, die die Bedarfsinformation entgegen der Wertkette übermittelt. Man spricht vom *Ein-Karten-Kanban*.
- Bei einem sogenannten *Zwei-Karten-Kanban* unterscheidet man Transport-Kanbans und Produktions-Kanbans. Die Transport-Kanbans zirkulieren zwischen den Fertigungsabteilungen in den Pufferlagern und die Produktions-Kanbans zwischen den Pufferlagern und der jeweils vorgelagerten Quelle. Dies ermöglicht der Leitung des Pufferlagers, eine selbständige Lagersteuerung mit den jeweiligen Kennziffern der Disposition aufzubauen. Auf diese Art wird eine weitere Optimierung der Materialbestände und damit eine Senkung der Lagerkosten erreicht. Die Zwei-Karten-Methode erlaubt auch, Bedarfsmengen in andere Loseinheiten als die Bedarfseinheiten aufzuteilen. Die Quelle kann also unabhängiger vom Bedarf entscheiden, wann wieviel produziert wird, weil die der Quelle nachgeordnete Pufferlagerung „intelligent“ ist.

Folgende Regeln für die Kanban-Steuerung werden vielfach genannt:

- Jede Senke muß die benötigten Teile abholen;
- jede Senke darf nur so viel Material entnehmen, wie sie wirklich benötigt, also keine „eigenen“ Vorräte führen;
- jedes Material darf erst bei Bedarf angefordert werden und nicht „auf Verdacht“;
- jede Quelle darf erst produzieren bzw. bereitstellen, wenn eine Bedarfsmeldung in Form eines Kanbans vorliegt, um die Kapitalbindung im Lager gering zu halten, und nie „auf Verdacht“ produzieren;
- es dürfen nur brauchbare Teile weitergegeben werden.

Dieses System funktioniert *rein ablauforientiert*. Es steuert sich gleichsam selbst, was die Leitungsinstanz entlastet. Wenn es gelingt, eine harmonische zeitliche Synchronisierung zwischen den einzelnen Regelkreisen herzustellen, können die Pufferlager erheblich reduziert werden, und zwar um so mehr je geringer die Bedarfschwankungen sind. Das Kanban-System ermöglicht also

eine *harmonische Steuerung der Betriebsmittel* bei gleichzeitig *hoher Verfügbarkeit der Materialarten*. Durch Delegation von Verantwortung kann es die Motivation und den Ausbildungsstand der Mitarbeiter erhöhen. Dies dient auch der Qualitätsverbesserung. Dies alles sind aber bereits Elemente des *Lean Management*.

Das Kanban-System funktioniert meist nicht bei

- großen *Schwankungen des Bedarfes*, weil dann die Pufferlager so groß werden, daß sich das System nicht mehr lohnt, und bei
- *kundenspezifischer Einzelfertigung*, weil dann die Pufferlager durch sehr unterschiedliche Anforderungen ebenfalls zu groß werden.

Das Kanban-Modell ist also mehr oder weniger an die *Serienfertigung* gebunden. Es ist weniger oder nicht für Einzelfertigung oder beispielsweise Baustellenfertigung geeignet.

Eine wesentliche Aufgabe ist die Integration des Kanban-Prinzips in das *PPS-System* des Unternehmens. Dies kann eine vollständige Umstellung des Informationsflusses in der Software bedingen. In dem Maße, in dem das elektronische System Optimierungsaufgaben übernimmt (Operations Research), ist aber auch eine Kanban-Steuerung bei Einzelfertigung oder kundenspezifischer Produktion möglich. Die Vereinheitlichung von Teilen (*Normung*) sowie von Zwischenfabrikaten (*Baukastensysteme*) sind hierbei meist die *organisatorische Grundlage*. Da die Anforderungen an das Softwaresystem sehr individuell sind, gibt es für solche Aufgaben *keine Standardsoftware*. Der Grad der möglichen Optimierung und damit der Wettbewerbsvorteil des Unternehmens hängt damit immer mehr vom Geschick der jeweils eingesetzten Programmierer ab, die das zugrundeliegende *Workflow Management System* konstruieren.

Die Integration innerbetrieblicher Leistungsprozesse und überbetrieblicher Kooperationen in ein gemeinschaftliches digitales Modell unternehmerischen Handelns ist ein Betätigungsfeld der *künstlichen Intelligenz*. Modelle, die zum Teil auf neuronalen Netzen basieren versuchen, gesamtgesellschaftliche Optimierungsprobleme abzubilden. Die diesbezügliche Entwicklung ist jedoch noch ganz am Anfang. Auf eine vertiefte Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

3. Mathematische Probleme der Logistik

Viele logistische Probleme sind zugleich *Probleme des Operations Research*. Satellitennavigation und elektronische Erfassung von Fahrzeugen erlaubt zunehmend die mathematische Modellierung logistischer Probleme. Formale Lösungsverfahren erlauben dabei eine Optimierung der Kosten und/oder Zielerreichung und schaffen damit einen *taktischen Wettbewerbsvorteil*.

Der zunehmende Wettbewerb auf den Weltmärkten *fördert die Mathematisierung betrieblicher Abläufe*. Die Einführung von Managementsystemen steht ebenfalls in Synergie zu mathematischen Planungs- und Optimierungsmodellen, weil

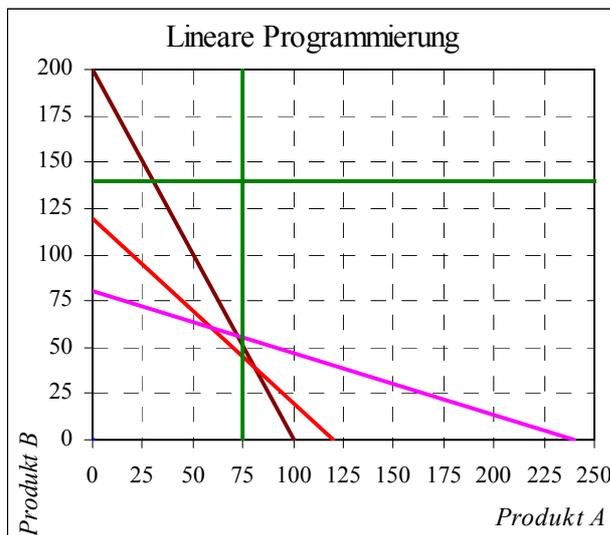
- Qualitätsmanagement nach ISO 9000 (oder die darauf aufbauenden TQM-Modelle),
- Risikomanagement im Rahmen des §289 HGB oder aufgrund der IAS/IFRS und
- das Umweltmanagement

alle jeweils eine Datenbasis erfordern, die bereits viele Informationen bietet, die der mathematischen Ablaufoptimierung dienen können. Nicht nur zwischen diesen einzelnen Managementkonzepten, sondern zwischen diesen auf der einen Seite und logistischen Konzepten auf der anderen Seite besteht also eine *tiefgreifende Zielharmonie*.

3.1. Die zwei Problemtypen der Logistik

Wie in anderen Teilbereichen der betriebswirtschaftlichen Optimierungsrechnung auch sind *zwei Problemtypen* vorherrschend. Die meisten Probleme der Logistik lassen sich auf diese beiden Problemtypen zurückführen. Es ist dabei wichtig zunächst den Problemtyp zu identifizieren, weil dann die entsprechenden Verfahren angewandt werden können. Die Erkenntnis des vorliegenden Problems und dessen Abbildung im Rahmen eines Lösungsverfahrens ist dabei oft schwieriger als die eigentliche mathematische Auflösung selbst. Es kommt also darauf an zu erkennen, womit man es zu tun hat, und den richtigen Lösungsansatz zu finden. Die Kenntnis der eigentlichen Rechenschritte ist sekundär, weil dies i. d. R. ein Computer erledigt.

Viele Probleme sind *Probleme der linearen Optimierung und Programmierung*. Unter Berücksichtigung interdependenter und singularer *Restriktionen* läßt sich dabei ein Lösungsraum aufstellen. Anschließend wird innerhalb dieses Lösungsraumes ein Optimum aufgesucht:

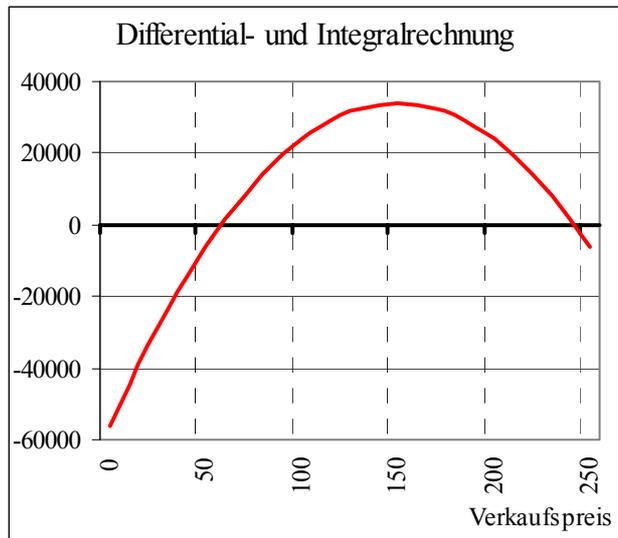


Der bekannte *Simplex-Algorithmus* ist der verbreitetste Vertreter dieses Lösungstyps. Die wichtigsten Problemarten, die auf diesem Wege zu lösen sind, sind

- Sortimentsprobleme (welches Produkt in welcher Menge fertigen),
- Aufteilungsprobleme, bei dem ein Einsatzfaktor mehrere Outputkategorien liefert (Flächen- oder Streckenschnittpläne, Dienstpläne) und

- Fahrzeugnutzungsprobleme des Typs, daß ein Transportmittel mehrere Leistungsarten anbietet (mehrere Klassen, mehrere Arten von Gütertransport), aber mehrere Transportmittel (Busarten, Flugzeugtypen) zugleich zur Verfügung stehen.

Ein alternativer Lösungstyp entwickelt eine einem Vorgang, Verfahren oder Prozeß zugrundeliegende Gleichung und findet durch Ableitung und Nullsetzung ein Optimum, d.h., ein Gewinn- oder Deckungsbeitragsmaximum bzw. ein Kostenminimum:



Grundlegend hierfür ist in aller Regel eine quadratische (oder höhere) Gleichung. Da diese jedoch nicht bekannt ist (oder vom Hersteller der Anlage nicht bekanntgemacht wird), setzen Verfahren dieses Typs statistische Rechenverfahren voraus, insbesondere die Regressionsrechnung. Diese erlauben die Ermittlung der Ausgangsgleichung. Mit Hilfe der *Differential- bzw. Integralrechnung* kann man dann einen optimalen Leistungspunkt ermitteln.

Dieses hat zwei Hauptanwendungsgebiete:

- In der *Preispolitik aufgrund der Nachfragefunktion* kann auf diese Art der optimale Verkaufspreis ermittelt werden und
- bei energieverbrauchenden Anlagen kann auf diese Art die *optimale Drehzahl* oder technische Leistung ermittelt werden.

Die Preis-Gewinn-Funktion ist dabei eine nach oben gewölbte Kurve und die Drehzahl-Verbrauchs-Funktion ist nach unten gewölbt.

In diesem Manuskript werden *im wesentlichen lineare Probleme* diskutiert. Die Kenntnis des Simplex-Verfahrens wird vorausgesetzt.

3.2. Allgemeine Formulierung des Transportproblemes

Das grundlegende Transportproblem hat zum Ziel festzustellen, wie eine gegebene Menge an Gütern mit einer gegebenen Transportkapazität zu minimalen Kosten bewältigt werden kann. Dies entspricht der grundlegenden Frage im Kanban-Modell.

Das Problem kann allgemein folgendermaßen mathematisch formuliert werden:

	Empfangsorte				Vorräte:	
	B ₁	B ₂	(...)	B _n		
Versandorte	A ₁	K ₁₁ X ₁₁	K ₁₂ X ₁₂	(...)	K _{1n} X _{1n}	a ₁
	A ₂	K ₂₁ X ₂₁	K ₂₂ X ₂₂	(...)	K _{2n} X _{2n}	a ₂
	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
	A _m	K _{m1} X _{m1}	K _{m2} X _{m2}	(...)	K _{mn} X _{mn}	a _m
Bedarf:	b ₁	b ₂	(...)	b _n		

An m Versandorten A_1, A_2, \dots, A_m sei ein Gut in den Mengen a_1, a_2, \dots, a_m verfügbar. Dieses Gut werde an n Bestimmungsorten B_1, B_2, \dots, B_n in den Mengen b_1, b_2, \dots, b_n benötigt.

Die Versandorte A_1, A_2, \dots, A_m entsprechen den *Quellen* und die Bestimmungsorte B_1, B_2, \dots, B_n den *Senken* im Rahmen des Kanban-Systems.

Es gelte die *Randbedingung*

$$a_1 + a_2 + \dots + a_m = b_1 + b_2 + \dots + b_n$$

d.h., die Bedarfsmenge entspreche genau der Verfügbarkeitsmenge. Die Transportkosten einer Gütereinheit X_{ij} vom Versandort A_i nach dem Empfangsort B_j betragen K_{ij} .

Die *Gesamtkosten* errechnen sich daher aus:

$$K = K_{11}X_{11} + K_{12}X_{12} + \dots + K_{1n}X_{1n} + K_{21}X_{21} + K_{22}X_{22} + \dots + K_{2n}X_{2n} + \dots + K_{m1}X_{m1} + K_{m2}X_{m2} + \dots + K_{mn}X_{mn}$$

das entspricht:

$$K = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n K_{ij} X_{ij} \longrightarrow \text{Minimiere!}$$

Unter folgenden beiden linearen Beschränkungen:

$$X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{in} = \sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

(*Versandbedingung*),

sowie

$$X_{1j} + X_{2j} + \dots + X_{mj} = \sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j \quad (j = 1, \dots, n)$$

(*Empfangsbedingung*)

Sowie der allgemein in wirtschaftswissenschaftlichen Problemen üblichen *Negativitätsbedingung*.

3.3. Verfahren zur Aufstellung eines Fahrplanes

Zahlreiche Verfahren wurden vorgeschlagen, darunter einfache, wie die sogenannte *Nordwestecken-Regel* oder komplizierte, wie die sogenannte *Komplex-Methode* des Institutes für angewandte Optimierung (ifao) in der Schweiz. Das nachfolgend vorgestellte algorithmische Verfahren beruht auf einer einfachen, algorithmischen Umsetzung der linearen Optimierung in der Matrix, die sich durch besonders gute Umsetzbarkeit in Computerprogramme auszeichnet. Das Verfahren ist allerdings insoweit unhandlich, da es bei großen Matrizen u.U. sehr viele Rechenoperationen enthält.

Die Optimierung geht *in zwei Schritten* vor sich. Zunächst wird durch die sogenannte *Vogel'sche Approximationsmethode* ein *Grundfahrplan* erstellt, der für jedes Feld eine zu transportierende Menge angibt. Felder, die für Wege stehen, auf denen nichts transportiert werden soll, erhalten den Wert null. Die Felder mit einer Zahl > 0 bilden in ihrer Gesamtheit die sogenannte *Basislösung*. Als Basislösung werden also alle besetzten Felder definiert. Allgemein bezeichnet man *jede mögliche Lösung* als Basislösung. Felder, die nach Ablauf des ersten Optimierungsschrittes mit einer 0 besetzt sind, heißen *Nicht-Basislösung*.

Die Aufstellung der Basislösung ist hierbei *wesentlich aufwendiger* als es beispielsweise bei der Simplex-Methode der Fall ist, weil es keine „immer“ mögliche Anfangslösung gibt.

Folgende Rechenschritte sind hierzu iterativ auszuführen:

1. Von allen Kostenwerten jeder Zeile wird der kleinste Wert der betreffenden Zeile subtrahiert:
 $K^*_{ij} = K_{ij} - \min(K_{ij}); i = 1, \dots, m$
2. Von allen K^*_{ij} jeder Spalte der so erhaltenen Tabelle wird der kleinste Spaltenwert abgezogen:
 $K'_{ij} = K^*_{ij} - \min(K^*_{ij}); i = 1, \dots, n$
3. Für jede Zeile und jede Spalte der so erhaltenen Tabelle der K'_{ij} -Werte bestimmt man nun die Differenz zwischen den beiden kleinsten Werten.
4. In der Zeile bzw. Spalte mit der größten Differenz besetzt man das Feld mit dem kleinsten K'_{ij} -Wert mit der größtmöglichen Menge.
5. Die Spalte bzw. Zeile, deren Beschränkung durch Schritt 4. erfüllt ist, wird gestrichen und für die so reduzierte Tabelle ist mit Schritt 3. fortzufahren.

Im zweiten Schritt wird die so erhaltene Basislösung durch die sogenannte *Potentialmethode* auf Optimalität geprüft. Erst in diesem Schritt wird offenbar, ob eine gefundene Basislösung wirklich ein Optimum repräsentiert:

1. Zu jeder Zeile und zu jeder Spalte der Kostentabelle ist ein Potential u_i bzw. v_j zu berechnen und zwar derart, daß für alle besetzten Felder (d.h., alle Felder mit Variablen der Basislösung) gilt: $K_{ij} = u_i + v_j$.

2. Für alle unbenutzten Felder (d.h., alle Nicht-Basisvariablen) ist aus den Potentialen ein Kostenänderungswert $\Delta K_{ij} = K_{ij} - u_i - v_j$ zu berechnen. Dieser Wert gibt an, um wieviel sich die Kosten ändern, wenn man einen gegenwärtig unbenutzten Transportweg durch Änderung des Transportplanes in Anspruch nähme.
3. Eine Lösung ist optimal, in der keine negativen ΔK_{ij} vorkommen. Kommen negative ΔK_{ij} vor, so ist eine neue Basislösung zu bilden und mit Vorschrift 1 erneut zu beginnen.

Das Verfahren nimmt folgende Rahmenbedingungen an:

- Die berechnete Leistung oder Menge ist homogen, d.h., es wird nur *eine einzige Leistungsart pro Verkehrsmittel* ausgeführt. Können etwa Passagiere in mehreren Klassen in ein- und demselben Gerät (Schiff, Flugzeug) transportiert werden, oder können Zuladungen mitgenommen werden, und besteht für jede einzelne Klasse oder Leistung eine eigene Nachfrage- und Angebotsfunktion, so ist *ausschließlich* die *Simplex-Methode* anwendbar.
- Das zu transportierende Gut hat eine *feste Einheit* (z.B. kg, Kartons o.ä.).

- Die *Transporteinheit* (z.B. Ladekapazität der Fahrzeuge) wird vorerst *vernachlässigt*.
- Die *Wegekosten* sind *konstant* und *im voraus bekannt*, etwa durch eine vorherige *Kostenrechnung*.
- Die *Stück-Wegekosten* *variieren weder mit der Menge der gleichzeitig transportierten noch mit der Menge der nachgefragten oder vorrätigen Güter*.

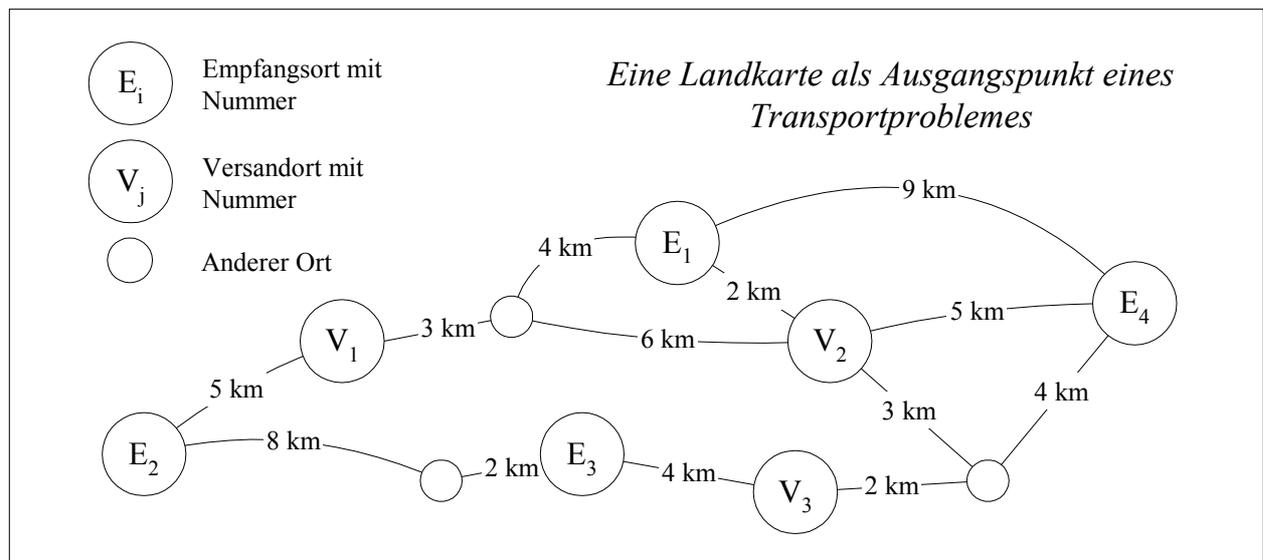
Allgemein werden also die Verhältnisse eines *polypolitischen Marktes* vorausgesetzt. Das Verfahren

- *Findet nur Pareto-Optima*, d.h., bei mehrmaligem Rechnen können verschiedene Lösungen herauskommen, die zwar relativ zu benachbarten Alternativen, nicht jedoch absolut optimal sind;

es

- ist jedoch einfach zu handhaben,
- ist leicht in Computeralgorithmen zu transponieren,
- liefert eine brauchbare Alternative für kleine Unternehmen.

Insgesamt ist die vorgestellte Methode aber einfacher als das Simplex-Verfahren.



3.4. Die Umsetzung von Landkarten

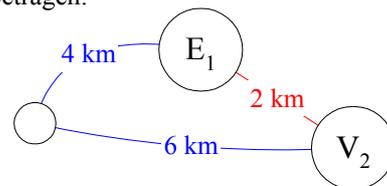
Es ist verhältnismäßig einfach, Landkarten in Transportprobleme zu übersetzen. Dies kann grundsätzlich auf *zwei verschiedene Arten* geschehen:

- Die *Entfernungsangaben* der Landkarte können als K_{ij} -Daten in das Transportproblem übernommen werden. Die Transportrechnung dient dann der *Wegeoptimierung*, d.h., findet den *kürzesten* Weg.
- Die *Kostendaten der betrieblichen Kostenrechnung* können als K_{ij} -Daten in das Transportproblem übernommen werden. Die Transportrechnung dient dann der *Kostenoptimierung*, d.h., findet den *billigsten* Weg.

Die Wegerechnung ist einfacher während die Kostenrechnung einen relativ umfangreichen Apparat von Vorbereitungen auf dem Gebiet der Teilkostenrechnung er-

fordert. Insbesondere müssen zuvor die Stückkosten ermittelt worden sein.

Die Wegerechnung berücksichtigt normalerweise nur den kürzesten Weg. Die Strecke von V_2 nach E_1 kann etwa **2 km** auf direktem Wege oder auch **10 km** mit einem Umweg betragen:



Anstatt mit Wegeangaben aus der Landkarte können die Rechnung auch mit Streckenangaben aus dem *Factory Layout* durchgeführt werden. Das Modell läßt sich sogar auf die Wegstrecken von Werkzeugköpfen von Bearbeitungsmaschinen übertragen.

Folgendermaßen wäre die obige Landkarte in einen elementaren Transportplan zu übersetzen:

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
V ₁	7 km	5 km	15 km	14 km
V ₂	2 km	14 km	5 km	5 km
V ₃	7 km	14 km	4 km	6 km

Diese relativ einfache Verfahrensweise hat die Einschränkung, daß *keine Touren* sondern nur spezielle Einzelfahrten berücksichtigt werden.

Unter einer Tour versteht man eine Fahrt, die von einem Versender zu *mehr als einem Empfänger* führt. Das Tourenproblem wird im Rahmen der Vogel'schen Approximationsmethode überhaupt nicht betrachtet. Um es abzubilden, müßte ein erheblicher Mehraufwand getrieben werden.

Es wird also davon ausgegangen, daß beispielsweise ein Fahrer von V₂ nach E₁ liefert, und ein *anderes* Fahrzeug

von V₂ nach E₂ fährt. Die Strecken V₂ → E₁ und V₂ → E₂ werden also *getrennt betrachtet*.

Würden wir auch die Frage untersuchen, in welcher *Reihenfolge* ein Fahrzeug welche einzelnen Zielorte anfährt, dann hätten wir eine Version eines Reihenfolgeproblems, die als das sogenannte *Traveling Salesman Problem* bekannt ist. Während die Vogel'sche Approximationsmethode (wie etwa auch der Simplex-Algorithmus) ein *Problem der linearen Programmierung* darstellt, d.h., unter gegebenen (konstanten) Rahmenbedingungen ein Optimum aufzufinden sucht, müßten wir hier eine Anzahl von möglichen Kombinationen auf die dabei zurückzulegende Strecke untersuchen, die sich als n! angeben läßt. Wir haben es also mit einem Problem der *Kombinatorik* zu tun. Die Anzahl der möglichen Touren bei n Zielorten wäre n!, d.h., bei 5 Empfängern gäbe es 120 mögliche Fahrstrecken aber bei 10 Zielorten wären es schon 3.628.800 und schließlich bei 100 Empfangsstationen hätten wir es mit sage und schreibe 9,332621544 · 10¹⁵⁷ möglichen Wegen zu tun!

Der derzeitige Weltrekord liegt übrigens bei einer Lösung für knapp 4.000 Zielorte...

4. Anwendungsbeispiel und spezielle Probleme

Wir betrachten in diesem Abschnitt zunächst das *grundsätzliche Lösungsverfahren*. Dieses besteht aus zwei Komponenten, der *Vogel'schen Approximation* zur Auffindung von Basislösungen und der *Potentialprüfung* zur Prüfung auf Optimalität.

4.1. Ein Einführungsbeispiel

In diesem Abschnitt wird versucht, die Lösungsstrategie grundsätzlich zu demonstrieren. Dieses Kapitel ist die Grundlage für die folgenden Darstellungen. Sie sollten dieses Kapitel verstanden haben, um die nachfolgenden Verfahren verstehen zu können.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	4	5	6	8	11	60
V ₂	2	7	8	10	6	30
V ₃	7	6	10	5	4	20
V ₄	1	2	7	4	8	50
	52	22	32	42	12	

4.1.1. Die Ausgangssituation

In vier *Verfügbarkeitsorten* V₁, V₂, ..., V₅ liegt ein Gut in den am rechten Rand der Matrix angegebenen Mengen bereit. Es wird an *fünf Empfangsorten* E₁, E₂, ..., E₅ in den am unteren Rand des Schemas angegebenen Bedarfsmengen benötigt. Bedarf wie Verfügbarkeit betragen 160 Stück.

Von jedem Verfügbarkeitsort kann zu jedem Empfangsort gefahren werden, wobei die Zahlen in der Matrix die *Stück-Transportkosten* sind. Eine Einheit des Gutes von V₁ nach E₃ zu schaffen kostet also beispielsweise 6 €. Der teuerste Weg ist der von V₁ nach E₅ mit 11 €/Stück; der billigste Weg der von V₄ nach E₁ mit 1 €/Stück. Unter dieser Annahme rechnet das nachfolgend dargestellte Rechenverfahren den *kostengünstigsten Fahrplan*.

Freilich könnte man die Zahlen ebensogut als *Entfernungangaben* betrachten. In diesem Fall wäre der Weg von V₁ nach E₃ 6 km und der Weg von V₁ nach E₅ betrüge 11 km. Unter dieser Annahme rechnet das Verfahren den *kürzesten Weg*, d.h., betreibt *Wegeoptimierung*.

In beiden Fällen muß die Ausgangsmatrix *häufig erneuert* werden, weil Entfernungen sich nicht nur durch neue Straßen sondern auch durch den aktuellen Straßenzustand und ggfs. Sperrungen, Baustellen oder einfach Schnee- und Eisglätte ändern. Ebenso können sich Kosten jederzeit ändern, schon alleine durch die *tatsächliche Auslastung der Fahrzeuge*.

Ein *Fahrplan* ist zu finden in der Weise, daß in die leeren Kästchen neben den Kostendaten (K_{ij}) *Transportmengen* (X_{ij}) gemäß den Rahmenbedingungen einzutragen sind. Die einzutragenden Mengen müssen in jeder Zeile der Versand- und in jeder Spalte der Empfangsbedingung entsprechen, d.h., die versandte Menge muß der Verfügbarkeit und die empfangene Menge dem Bedarf entsprechen.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	0	1	2	4	7	60
V ₂	0	5	6	8	4	30
V ₃	3	2	6	1	0	20
V ₄	0	1	6	3	7	50
	52	22	32	42	12	

4.1.2. Erste Iteration

Von den Kostenwerten K_{ij} einer jeden Zeile wird *der kleinste Wert der Zeile subtrahiert*, d.h., es entsteht in jeder Zeile eine Null. Die so entstehenden Werte heißen K_{ij}^* .

Der kleinste Wert der ersten Zeile (4, 5, 6, 8, 11) ist beispielsweise unzweifelhaft 4. Subtrahiert man diese 4 von allen Werten der ersten Zeile, so erhält man 0, 1, 2, 4 und 7.

Die so gefundenen Werte stellen *Kostenänderungspotentiale* dar. Der billigste Anfahrtsweg vom ersten Versandort ist der nach dem 1. Empfangsort. Die 1 in K_{12}^* bedeutet beispielsweise, daß es 1 €/Stück mehr kosten würde, von Versandort 1 nach Empfangsort 2 statt nach Empfangsort 1 zu fahren.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	0	0	0	3	7	60
V ₂	0	4	4	7	4	30
V ₃	3	1	4	0	0	20
V ₄	0	0	4	2	7	50
	52	22	32	42	12	

4.1.3. Zweite Iteration

Von den K_{ij}^* -Werten der 1. Iteration werden nunmehr spaltenweise wiederum die *Minima subtrahiert*. Dabei entstehen Nullen in Spalten, in denen es bislang noch keine Nullen gegeben hat. Spalten, die bereits eine Null enthielten, ändern sich nicht.

Allgemein muß nach Ausführung dieses Schrittes in jeder Spalte und in jeder Zeile *mindestens eine Null* vorhanden sein.

Die so erhaltenen Werte sind die K_{ij}^* -*Kostendifferenzwerte*. Sie besagen, wieviel Euro pro Stück ein Abweichen von dem je Zeile bzw. Spalte kostengünstigsten Transportweg kosten würde.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	0	0	32	3	7	60 0
V ₂	0	4	4	7	4	30 4
V ₃	3	1	4	0	0	20 0
V ₄	0	0	4	2	7	50 0
	52	22	32	42	12	
	0	0	4	2	4	

4.1.4. Dritte Iteration

Gemäß Rechenanweisung 3 wurden zunächst *Differenzen der Kostendifferenzwerte* gebildet und am Rand notiert. Diese Werte sagen aus, welche *mindeste stückkostenmäßige Folge ein Abweichen vom optimalen Transportweg haben würde*.

Anschließend wurde nach Rechenanweisung 4 die *Spalte mit der größten Differenz* ausgesucht, wo das Feld mit dem kleinsten K_{ij}^* mit der *maximal möglichen Transportmenge* belegt wurde.

Für diese Operation hätte auch die zweite Spalte zur Verfügung gestanden, in welchem Falle es am Ende zu einer anderen Lösung kommen könnte. Diese wäre gleichermaßen optimal. Es liegt also ein Fall von *Mehrdeutigkeit* vor.

Betriebswirtschaftlich gesprochen bedeutet die vorstehende Operation, daß der Transportweg zunächst in maximaler Form belegt

wird, von dem abzuweichen am teuersten gewesen wäre. Da auf diese Weise der Bedarf des Empfangsortes E₃ gedeckt worden ist, wurde die 3. Spalte eliminiert (5. Rechenanweisung). Da noch weitere Spalten übrig sind, muß mit dem dritten Rechenschritt in einer neuen Iteration erneut begonnen werden.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	0	0		3	7	60
			32			0
V ₂						30
	30					
V ₃	3	1		0	0	20
						0
V ₄	0	0		2	7	50
						0
	52	22	32	42	12	
	0	0		2	7	

4.1.5. Vierte Iteration

Nunmehr wird die zweite Spalte *eliminiert*, weil sie den höchsten Differenzwert (4) aufgewiesen hatte. Der billigste Transportweg wird hier mit der maximal möglichen Menge belegt. Da nunmehr der Versandort 2 seine gesamte Verfügbarkeit geliefert hat, wird die zweite Zeile eliminiert.

Da nur die noch vorhandenen Kostendifferenzwerte zur Bildung der Differenzen gemäß Rechenanweisung 3 beitragen, wurden nunmehr neue Differenzen gebildet. Diese zeigen klar, daß in der nächsten Iteration mit Spalte 5 fortgefahren werden sollte, da ein Abweichen von dem dort noch günstigsten Transportweg zu einem erheblichen Kostenanstieg führen würde.

Die in der 3. und der 4. Iteration eliminierten Zeilen bzw. Spalten werden *ausschließlich* aufgrund der Erfüllung der durch sie

dargestellten Bedingungen ausgelöscht. Die Erfüllung einer Bedingung und nachfolgende Eliminierung einer Zeile oder Spalte hat *nichts* mit der vorherigen Wahl eines maximalen Kostendifferenzwertes zu tun, d.h., es kann zunächst eine Zeile gewählt und dann eine Spalte eliminiert werden oder umgekehrt!

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	0	0		3		60
			32			0
V ₂						30
	30					
V ₃	3	1		0		20
					12	1
V ₄	0	0		2		50
						0
	52	22	32	42	12	
	0	0		2		

4.1.6. Fünfte Iteration

Die *fünfte Spalte* wurde nunmehr eliminiert, d.h., der 5. Empfangsort bekommt seinen Bedarf durch Lieferung vom 3. Vorratsort gedeckt. Da dort aber 20 Einheiten zur Verfügung stehen, am 5. Empfangsort jedoch nur 12 benötigt und geliefert werden, *bleibt die 3. Zeile aktiv*. Dies bedeutet, daß der Fahrer, der die 20 Produkteinheiten von Versandort 3 abholt, außer zum Empfangsort 5 auch noch an zumindestens ein anderes Ziel fahren muß, das sich noch nicht ergeben hat.

Durch diese Operation sind erneut andere Differenzen entstanden. Allgemein müssen nach der Eliminierung einer Zeile die Spaltendifferenzwerte neu berechnet werden, und nach der Eliminierung einer Spalte die Zeilendifferenzwerte.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	0	0		3		60
			32			0
V ₂						30
	30					
V ₃						20
				8	12	
V ₄	0	0		2		50
						0
	52	22	32	42	12	
	0	0		1		

4.1.7. Sechste Iteration

Aufgrund der nunmehr hoffentlich bekannten Rechenregeln wird festgelegt, daß der Fahrer, der von Versandort 3 ausliefert, auch noch an Empfangsort 4 fahren muß und dort 8 Einheiten abliefern. Dies eliminiert die dritte Zeile, aber nicht die vierte Spalte, weil dort noch ein Restbedarf besteht.

Daß das Fahren einer Tour mit mehreren Zielorten die Transportstückkosten für die einzelnen Zielort verändern kann, wird in diesem Modell *vernachlässigt*. Wollte man dies berücksichtigen, so müßte man die nunmehr noch offenen Wege wie ein neues Transportproblem behandeln und mit dem ganzen Prozeß von vorne beginnen, oder ggfs. gleich das *Simplex-Verfahren* anwenden.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	0	0				60
			32			0
V ₂						30
	30					
V ₃						20
				8	12	
V ₄	0	0				50
				34		0
	52	22	32	42	12	
	0	0				

4.1.8. Siebte Iteration

Unter der Bedingung der nunmehr verbleibenden Differenzen ist die restliche Lösung beliebig.

Hier liegt ein neuer Fall von *Mehrdeutigkeit* vor. Mehrdeutigkeiten in der Endphase des Lösungssystems münden jedoch häufig in identische Endlösungen, während Mehrdeutigkeiten in den frühen Phasen des Lösungsprozesses zumeist auf das Vorhandensein mehrerer, gleichermaßen optimaler aber dennoch total verschiedener Endlösungen hindeuten.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	4	5	6	8	11	60
	22	6	32			
V ₂	2	7	8	10	6	30
	30					
V ₃	7	6	10	5	4	20
				8	12	
V ₄	1	2	7	4	8	50
		16		34		
	52	22	32	42	12	

4.1.9. Achte Iteration – Erreichen der Basislösung

Die restlichen Felder wurden nunmehr willkürlich belegt. Hilfsregeln können zur Anwendung kommen (z.B. Nordwestecken-Methode).

Da sie nicht mehr benötigt werden, wurden die K'_{ij} -Werte entfernt und die ursprünglichen Kostendaten wieder eingefügt. Die nunmehr aus diesem Fahrplan entstehenden Gesamtkosten betragen:

$$4 \times 22 + 5 \times 6 + 6 \times 32 + 2 \times 30 + 5 \times 8 + 4 \times 12 + 2 \times 16 + 4 \times 34 = 626.$$

Nunmehr wäre mit Hilfe der *Potentialmethode* zu prüfen, ob diese Lösung tatsächlich ein Optimum darstellt. Ist das nicht der Fall, muß von vorne begonnen werden. Durch Verzweigungen auftretende Mehrdeutigkeiten führen dann meist zum Erfolg.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
	4	5	6	7	6	
V ₁	4	5	6	8	11	60
0	22	6	32			
V ₂	2	7	8	10	6	30
-2	30					
V ₃	7	6	10	5	4	20
-2				8	12	
V ₄	1	2	7	4	8	50
-3		16		34		
	52	22	32	42	12	

4.2. Prüfung der gewonnenen Basislösung auf Optimalität

4.2.1. Die Potentialmethode

1. Rechenschritt der Potentialmethode: Für alle Kostendaten in der Basislösung wurden *Potentiale* u_i und v_j gefunden, für die gilt: $K_{ij} = u_i + v_j$.

Potentiale können *auch negative Zahlen* sein, solange sie die genannte Bedingung erfüllen. Zur *Basislösung* gehören nur die *Felder, die besetzt sind*, d.h., die Strecken, die auch tatsächlich gefahren werden (dick umrandet). Für Elemente der Nicht-Basislösung (restliche Felder) muß die genannte Bedingung *nicht* zutreffen.

Dieser Rechenschritt ist keineswegs so trivial, wie es auf den ersten Blick erscheinen mag. Da für jedes besetzte Feld zwei

Potentiale zu vergeben sind, die jeweils aber auch wieder für andere Zeilen und Spalten richtig sein müssen, findet man oft im Laufe der Vergabe der Potentiale „unmögliche“ Situationen in denen bereits zuvor vergebene Zahlen nicht mehr zu den weiteren Feldern der Basislösung „passen“. Für dieses Problem gibt es *keine eindeutige Lösung*, aber dennoch einen unter den Bedingungen der Verwendung von Software gangbaren Weg:

1. Man *beginne mit einer Null* für die erste Zeile (hier: bei V_1).
2. Anschließend schreibe man die aufgrund dieser Null zu dieser Zeile passenden Potentiale der Spalten auf.
3. Man setze dies mit den folgenden Zeilen bis zum Ende fort.
4. Stößt man unterwegs auf eine „Unmöglichkeit“, so ist mit einer null in der *Spalte* erneut zu beginnen und wie oben zeilenweise nach unten zu verfahren.
5. Funktioniert dies auch nicht, so ist mit einer *beliebigen anderen Stelle* zu beginnen, vorzugsweise der *diagonal gegenüberliegenden Ecke* des Diagrammes.
6. Bringt auch dies keinen Erfolg, so kann mit *beliebigen anderen Zahlen* probiert werden.

Es gibt *immer* eine mögliche Lösung, aber keinen definierten Weg dorthin. Der vorstehende Algorithmus ist daher auch als sogenanntes „Schütteln“ bekannt: solange probieren bis sich eine Lösung findet. Die „Schüttelmethode“ ist eine programmtechnische Hilfskonstruktion. Wenn ein analytischer Weg zur Ableitung von Lösungen bekannt wird, so ist dieser der „Schüttelmethode“ möglicherweise vorzuziehen.

	E ₁ 4	E ₂ 5	E ₃ 6	E ₄ 7	E ₅ 6	
V ₁ 0	4	5	6	8 +1	11 +2	60
V ₂ -2	2	7 +4	8 +4	10 +5	6 +2	30
V ₃ -2	7 +5	6 +3	10 +6	5	4	20
V ₄ -3	1 ±0	2	7 +4	4	8 +5	50
	52	22	32	42	12	

2. und 3. Rechenschritt der Potentialmethode: Für alle Felder der Nicht-Basislösung wird nunmehr $\Delta K_{ij} = K_{ij} - u_i - v_j$ berechnet. Es ergeben sich *keine negativen Werte*. Dies zeigt, daß die vorliegende Lösung *tatsächlich ein Optimum* darstellt.

Das Vorhandensein einer 0 unter den ΔK_{ij} -Werten zeigt, daß es *zumindestens einen gleichermaßen guten alternativen Fahrplan* geben muß, der den Transportweg verwendet, der derzeit durch die Null als ΔK_{ij} -Wert gekennzeichnet ist.

Es gibt keine Möglichkeit herauszufinden, ob nur diese beiden Möglichkeiten bestehen, oder noch ganz andere, vielleicht noch bessere Transportfahrpläne bestehen. Das vorliegende Verfahren liefert nur einen Vergleich mit „benachbarten“ Fahrplänen. Benachbart ist jeder Fahrplan, der nur eine einzige Änderung zum vorliegenden aufweist. Ein Optimum, das nur relativ zu seinen Nachbarn optimal ist, heißt auch *Pareto-Optimum*. Nichts

spricht gegen die Existenz nicht-benachbarter Optima, deren Lösung u.U. vollkommen verschieden von der vorliegenden ist. Der größte Nachteil des vorliegenden Verfahrens besteht im Nichtvorhandensein einer direkten Kontrollmöglichkeit auf das Vorhandensein solcher nichtbenachbarter Optima. Der einzige Weg, eine diesbezügliche Prüfung durchzuführen, bestünde in der *konsequenten Berechnung aller zulässiger Alternativen*, d.h., bei jeder Mehrdeutigkeit müßten alle im vorliegenden Beispiel nicht berechneten Alternativen ebenfalls untersucht werden. Da dies bei praktischen Anwendungen äußerst aufwendig sein kann, eignet sich dieses Verfahren in der Realität ausschließlich für Anwendungen unter Einsatz der EDV.

4.2.2. Mehrdeutigkeit, Gabelungen, Backtracking

Anders als beispielsweise beim Simplex-Algorithmus ist bei der Vogel'schen Approximation die Aufstellung der Basislösung das Hauptproblem. Leider ist das nicht so trivial wie bei Simplex, d.h. es kommt zu Mehrdeutigkeiten. Dies haben wir oben schon dem Grunde nach demonstriert. Schauen wir in diesem Kapitel mal nach, wie man mit dem Problem der Mehrdeutigkeiten umgehen kann.

Für ein einfaches Transportproblem

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	
V ₁	7	5	12	6	120
V ₂	4	3	20	10	200
V ₃	7	14	1	16	90
V ₄	12	4	8	11	60
	50	200	80	140	

findet sich eine Lösung in folgenden Schritten, die der Leser nachvollziehen muß, wenn er dieses Kapitel verstehen will. Das Programm zur Transportoptimierung im Excel-Ordner der BWL CD kann hierzu verwendet werden.

Die einzelnen Lösungsschritte sind:

1. V₁ nach E₄: **120** Einheiten
2. Mehrdeutigkeit: Spalte 1 oder Zeile 3
Gewählte Lösung: V₂ nach E₁: **50** Einheiten
3. V₃ nach E₃: **80** Einheiten
4. Mehrdeutigkeit: Zeile 2 oder Zeile 4
Gewählte Lösung: V₂ nach E₂: **150** Einheiten
5. V₂ nach E₂: **50** Einheiten
6. V₃ nach E₄: **10** Einheiten
7. V₄ nach E₄: **10** Einheiten

Fertig. Folgendermaßen sieht diese Lösung aus:

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	
V ₁	7	5	12	6	120
V ₂	4	3	20	10	200
V ₃	7	14	1	16	90
V ₄	12	4	8	11	60
	50	200	80	140	

Überprüfen wir diese Lösung mit der Potentialmethode:

	E ₁ 0	E ₂ -1	E ₃ -9	E ₄ 6					
V ₁ 0	7	7	5	6	12	21	6		120
V ₂ 4	4		3		20	25	10	0	200
V ₃ 10	7	-3	14	5	1		16		90
V ₄ 5	12	7	4		8	12	11		60
	50	200	80	140					

Multipliziert man die Felder der Basislösung mit den jeweiligen Kostenwerten aus, so erhält man Transportkosten i.H.v. $120 \times 6 + 50 \times 4 + 150 \times 3 + 80 \times 1 + 10 \times 16 + 50 \times 4 + 10 \times 11 = 1.920$. Es ist jedoch offensichtlich, daß dies **kein Optimum** ist. Zudem besteht eine **andere gleichgute Lösung**. Um diese zu suchen, ist das sogenannte *Backtracking* erforderlich.

Im vorstehenden Lösungsweg gabe es *zwei Mehrdeutigkeiten*. Wenn wir ausgehend vom Anfang des Lösungsweges rechnen:

1. V₁ nach E₄: **120** Einheiten

dann aber bei der ersten Mehrdeutigkeit den „anderen“ Weg über Zeile 3 statt Spalte 1 wählen, dann erhalten wir:

2. Mehrdeutigkeit: Spalte 1 oder Zeile 3
Gewählte Lösung: V₃ nach E₃: **80** Einheiten

Die Mehrdeutigkeit ist also eine Art „Gabelung“. Sie erlaubt, den Rechenweg auf mindestens zwei Arten fortzusetzen. Das Problem hat damit insgesamt eine Art *Baumstruktur*. Jeder einzelne Rechenweg folgt einem Zweig in diesem virtuellen Baum. Zu den einzelnen Mehrdeutigkeiten zurückzugehen und die jeweils anderen Lösungswege zu erforschen ist der Kerngedanke des *Backtracking*. Auf diese Art können alle Zweige zurückverfolgt werden.

Die Potentialmethode verweist nur darauf, *daß* es andere Zweige gibt, zeigt aber nicht, wie die dortigen Lösungen aussehen. Die **-3** in der obigen nicht-optimalen Lösung verweist aber darauf, daß es eine durch 3 teilbare bessere Lösung geben muß.

Der weitere Lösungsweg unter der veränderten Annahme aus Schritt 2 ist jetzt:

3. V₃ nach E₁: **10** Einheiten
4. V₂ nach E₁: **40** Einheiten
5. Neue Mehrdeutigkeit: Zeile 2 oder Zeile 4
Gewählte Lösung: V₂ nach E₂: **160** Einheiten
6. V₄ nach E₂: **40** Einheiten
7. Mehrdeutigkeit: Zeile 4 oder Spalte 4
Dennoch eindeutige Lösung, da letzter Schritt
Einzig Lösung: V₄ nach E₄: **10** Einheiten

Wir erhalten auf diese Art die folgende alternative Lösung des gleichen Problems:

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄					
V ₁	7		5		12		6		120
V ₂	4		3		20		10		200
V ₃	7		14		1		16		90
V ₄	12		4		8		11		60
	50	200	80	140					

Die Transportkosten sind in diesem Beispiel aber nur $120 \times 6 + 40 \times 4 + 160 \times 3 + 10 \times 7 + 80 \times 1 + 40 \times 4 + 20 \times 11 = 1.890$, also geringer.

Die Potentialmethode beweist ferner, daß diese Lösung ein Optimum darstellt:

	E ₁ 0	E ₂ -1	E ₃ -6	E ₄ 6					
V ₁ 0	7	7	5	6	12	18	6		120
V ₂ 4	4		3		20	22	10	0	200
V ₃ 7	7		14	8	1		16	3	90
V ₄ 5	12	7	4		8	9	11		60
	50	200	80	140					

Dennoch gibt es auch hier eine andere, **gleichermäßen gute Lösung**. Die Null verweist nur auf die Existenz dieser Lösung, wiederum aber nicht auf deren Höhe. Dies wird u.a. daraus offenbar, daß die **Null** in dieser wie in der vorhergehenden Lösung an der gleichen Stelle erschienen ist. Die noch ungefundene Lösung verwendet also diesen Transportweg (V₂ nach E₄); wie hoch die dann insgesamt entstehende Transportkostensumme ist, kann man hier jedoch noch nicht sehen.

Leider hat auch die Potentialmethode ihre Klippen. Das betrachten wir ium nächsten Kapitel:

4.2.3. Spezielle Probleme bei der Potentialprüfung

Die Potentialmethode ist leider *nicht immer zuverlässig*. Um zu verstehen weshalb ist es aber unbedingt erforderlich, die Vorgehensweise bei der Bildung der Potentiale verstanden zu haben. Hier ist die Erkenntnis bedeutsam, daß es mit jedem beliebigen Anfangswert geht. In der

linken oberen (oder einer beliebigen anderen) Ecke mit einer Null zu beginnen, ist nur eine Angewohnheit aber keine Notwendigkeit. Hier liegt aber ein *besonderes Problem* verborgen.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	3	2	6	7	10	70
V ₂	2	3	7	3	6	70
V ₃	5	3	1	10	8	20
V ₄	3	6	8	3	2	40
V ₅	5	6	3	2	8	100
	40	60	30	90	80	

Betrachten wir zunächst das nebenstehende Problem. Es sollte dem Leser möglich sein, die hier nachstehend gezeigte Lösung auch selbständig zu finden. Diese Lösung ist die *einzigste Basislösung*, die sich aus der Vogel'schen Approximationsmethode ergibt:

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	3	2	6	7	10	70
V ₂	2	3	7	3	6	70
V ₃	5	3	1	10	8	20
V ₄	3	6	8	3	2	40
V ₅	5	6	3	2	8	100
	40	60	30	90	80	

Nun bilden wir die Potentiale für die Potentialprüfung. Wir beginnen links oben willkürlich mit der Null. Das bedingt die 3 und die 2 wegen der Kosten der linken beiden oberen Transportstrecken. Aus der 3 bei E₁ ergibt sich zwanglos die -1 bei V₂. Damit ist aber die 7 bei E₅ bestimmt. Aus diesem Wert schließlich ergibt sich zugleich die -5 bei V₄.

Nun entdecken wir aber, daß alle aufeinander bezüglichen u_i's und v_j's besetzt sind, aber die u's und v's noch nicht vollständig sind. Wir müssen also *erneut* mit einer Ausgangszahl beginnen. Wir setzen daher wiederum willkürlich eine Null in V₃. Das bedingt die 1 in E₃. Hieraus folgt aber die 2 in V₅ und hieraus schließlich die Null in E₄. Nun sind alle Randwerte belegt.

Die Bildung der Potentiale erbringt rechts unten den Wert -1, was uns sagt, daß diese Lösung **kein Optimum** sei.

Diese Lösung ist jedoch *verdächtig*, denn das Feld, in dem der negative Wert erscheint, hat einen *relativ hohen Kostenwert*. Die Theorie besagt aber, daß durch das Belegen der Felder mit negativem Differenzwert eine Kostenverbesserung in Höhe eines Vielfachen gerade dieses Kostendifferenzwertes erzielt werden kann. Sollte wirklich eine Ergebnisverbesserung erzielbar sein durch das Belegen der Transportstrecke von V₅ nach E₅ mit Transportkosten von 8 Einheiten? Kann die Potentialmethode hier ein falsches Ergebnis haben?

Wir beobachten in diesem Zusammenhang, daß wir um zu der gezeigten Lösung zu gelangen zwei Mal mit einer willkürlichen Ausgangszahl beginnen mußten, einmal in Zeile 1 und erneut in Zeile 3. Um zu verdeutlichen, welche Werte von der ersten willkürlichen Ausgangszahl abhängen und welche von der zweiten, haben wir jeweils alle von den beiden Ausgangszahlen abhängigen Potentiale und zugehörigen Felder der Basislösung farblich hinterlegt. Hierbei zeigt sich, daß die jeweils zusammengehörigen Werte voneinander völlig unabhängig sind. Sie sind gleichsam *voneinander getrennte Welten*.

Es ist naheliegend zu probieren was passiert, wenn man beim zweiten Anlauf nicht mit einer Null beginnt, denn es sollte ja immer mit jeder Zahl funktionieren. Wir beginnen also wiederum in V₁ mit einer 0 (*hellblau*), aber in V₃ mit einer -2 (oder in V₅ mit

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	3	2	6 +5	7 +7	10 +3	70
V ₂	2	3 +2	7 +7	3 +4	6	70
V ₃	5 +2	3 +1	1	10 +10	8 +1	20
V ₄	3 +5	6 +9	8 +12	3 +8	2	40
V ₅	5 ±0	6 +2	3	2	8 -1	100
	40	60	30	90	80	

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	3	2	6 +3	7 +5	10 +3	70
V ₂	2	3 +2	7 +5	3 +2	6	70
V ₃	5 +4	3 +3	1	10 +10	8 +3	20
V ₄	3 +5	6 +9	8 +10	3 +6	2	40
V ₅	5 +2	6 +4	3	2	8 +1	100
	40	60	30	90	80	

einer null) (rosa). Dann berechnen wir die Kostendifferenzen.

Zu unserer Überraschung stellen wir fest, daß alle Felder, die mindestens am Zeilen- oder am Spaltenende (oder am Zeilen- und am Spaltenende zugleich) eine „rosa“ Potentialzahl u_i oder v_j haben, andere Kostendifferenzwerte produzieren. Und: der negative Wert ist verschwunden. Ist die – völlig unveränderte! – Basislösung plötzlich zu einem Optimum geworden?

4.3. Auflösung der Empfangs- und der Versandbedingung

Die Empfangs- und die Versandbedingung besagen im wesentlichen, daß die von den Versandorten angebotene Menge der von den Empfangsorten nachgefragten Menge entsprechen muß. Dies ist eine *mathematische Vorbedingung* des Rechenverfahrens, nicht unbedingt aber eine *reale Bedingung*.

1. Nachfrage < Angebot (Nachfragelücke): In nebenstehendem Beispiel beträgt die Nachfrage der 5 Empfangsorte nur 660 Einheiten, während die 4 Versandorte 720 Einheiten anbieten. Es liegt also eine *Nachfragelücke* vor.

Um dennoch rechnen zu können, führt man einen neuen, *fiktiven* Empfangsort E_6 ein. Diesem wird die „fehlende“ Nachfrage von 60 Einheiten zugeordnet, so daß die formale Bedingung erfüllt ist. Die Transportkosten an den fiktiven Empfangsort betragen *immer null*, weil dieser ja gar nicht wirklich vorhanden ist.

Berechnet man diese Transporttabelle, so erhält man die untenstehende Lösung, die bereits mit Hilfe der Potentialmethode als Optimallösung erkannt worden ist.

Die Gesamtkosten der Erledigung dieser Transportaufgabe betragen 13.295 €.

	E ₁ 15	E ₂ 13	E ₃ 18	E ₄ 4	E ₅ 5	E ₆ -28	
V ₁ 0	23 +8	13	8	20 +16	5	0 +28	120
V ₂ -1	14	45 +33	7	62 +59	18 +14	0 +29	200
V ₃ 28	54 +11	74 +33	36	32	33 +0	0	315
V ₄ 5	47 +27	18	16 +3	31 +22	37 +27	0 +23	85
	150	90	180	130	110	60	

Allgemein versagt die Potentialprüfung, wenn mehrfach angefangen werden muß. In diesen Fällen erbringt sie *keine brauchbare Aussage mehr*. Dies ist eine der Methode inhärente Schwäche, für die es keine (einfache) Lösung gibt.

Soweit bisher bekannt, muß bei Auftreten dieses Problems das ganze System mit allen Zweigen im Wege des Backtrackings berechnet werden. Nur der Vergleich aller Lösungen bietet Gewißheit über das Optimum.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	23	13	8	20	5	120
V ₂	14	45	7	62	18	200
V ₃	54	74	36	32	33	315
V ₄	47	18	16	31	37	85
	150	90	180	130	110	

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	
V ₁	23	13	8	20	5	0	120
V ₂	14	45	7	62	18	0	200
V ₃	54	74	36	32	33	0	315
V ₄	47	18	16	31	37	0	85
	150	90	180	130	110	60	

2. Angebot < Nachfrage (Angebotslücke): Ebenso kann man verfahren, wenn eine *Angebotslücke* vorliegt, also die angebotene Anzahl von Einheiten an den Versandorten kleiner ist als die Nachfrage der Empfangsorte. Im untenstehenden Beispiel (*links*) ist etwa die Nachfrage der 5 Empfangsorte 790 Einheiten, während die 4 Versandorte nur 720 Einheiten anbieten.

Um auch in diesem Fall rechnen zu können, wird nunmehr ein neuer, *fiktiver Versandort* V_5 eingeführt. Diesem wird

die „fehlende“ Menge zugeordnet. Alle Transportkosten von V_5 zu den 5 Empfangsorten betragen wieder null. Nunmehr kann man zu der oben rechts (auf der Folgeseite) dargestellten Lösung gelangen, die jedoch **kein Optimum** ist. Auch hier wäre unter Umständen wiederum eine Lösung im Wege des Backtrackings denkbar.

Die hier demonstrierte Methode des Umganges mit unausgewogenen Transportproblemen kann man insofern verallgemeinern, daß stets die fehlende Angebots- oder Nachfragemenge durch einen zusätzlichen fiktiven Empfänger oder Verwender ausgeglichen werden kann. Die diesem „gelieferte“ (oder von diesem „empfangene“) fiktive Transportmenge ist der Ausgleich für das Marktungleichgewicht. Auf diese Weise kommt man zu einer „objektiven“ Berechnungen von Kürzungen und Rationierungen, die ideologiefrei dargestellt werden können. Das mag derzeit noch weltfremd klingen, doch wenn die gegenwärtige Regierung so weiter macht, wird die einstmals kostengünstige und

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	23	13	8	20	5	120
V ₂	14	45	7	62	18	200
V ₃	54	74	36	32	33	315
V ₄	47	18	16	31	37	85
	150	220	180	130	110	

zuverlässige Energieversorgung dieses Landes Rationierungen und Lieferungen auf Bezugsschein als alltägliches Phänomen kennen. Dann werden solche Rechnungen bald praxisrelevant sein.

4.4. Deckungsbeitragsoptimierung

Die Vogel'sche Approximationsmethode eignet sich unter gewissen Voraussetzungen auch zur *Deckungsbeitragsoptimierung*. Sie tritt damit in Konkurrenz zur Simplex-Methode. Voraussetzung ist das Vorliegen ausschließlich interdependenter Restriktionen mit dem Multiplikator 1, d.h., es werden keine Verbräuche definiert. Liegen ressourcenspezifische Verbräuche vor, so ist die Vogel'sche Approximationsmethode nicht mehr geeignet.

Ein Beispiel: Ein Maschinenhändler verkauft *fünf Typen eines Gerätes*. Er möchte die folgende Anzahl von Maschinen bestellen:

Geräteart:	A	B	C	D	E
Bedarf:	150	100	75	250	200

Der Händler hat vier Lieferanten, die die Anlagen liefern können. Da die Transportkapazität beschränkt ist, können jedoch pro Tag nur die folgenden Maximalmengen von den Lieferanten angeliefert werden:

Lieferant:	W	X	Y	Z
Kapazität:	300	250	150	200

Diese Zeile stellt die erforderlichen *interdependenten Beschränkungen* dar, die zur Abbildung im Rahmen der Vogel'schen Approximationsmethode erforderlich sind.

Da jeder Lieferant zu unterschiedlichen Preisen liefert, lassen sich für jedes Gerät und für jeden Händler unterschiedliche Deckungsbeiträge bestimmen:

Geräteart:	A	B	C	D	E	
Lieferer:	W	110	140	170	90	60
	X	120	130	180	70	40
	Y	100	140	190	80	50
	Z	130	110	160	10	70

Dies kann zunächst als lineares Gleichungssystem formuliert werden. Dann wäre eine Lösung im Wege der Simplex-Rechnung möglich. Das Problem kann aber auch

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	
V ₁	23 +30	13	8 +22	20 +49	5	120
V ₂	14	45 +11	7	62 +70	18 -8	200
V ₃	54	74	36 -11	32	33 -33	315
V ₄	47 +49	18	16 +25	31 +55	37 +27	85
V ₅	0 +20	0	0 +27	0 +42	0 +8	70
	150	90	180	130	110	

alternativ im Rahmen der Vogel'schen Approximationsmethode formuliert werden:

	A	B	C	D	E	F	
W	110	140	170	90	60	0	300
X	120	130	180	70	40	0	250
Y	100	140	190	80	50	0	150
Z	130	110	160	100	70	0	200
	150	100	75	250	200	125	

Da die Lieferer 125 Einheiten mehr liefern können als die Nachfrage des Händlers ist, ist das Modell zunächst unausgewogen. Es wurde daher eine Spalte mit einem fiktiven Gerät „F“ eingefügt worden. Dies entspricht der im vorigen Kapitel dargestellten Vorgehensweise, die bei der realen Anwendung dieses Problemes den Regelfall eher als die Ausnahme darstellt.

Da es sich hier um ein Maximierungsproblem handelt, aber nicht wie im Rahmen der Simplex-Methode ein der Dualkonversion vergleichbares Rechenverfahren zur Verfügung steht muß der Lösungsalgorithmus selbst so modifiziert werden, daß das Feld mit dem jeweils größten (statt dem kleinsten) Wert mit der maximalen Menge belegt wird. Die einzelnen Rechenschritte der Approximationsmethode ändern sich aber ansonsten nicht.

Das ergibt folgende Basislösung:

	A	B	C	D	E	F							
	120	140	180	90	60	0							
W	110	-10	140	170	-10	90	60	+20	0	0	300		
0			100			200							
X	120	0	130	-10	180	0	70	-20	40	0	250		
0									125	125			
Y	100	-30	140	-10	190		80	-20	50		150		
10					75				75				
Z	130		110	-40	160	-30	100		70	+20	0	-10	200
10		150					50						
	150	100	75	250	200	125							

Diese Lösung vermittelt einen Gesamt-Deckungsbeitrag von 79.500 €.

Anstelle der Kostenänderungswerte erhalten wir in der Potentialprüfung nunmehr *Deckungsbeitragsänderungswerte* die angeben, um wieviel sich der Deckungsbeitrag ändert, wenn eine bislang ungenutzte Lieferoption genutzt wird, also in die Basislösung einbezogen wird.

Die Lösung ist nun optimal, wenn *nur noch negative* (statt nur noch positive) Werte in den Deckungsbeitragsänderungsfeldern stehen.

Das Vorhandensein **zweier positiver Zahlen** deutet darauf hin, daß es noch eine bessere Lösung geben muß, die jeweils um *Einheiten von 20 €* günstiger ist, wenn man die Felder in die Lösung mit einbezieht, die die positiven Werte enthalten.

4.5. Optimierung nicht-optimaler Lösungen

Die von der Potentialmethode ermittelten Werte in den Feldern der Nichtbasislösung sagen, *um wieviel sich ein erzielt Ergebnis ändern würde, wenn man die jeweiligen Felder in die Basislösung mit einbeziehen würde.*

Da bei jeder Änderung einer Transportmenge (oder, an diesem Beispiel demonstriert einer Bestellmenge) und insbesondere bei jeder Belegung „neuer“ Felder die Zeilen- und Spaltenbedingungen erhalten bleiben müssen, kann nicht einfach eine neue Zahl in die Tabelle eingefügt werden. Jede Änderung in einer Zeile oder Spalte zieht weitere Änderungen in anderen Zeilen oder Spalten nach sich. Die Optimierung einer nicht-optimalen Lösung ist also ein *sehr kompliziertes Geschäft*.

Grundsätzlich kann die Optimierung einer nicht-optimalen Lösung auf *zwei Arten* geschehen:

- **Wiederholung der Berechnung der Basislösung:** Hierbei werden bei allen Mehrdeutigkeiten andere Lösungswege jeweils verschiedene Lösungsalternativen gewählt. Das entspricht dem oben dargestellten Backtracking-Algorithmus und führt zu u.U. *vollkommen voneinander verschiedenen* Ergebnissen. Bei jeder Mehrdeutigkeit gibt es mindestens zwei (aber manchmal auch viel mehr) Wege, die Berechnung

fortzusetzen, so daß ein *Lösungsbaum* mit u.U. *sehr vielen Verzweigungen* entsteht. Dieses Verfahren ist bei konsequenter Durchführung optimal, weil es alle möglichen Lösungen auffindet. Man bedenke in diesem Zusammenhang, daß die Vogel'sche Approximation nur Pareto-Optima ermittelt. Vergleicht man diese optimalen Lösungen miteinander, so läßt sich das absolute Optimum herausfinden.

- **Neuberechnung fertiger Ergebnisse:** Hierbei wird zunächst jedes Feld mit einem positiven Wert mit der maximal dort möglichen Menge belegt. Anschließend werden die restlichen Felder so verändert, daß wieder alle Zeilen- und Spaltenbedingungen erfüllt sind. Diese Methode kann *sehr aufwendig* sein und wird hier nicht näher betrachtet.

Durch eine *adäquate Neuberechnung* kommen wir zu der vorstehenden optimierten Lösung. Diese erbringt schon einen Gesamtdeckungsbeitrag von 80.250 €, ist aber *immer noch nicht absolut optimal* wie das Vorhandensein zweier neuer **roter** Werte zeigt.

	A	B	C	D	E	F							
	120	140	190	90	60	20							
W	110	-10	140	170	-20	90	60		0	-20	300		
0			25			200		75					
X	120	+20	130	+10	180	+10	70	±0	40	0	250		
-20									125	125			
Y	100	-20	140		190		80	-10	50	-10	150		
0			75		75								
Z	130		110	-40	160	-40	100		70	0	0	-30	200
10		150					50						
	150	100	75	250	200	125							

Für dieses Problem existiert jedoch noch eine weitere zulässige Lösung, die die in der vorstehenden optimierten Lösung mit **+20** angegebene Lieferoption nutzt. Durch Belegung dieser Lieferoption wird eine weitere Verbesserung in Einheiten zu je 20 € erreicht:

	A	B	C	D	E	F							
	120	140	190	90	60	0							
W	110	-10	140	170	-20	90	60		0	±0	300		
0			25			75		200					
X	120		130	-10	180	-10	70	-20	40	-20	0	250	
0		125									125		
Y	100	-10	140		190		80	-10	50	-10	0	±0	150
0			75		75								
Z	130		110	-40	160	-40	100		70	±0	0	-10	200
10		25					175						
	150	100	75	250	200	125							

Der Gesamtdeckungsbeitrag ist hier 82.750 €.

Da das Potentialverfahren für diese Lösung keine positiven Zahlen mehr ergibt, handelt es sich hierbei um eine optimale Basislösung, d.h., es ist keine weitere Steigerung des Deckungsbeitrages mehr möglich.

Vielleicht ist es auch noch interessant anzumerken, daß durch Belegung der ursprünglich mit +20 angegebenen Lieferoption der Deckungsbeitragsdifferenzwert von -10 sich in +10 wandelt. Es genügt also zumeist, nur den jeweils größten Deckungsbeitragsänderungswert zu belegen. Hierdurch werden vielfach alle kleineren Werte in der nächsten Lösungsvariante verschwinden.

Beide optimierte Lösungen wurden durch Neuberechnung mit der Vogel'schen Approximationsmethode erreicht.

4.6. Das Travelling Salesman Problem

Alle bisher diskutierten Lösungsansätze gingen von mehreren simultan zu belegenden Transportwegen aus, also von *Handlungsalternativen*. Es war zwischen verschiedenen Alternativen zu entscheiden. Das Travelling Salesman Problem hingegen denkt in *Reihenfolgebegriffen*. Es ist nicht zu entscheiden, welchen Weg man fährt bzw. welche Stadt man besucht, denn es müssen alle Wege gefahren und sämtliche Städte besucht werden. Die Frage ist nur, *in welcher Reihenfolge* das geschehen soll. Ziel ist dabei auch wieder die *Streckenoptimierung*.

Grundlegend haben wir es hier mit einem Problem der *Kombinatorik* zu tun. Die Gesamtanzahl der möglichen Fahrtstrecken ergibt sich aus der *Fakultät der Anzahl der Zielorte*. Es gilt also:

- n = Anzahl der unterschiedlichen Städte
- n! = Anzahl möglicher Reihenfolgen der Besuche

Man muß sich das in Zahlen verdeutlichen um sich Klarheit darüber zu verschaffen, weshalb dieses Problem zu den schwierigsten Problemen des Operations Research überhaupt gehört:

Städte	Mögliche Touren
2	2
3	6
4	24
5	120
6	720
7	5.040
8	40.320
9	362.880
10	3.628.800
11	39.916.800
12	479.001.600
13	6.227.020.800
14	87.178.291.200
15	1.307.674.368.000
16	20.922.789.888.000

Verfahren, die ein Optimum finden, indem sie alle möglichen Touren durchrechnen, heißen auch *Verfahren der brutalen Gewalt*. Offensichtlicherweise eignen sie sich nur für Transportpläne mit einer kleinen Zahl von zu besuchenden Städten, sind aber *programmtechnisch einfacher* zu handhaben und die *Grundlage für weiterführende Modelle*, so daß wir hier ein einfaches Beispiel betrachten wollen:

Zwischen *fünf Städten* („A“, „B“, „C“, „D“ und „E“) sind folgende *Entfernungen* festgestellt worden:

	A	B	C	D	E
A		114,50 km	41,60 km	81,60 km	13,50 km
B	114,50 km		55,20 km	19,60 km	19,25 km
C	41,60 km	55,20 km		36,69 km	18,52 km
D	81,60 km	19,60 km	36,69 km		79,20 km
E	13,50 km	19,25 km	18,52 km	79,20 km	

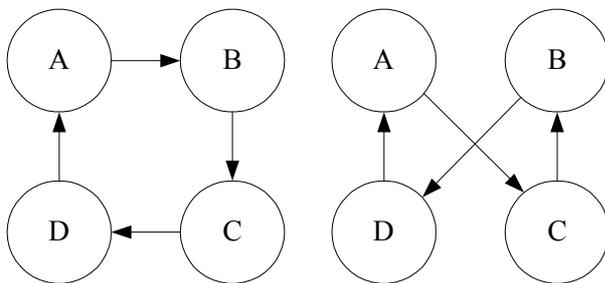
Es ergeben sich damit 5! = 120 mögliche Touren. Wird für jede mögliche Tour die Entfernung berechnet, so ergeben sich *folgende 120 Ergebnisse*:

1	ABCDE	299,09 km	61	CDBEA	130,64 km
2	ABCED	349,02 km	62	CDBAE	202,81 km
3	ABDCE	202,81 km	63	CDEBA	291,24 km
4	ABDEC	273,42 km	64	CDEAB	299,09 km
5	ABECD	270,56 km	65	CDABE	270,56 km
6	ABEDC	291,24 km	66	CDAEB	206,24 km
7	ACBED	276,85 km	67	CEBAD	270,56 km
8	ACBDE	209,10 km	68	CEBDA	180,57 km
9	ACDEB	291,24 km	69	CEDAB	349,02 km
10	ACDBE	130,64 km	70	CEDBA	273,42 km
11	ACEDB	273,42 km	71	CEADB	188,42 km
12	ACEBD	180,57 km	72	CEABD	202,81 km
13	ADBCE	188,42 km	73	DABCE	349,02 km
14	ADBEC	180,57 km	74	DABEC	270,56 km
15	ADCBE	206,24 km	75	DACBE	276,85 km
16	ADCEB	270,56 km	76	DACEB	180,57 km
17	ADEBC	276,85 km	77	DAEBC	206,24 km
18	ADECB	349,02 km	78	DAECB	188,42 km
19	AEBDC	130,64 km	79	DBAEC	202,81 km
20	AEBCD	206,24 km	80	DBACE	273,42 km
21	AECDB	202,81 km	81	DBCEA	188,42 km
22	AECBD	188,42 km	82	DBCAE	209,10 km
23	AEDCB	299,09 km	83	DBECA	180,57 km
24	AEDBC	209,10 km	84	DBEAC	130,64 km
25	BAECD	202,81 km	85	DCABE	291,24 km
26	BAEDC	299,09 km	86	DCAEB	130,64 km
27	BACED	273,42 km	87	DCBAE	299,09 km
28	BACDE	291,24 km	88	DCBEA	206,24 km
29	BADEC	349,02 km	89	DCEAB	202,81 km
30	BADCE	270,56 km	90	DCEBA	270,56 km
31	BCEDA	349,02 km	91	DEACB	209,10 km
32	BCEAD	188,42 km	92	DEABC	299,09 km
33	BCADE	276,85 km	93	DEBCA	276,85 km
34	BCAED	209,10 km	94	DEBAC	291,24 km
35	BCDAE	206,24 km	95	DECBA	349,02 km
36	BCDEA	299,09 km	96	DECAB	273,42 km
37	BDEAC	209,10 km	97	EADBC	188,42 km
38	BDECA	273,42 km	98	EADCB	206,24 km
39	BDAEC	188,42 km	99	EABDC	202,81 km
40	BDACE	180,57 km	100	EABCD	299,09 km
41	BDCEA	202,81 km	101	EACDB	130,64 km
42	BDCAE	130,64 km	102	EACBD	209,10 km
43	BEDCA	291,24 km	103	EBDCA	130,64 km
44	BEDAC	276,85 km	104	EBDAC	180,57 km
45	BEACD	130,64 km	105	EBACD	291,24 km
46	BEADC	206,24 km	106	EBADC	270,56 km
47	BECAD	180,57 km	107	EBCAD	276,85 km
48	BECDA	270,56 km	108	EBCDA	206,24 km
49	CADEB	276,85 km	109	ECDAB	270,56 km
50	CADBE	180,57 km	110	ECDBA	202,81 km
51	CAEDB	209,10 km	111	ECADB	180,57 km
52	CAEBD	130,64 km	112	ECABD	273,42 km
53	CABDE	273,42 km	113	ECBDA	188,42 km
54	CABED	291,24 km	114	ECBAD	349,02 km
55	CBDAE	188,42 km	115	EDCBA	299,09 km
56	CBDEA	209,10 km	116	EDCAB	291,24 km
57	CBEAD	206,24 km	117	EDABC	349,02 km
58	CBEDA	276,85 km	118	EDACB	276,85 km
59	CBAED	299,09 km	119	EDBAC	273,42 km
60	CBADE	349,02 km	120	EDBCA	209,10 km

Es ist offensichtlich, daß 130,64 km die minimale mögliche Entfernung zwischen allen Städten ist. Diese Lösung kommt insgesamt 10 mal vor, so daß dieses zugleich eine *mehrdeutige Lösung* ist (was für diesen Problemtyp der Regelfall ist).

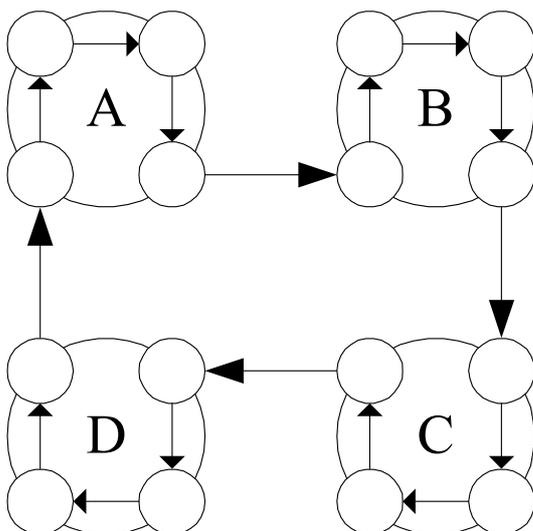
Da bei einer größeren Anzahl die Methode der brutalen Gewalt nicht mehr durchführbar ist, braucht man eine Ersatzlösung. Diese besteht darin, Zielorte zu Gruppen zusammenzufassen und in Segmenten zu rechnen. Mehrstufige Segmentrechnung führt dabei zu einer drastischen Verkleinerung des Problems, so daß man die Grenze der technisch möglichen Berechnung erheblich herauschieben kann.

Sollen beispielsweise vier Zielorte besucht werden, so könnte dies in der Reihenfolge $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ oder auch $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$ geschehen:



Hier ist die Alternative $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ offensichtlich streckenmäßig kürzer als die Möglichkeit $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$.

Jeder Kreis kann jedoch für eine *Mehrzahl von Städten* stehen, einen sogenannten *Cluster*. Das ist realistisch, weil Zielorte wirtschaftlicher Aktivitäten selten gleichmäßig über die Landkarte verstreut liegen, sondern meistens in *Ballungszentren* konzentriert sind:



Wir würden nunmehr mit einem Optimierungsproblem von 16 Städten konfrontiert, was immerhin eine Anzahl von 20.922.789.888.000 möglichen Touren bedingt.

Man kann das Problem aber vereinfachen, indem man

- erst die Wege zwischen den Ballungszentren berechnet und
- dann die Wege innerhalb der einzelnen Ballungszentren optimiert.

Auf diese Art hätte man es erst mit 4 Ballungszentren zu tun und müßte nur $4! = 24$ mögliche Wege durchrechnen. Dann wären die einzelnen Ballungszentren zu berechnen, was pro Fall wiederum $4! = 24$ mögliche Touren bedeuten würde. *Insgesamt reduzierte sich also das gewaltig komplexe Optimierungsproblem auf nur noch $5 \text{ mal } 24 = 120$ mögliche Touren!*

Dies ist *durchaus realistisch*: wir überlegen erst, in welcher Reihenfolge wie nach Hamburg, Berlin, München und in das Ruhrgebiet fahren, und erst dann, in welcher Reihenfolge wie die jeweils in Hamburg, Berlin usw. wohnenden Kunden besuchen. Touren, die ein ständiges Hin- und Herfahren zwischen den Ballungsräumen bedingen, also Fälle wie ein Kundenbesuch in Hamburg, dann einer in Berlin, dann wieder einer in Hamburg, dann erneut nach Berlin usw. werden damit von vorne herein ausgeschlossen.

Dieses Verfahren ist auch als *Segment Reversal* bekannt und eignet sich, auch noch Transportprobleme mit mehreren hundert Zielorten auf PC-Rechnern zu berechnen, wenn sie nur entsprechend in Cluster aufgeteilt werden können.

Je mehr die Verteilung der Ziele einer *Gleichverteilung* ähnelt, um so *ungenauer* arbeitet das Verfahren. Es ist also insgesamt nur eine *Annäherung (Annealing)*, aber dennoch eine *brauchbare Lösung*, die vielleicht nicht das absolute Optimum findet, aber immerhin doch eine Lösung, die die der Konkurrenz beiweitem übertrifft. Wollen wir aber etwa den Weg eines Löt Kopfes über eine Platine planen, was ein geradezu klassisches Wegeproblem ist, kann die Methode versagen, denn Lötstellen, die die Maschine bearbeiten muß, liegen verstreut über die ganze Fläche. Es gibt keine „Cluster“. Hierfür bestehen derzeit noch keine endgültigen, stets anwendbaren Lösungsmuster.